

---

## ABSCHLUSSBERICHT

# Entwicklung und Verifizierung eines kostengünstigen Verfahrens zur Errichtung von Flächenkollektoren als Erdwärmequelle für Wärmepumpen

---

**für**

Forschungsinitiative Zukunft Bau

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn

**von**

Dr.-Ing. Detlef Bohmann (Bega.Tec),

Dipl.-Ing. Frank Burmeister (GWI), Dipl.-Ing. Hendrik Rahms (GWI),

Dipl.-Ing. Kai Scholten (GWI), Dipl.-Ing. Janina Senner (GWI)

Dipl.-Ing. Eren Tali (GWI), Volko Kuschan (GWI)

**Essen, Oktober 2012**

## Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

Geschäftsführender Vorstand: Dr.-Ing. Rolf Albus

Wissenschaftlicher Vorstand: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner

Kaufmännischer Vorstand: Dipl.-Betriebswirt Michael Radzuweit

Bankverbindung

Sparkasse Essen (BLZ 360 501 05)

Konto-Nr.: 208033

Mitglied der

**AIF** Mitglied

**Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des  
Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.**

**(Aktenzeichen Z 6 – 10.08.18.7 – 08.38/ II 2 – F20-08-1-170)**

**Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.**

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>MOTIVATION, HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens .....	- 1 -
1.2	Begründung des Forschungsvorhabens .....	- 3 -
1.3	Ausgangsbasis für das Forschungsvorhabens .....	- 4 -
1.4	Forschungsansatz .....	- 5 -
<b>2</b>	<b>ÜBERBLICK UND BEWERTUNG OBERFLÄCHENNAHER GEOTHERMISCHER WÄRMEQUELLEN .....</b>	<b>- 6 -</b>
2.1	Einführung in die Geothermie .....	- 6 -
2.2	Arten und Erschließung der Geothermie .....	- 8 -
2.3	Wärmepumpentechnik .....	- 11 -
2.4	Geothermische Aspekte des Bodens .....	- 16 -
2.5	Oberflächige Geothermienutzung mittels Flächenkollektoren .....	- 28 -
2.5.1	BEMESSUNG VON FLÄCHENKOLLEKTOREN .....	- 29 -
2.5.2	KOSTENBEISPIEL FÜR EINEN FLÄCHENKOLLEKTOR .....	- 32 -
2.6	Alternative Formen .....	- 33 -
<b>3</b>	<b>ANALYSE UND BEWERTUNG BESTEHENDER EINBRINGVERFAHREN .....</b>	<b>- 36 -</b>
3.1	Konventionelle Einbringung von horizontalen Flächenkollektoren .....	- 36 -
3.2	Grabenlose Verlegungen von Leitungen .....	- 38 -
3.2.1	VORGEHENSWEISE BEIM GRABENLOSENLEITUNGSBAU .....	- 39 -
3.2.2	HORIZONTALSPÜLBOHRVERFAHREN .....	- 41 -
3.2.3	BODENVERDRÄNGUNGSHAMMER .....	- 42 -
3.3	Vor- und Nachteile des innovativen Einbringverfahren gegenüber der konventionellen Einbringung .....	- 44 -
<b>4</b>	<b>AUSWAHL UND ERPROBUNG EINES WERKZEUGES .....</b>	<b>- 48 -</b>

---

<b>5</b>	<b>NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN DER KOLLEKTOREN</b> .....	<b>52 -</b>
<b>5.1</b>	<b>Allgemeine Information zum Simulationsprogramm</b> .....	<b>52 -</b>
5.1.1	BESCHREIBUNG DER STRÖMUNG IN FLÄCHENKOLLEKTOREN .....	53 -
5.1.2	TURBULENZMODELLIERUNG .....	54 -
5.1.3	WÄRMEÜBERTRAGUNGSVORGÄNGE .....	55 -
<b>5.2</b>	<b>Angenommene Randbedingungen</b> .....	<b>55 -</b>
<b>5.3</b>	<b>Variante 1: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Längen</b> .....	<b>58 -</b>
<b>5.4</b>	<b>Variante 2: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Geometrien</b> .....	<b>60 -</b>
<b>5.5</b>	<b>Variante 3: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Durchmesser</b> .....	<b>63 -</b>
<b>5.6</b>	<b>Variante 4: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens</b> .....	<b>64 -</b>
<b>5.7</b>	<b>Variante 5: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials</b> .....	<b>66 -</b>
<b>5.8</b>	<b>Variante 6: Wirkung Volumenstrom-Verdoppelung bei Geometrie 3</b> .....	<b>67 -</b>
<b>5.9</b>	<b>Variante 7: Vergleich der Geometrie 2 und 3 bei gleicher Geschwindigkeit und verschiedenen Bodeneigenschaften</b> .....	<b>70 -</b>
<b>5.10</b>	<b>Numerische Auslegung verschiedener Kollektorgeometrien bei unterschiedlichen Parametern</b> .....	<b>73 -</b>
<b>6</b>	<b>PLANUNG UND AUSLEGUNG DER FELDTTESTUNTERSUCHUNG</b> .....	<b>75 -</b>
<b>6.1</b>	<b>Planung der Untersuchung</b> .....	<b>75 -</b>
<b>6.2</b>	<b>Errichtung einer Pilotanlage</b> .....	<b>77 -</b>
<b>6.3</b>	<b>Wärmeübertrager</b> .....	<b>80 -</b>
<b>6.4</b>	<b>Bodengutachten</b> .....	<b>81 -</b>
<b>6.5</b>	<b>Material der Kollektorrohre</b> .....	<b>82 -</b>
<b>6.6</b>	<b>Wärmeträgerfluid</b> .....	<b>83 -</b>
<b>6.7</b>	<b>Rakete mit Spülverfahren</b> .....	<b>83 -</b>
<b>7</b>	<b>MESSDATENERFASSUNG</b> .....	<b>84 -</b>
<b>7.1</b>	<b>Temperaturfühler</b> .....	<b>85 -</b>
<b>7.2</b>	<b>Volumenstrommesser</b> .....	<b>87 -</b>
<b>7.3</b>	<b>Stammdatenbearbeitungen</b> .....	<b>87 -</b>

---

---

<b>8</b>	<b>AUSWERTUNG DER MESSDATEN, STANDORT BERLIN I .....</b>	<b>- 88 -</b>
8.1	Standort Spezifikationen Berlin I (Wernsdorf).....	- 88 -
8.2	Beurteilung der einzelnen Auswertungsperioden .....	- 90 -
8.3	Periode 1.....	- 93 -
8.4	Periode 2.....	- 95 -
8.5	Periode 3.....	- 96 -
8.6	Periode 4.....	- 97 -
8.7	Periode 5.....	- 99 -
8.8	Periode 6.....	- 101 -
8.9	Periode 7.....	- 102 -
8.10	Periode 8.....	- 104 -
<b>9</b>	<b>AUSWERTUNG DER MESSDATEN, STANDORT ESSEN .....</b>	<b>- 106 -</b>
9.1	Standort Spezifikationen Essen .....	- 106 -
9.2	Messergebnisse am Standort Essen.....	- 109 -
9.2.1	PERIODE 1.....	- 109 -
9.2.2	PERIODE 2.....	- 113 -
<b>10</b>	<b>AUSWERTUNG DER MESSDATEN, STANDORT BERLIN II .....</b>	<b>- 119 -</b>
10.1	Standort Spezifikationen Berlin II, Nottepfad.....	- 119 -
10.2	Messergebnisse am Standort Berlin II, Nottepfad .....	- 121 -
10.2.1	PERIODE 1.....	- 121 -
10.2.2	PERIODE 2.....	- 123 -
10.2.3	PERIODE 3.....	- 125 -
10.2.4	PERIODE 4.....	- 127 -
<b>11</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT .....</b>	<b>- 129 -</b>
<b>12</b>	<b>LITERATURANGABEN .....</b>	<b>- 136 -</b>

---

---

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1: EXEMPLARISCHER TEMPERATURVERLAUF EINER ERDOBERFLÄCHE BIS 5000M TIEFE [13] .....	- 6 -
ABBILDUNG 2-2: FUNKTIONSSCHEMA EINER ERDWÄRMEHEIZUNG MIT WÄRMEPUMPE [2] .....	- 12 -
ABBILDUNG 2-3: DARSTELLUNG DES LINKSLÄUFIGEN KREISPROZESSES NACH CARNOT [9].....	- 13 -
ABBILDUNG 2-4: BESTANDTEILE DES BODENS [28].....	- 16 -
ABBILDUNG 2-5: VERTEILUNG VON NIEDERSCHLÄGEN UND BODENWASSER [25] .....	- 19 -
ABBILDUNG 2-6: SPEZ. WÄRMEKAPAZITÄT VON WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR [64].....	- 22 -
ABBILDUNG 2-7: WÄRMEKAPAZITÄT IN ABHÄNGIGKEIT DER FEUCHTIGKEIT [21].....	- 22 -
ABBILDUNG 2-8:TYPISCHER SCHICHTENAUFBAU ERDBODEN [33].....	- 24 -
ABBILDUNG 2-9: JAHRESGANG DER TEMPERATUR IN EINEM BODEN BEI KÖNIGSBERG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TIEFE [24] .....	- 25 -
ABBILDUNG 2-10: TAGESGANG DER TEMPERATUR IN EINER SANDBRAUNERDE BEI KÖNIGSBERG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BODENTIEFE [24] .....	- 26 -
ABBILDUNG 2-11: AUFBAUSCHEMA VON ERDWÄRMEKOLLEKTOREN [1].....	- 29 -
ABBILDUNG 2-12: FUNKTIONSSCHEMA VON ERDWÄRMEKÖRBEIN [1] .....	- 33 -
ABBILDUNG 3-1: HDD VERFAHREN [18] .....	- 41 -
ABBILDUNG 3-2: ERDRAKETE NACH DEM ZWEITAKTPRINZIP.....	- 42 -
ABBILDUNG 3-3: FUNKTIONSDARSTELLUNG EINES BODENVERDRÄNGUNGSHAMMERS [26] .....	- 44 -
ABBILDUNG 4-1: BODENGRUBEN BEIM HORIZONTALSPÜLBOHRVERFAHREN MIT BODENVERDRÄNGUNGS-HAMMER UND SEILWINDEN . 49 -	-
ABBILDUNG 4-2: BODENVERDRÄNGUNGSHAMMER BEI DER TUNNELUNG.....	- 49 -
ABBILDUNG 4-3: ANBRINGEN DES 4-FACH-ROHRES AN DEN BODENVERDRÄNGUNGSHAMMER.....	- 50 -
ABBILDUNG 4-4: ROHRKOLLEKTOR IST VOLLSTÄNDIG EINGEZOGEN .....	- 50 -
ABBILDUNG 4-5: EINSCHWÄMMEN DES ROHRKOLLEKTORS BEIM RÜCKZUG .....	- 51 -
ABBILDUNG 4-6: EINGESCHWÄMMTES 4-FACH-ROHR IM ERDREICH .....	- 51 -
ABBILDUNG 5-1: FLUENT PROGRAMMSTRUKTUR [34] .....	- 52 -
ABBILDUNG 5-2: VORGEHENSWEISE BEI DER MATHEMATISCHEN MODELLIERUNG MIT FLUENT [39].....	- 53 -
ABBILDUNG 5-3: GEOMETRIE MIT 40 M GESAMTLÄNGE (GEOMETRIE 1).....	- 58 -

---

ABBILDUNG 5-4: GEOMETRIE MIT 80 M GESAMTLÄNGE (GEOMETRIE 2) .....	59 -
ABBILDUNG 5-5: ABSTÄNDE DER KOLLEKTORROHRE .....	59 -
ABBILDUNG 5-6: VERGLEICH KOLLEKTORLEISTUNG VON GEOMETRIE 1 UND GEOMETRIE 2.....	60 -
ABBILDUNG 5-7: KOLLEKTOR MIT 80 M LÄNGE (GEOMETRIE 2).....	61 -
ABBILDUNG 5-8: KOLLEKTOR MIT 80 M GESAMTLÄNGE IN PARALLELER U-FORM (GEOMETRIE 3) .....	61 -
ABBILDUNG 5-9: VERGLEICH KOLLEKTORLEISTUNG VON GEOMETRIE 2 UND GEOMETRIE 3.....	62 -
ABBILDUNG 5-10: KOLLEKTORLEISTUNG (GEOMETRIE 2, $L_{\text{ROHR}} = 80 \text{ M}$ ) MIT UNTERSCHIEDLICHEN ROHR- DURCHMESSERN ...	63 -
ABBILDUNG 5-11: VERGLEICH BODENEIGENSCHAFTEN ANHAND GEOMETRIE 2 .....	64 -
ABBILDUNG 5-12: VERGLEICH BODENEIGENSCHAFTEN ANHAND GEOMETRIE 3 .....	65 -
ABBILDUNG 5-13: VERLAUF DER KOLLEKTORLEISTUNG UND DER TEMPERATURDIFFERENZ DER SOLE ALS FUNKTION DER ROHR- WÄRMELEITFÄHIGKEIT BEI GEOMETRIE 2 .....	66 -
ABBILDUNG 5-14: VERDOPPELUNG DER VOLUMENSTRÖME BEI GEOMETRIE 3, $\lambda = 0,35 \text{ W/MK}$ .....	67 -
ABBILDUNG 5-15: VERDOPPELUNG DER VOLUMENSTRÖME BEI GEOMETRIE 3, $\lambda = 1,2 \text{ W/MK}$ .....	68 -
ABBILDUNG 5-16: VERDOPPELUNG DER VOLUMENSTRÖME BEI GEOMETRIE 3, $\lambda = 2,4 \text{ W/MK}$ .....	69 -
ABBILDUNG 5-17: GEOMETRIE 2 & 3 BEI GLEICHER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT, $\lambda = 0,35 \text{ W/MK}$ .....	70 -
ABBILDUNG 5-18: GEOMETRIE 2 & 3 BEI GLEICHER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT, $\lambda = 1,2 \text{ W/MK}$ .....	71 -
ABBILDUNG 5-19: GEOMETRIE 2 & 3 BEI GLEICHER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT, $\lambda = 2,4 \text{ W/MK}$ .....	72 -
ABBILDUNG 5-20: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN PARAMETERN.....	73 -
ABBILDUNG 6-1: STRÖMUNGS- UND WÄRMETECHNISCHE BERECHNUNG DES ETHYLENGLYKOLKREISLAUFS IM FLÄCHENKOLLEKTOR- 76	
-	
ABBILDUNG 6-2: SKIZZE VOM VERSUCHSANLAGE .....	77 -
ABBILDUNG 6-3: PILOTANLAGE IM VERSUCHSAUFBAU .....	78 -
ABBILDUNG 6-4: SCHEMATISCHER AUFBAU DER PILOTANLAGE .....	79 -
ABBILDUNG 7-1: DARSTELLUNG DER VIERLEITERTECHNIK.....	86 -
ABBILDUNG 8-1: KOLLEKTORANSTEUERUNG AM STANDORT BERLIN-WERNSDORF.....	88 -
ABBILDUNG 8-2: MESSDATENERFASSUNG AM STANDORT BERLIN-WERNSDORF.....	89 -
ABBILDUNG 8-3: BODEN- UND AUßENTEMPERATUREN VOM 1.09.09 BIS ZUM 15.09.09.....	90 -
ABBILDUNG 8-4: LAGE DER TEMPERATURMESSSTELLEN, STANDORT BERLIN I .....	92 -

---

---

ABBILDUNG 8-5: LEISTUNG DER KOLLEKTOREN VOM 30.06.09 BIS ZUM 15.07.09 .....	- 93 -
ABBILDUNG 8-6: LEISTUNGEN UND DURCHFLUSSMENGE VOM 30.06.09 BIS ZUM 15.07.09 .....	- 94 -
ABBILDUNG 8-7: KOLLEKTORLEISTUNGEN VOM 1.09.09 BIS ZUM 15.09.09 .....	- 95 -
ABBILDUNG 8-8: KOLLEKTORLEISTUNGEN VOM 17.10.09 BIS ZUM 31.10.09 .....	- 96 -
ABBILDUNG 8-9: KOLLEKTORLEISTUNGEN VOM 1.11.09 BIS ZUM 30.11.09 .....	- 97 -
ABBILDUNG 8-10: TEMPERATUREN VOM 1.11.09 BIS ZUM 30.11.09 .....	- 98 -
ABBILDUNG 8-11: KOLLEKTORLEISTUNGEN VOM 1.12.09 BIS ZUM 31.12.09 .....	- 99 -
ABBILDUNG 8-12: $\Delta\vartheta$ ZUR LEISTUNG DER KOLLEKTOREN VOM 1.12.09 BIS ZUM 31.12.09 .....	- 100 -
ABBILDUNG 8-13: KOLLEKTORLEISTUNGEN VOM 1.01.10 BIS ZUM 14.01.10 .....	- 101 -
ABBILDUNG 8-14: KOLLEKTORLEISTUNG VOM 05.02.2010 BIS 28.02.2010 .....	- 102 -
ABBILDUNG 8-15: TEMPERATUREN VOM 01.02.2010 BIS ZUM 28.02.2010 .....	- 103 -
ABBILDUNG 8-16: KOLLEKTORLEISTUNG VOM 01.03.10 BIS 31.03.2010 .....	- 104 -
ABBILDUNG 8-17: TEMPERATUREN VOM 01.03.2010 BIS ZUM 31.03.2010 .....	- 105 -
ABBILDUNG 9-1: VERLEGUNG DER DREI KOLLEKTOREN IN ESSEN .....	- 106 -
ABBILDUNG 9-2: VERSUCHSHAUS AUF DEM GELÄNDE DES GASWÄRME-INSTITUTES IN ESSEN .....	- 107 -
ABBILDUNG 9-3: INSTALLATION ZUM UMSCHALTEN DER DREI KOLLEKTOREN AM GASWÄRME-INSTITUT ESSEN .....	- 108 -
ABBILDUNG 9-4: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNGEN VOM FEBRUAR BIS JUNI 2011 .....	- 109 -
ABBILDUNG 9-5: TEMPERATUR UND VOLUMENSTROM KOLLEKTOR 1 .....	- 110 -
ABBILDUNG 9-6: TEMPERATUR UND VOLUMENSTROM KOLLEKTOR 2 .....	- 111 -
ABBILDUNG 9-7: TEMPERATUR UND VOLUMENSTROM KOLLEKTOR 3 .....	- 111 -
ABBILDUNG 9-8: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG VOM 16.01.2012 BIS 08.02.2012 .....	- 113 -
ABBILDUNG 9-9: VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATUREN DER KOLLEKTOREN VOM 16.01. BIS 08.02.2012 .....	- 114 -
ABBILDUNG 9-10: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG VOM 02.03. BIS 26.03.2012 .....	- 115 -
ABBILDUNG 9-11: VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATUREN DER KOLLEKTOREN VOM 02.03. BIS 26.03.2012 .....	- 116 -
ABBILDUNG 9-12: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG VOM 26.03. BIS 12.04.2012 .....	- 117 -
ABBILDUNG 9-13: VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATUREN DER KOLLEKTOREN VOM 26.03. BIS 12.04.2012 .....	- 118 -
ABBILDUNG 10-1: DATENERFASSUNG AM STANDORT BERLIN-NOTTEPFAD .....	- 119 -

---



---

ABBILDUNG 10-2: ANSCHLUSS ERDWÄRMEKOLLEKTOR AM STANDORT BERLIN-NOTTEPFAD.....	120 -
ABBILDUNG 10-3: KOLLEKTOR LEISTUNG IM ZEITRAUM NOVEMBER 2009 .....	121 -
ABBILDUNG 10-4: TEMPERATURVERLAUF IM ZEITRAUM NOVEMBER 2009.....	122 -
ABBILDUNG 10-5: KOLLEKTOR LEISTUNG IM ZEITRAUM JANUAR 2010 .....	123 -
ABBILDUNG 10-6: TEMPERATURVERLAUF IM ZEITRAUM JANUAR 2010.....	124 -
ABBILDUNG 10-7: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG IM ZEITRAUM MÄRZ 2010 .....	125 -
ABBILDUNG 10-8: TEMPERATURVERLAUF IM ZEITRAUM MÄRZ 2010 .....	126 -
ABBILDUNG 10-9: KOLLEKTOR LEISTUNG IM ZEITRAUM APRIL 2010 .....	127 -
ABBILDUNG 10-10: TEMPERATURVERLAUF IM ZEITRAUM APRIL 2010 .....	128 -
ABBILDUNG 11-1: VERGLEICH VON ERGEBNISSEN AUS SIMULATION UND MESSUNG .....	130 -
ABBILDUNG 11-2: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG FEBRUAR BIS JUNI 2011 (ESSEN) .....	132 -
ABBILDUNG 11-3: KOLLEKTORENTNAHMELEISTUNG VOR DER ABSCHALTUNG FEBRUAR 2012 (ESSEN).....	133 -
ABBILDUNG 11-4: VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATURDATEN VOR DER ABSCHALTUNG FEBRUAR 2012 (ESSEN).....	134 -

---

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: BESTANDTEILE DER LUFT UND DES BODENS .....	- 18 -
TABELLE 2-2: SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄTEN VERSCHIEDENER SUBSTANZEN .....	- 21 -
TABELLE 2-3: ÜBERSICHT ÜBER WÄRMELEITFÄHIGKEITEN VON BÖDEN [29].....	- 23 -
TABELLE 3-1: ANWENDUNGSDATEN DER NICHTSTEUERBAREN VERFAHREN [26].....	- 39 -
TABELLE 3-2: ANWENDUNGSDATEN DER STEUERBAREN VERFAHREN [26].....	- 40 -
TABELLE 3-3: ANZAHL DER STUNDEN UND MITARBEITER JE ARBEITSVORGANG BEI VERSCHIEDENEN EINBRINGUNGSVERFAHREN ...	- 45 -
TABELLE 3-4: FLÄCHENBEDARF BEI VERSCHIEDENEN EINBRINGUNGSVERFAHREN.....	- 46 -
TABELLE 5-1: RANDBEDINGUNGEN „SOLE“ FÜR DIE NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN.....	- 56 -
TABELLE 5-2: RANDBEDINGUNGEN „LUFT“ FÜR DIE NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN.....	- 56 -
TABELLE 5-3: RANDBEDINGUNGEN „BODEN“ FÜR DIE NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN.....	- 57 -
TABELLE 5-4: RANDBEDINGUNGEN „ROHR“ FÜR DIE NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN .....	- 57 -
TABELLE 5-5: WERTE ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT VERSCHIEDENER BÖDEN .....	- 64 -
TABELLE 6-1: DATENBLATT KOLLEKTORROHR - 140 -[32] .....	- 82 -
TABELLE 7-1: GRENZABWEICHUNG PT 100 TEMPERATURFÜHLER .....	- 85 -
TABELLE 11-1: KOSTENÜBERSICHT DER UNTERSCHIEDLICHEN SYSTEME [3].....	- 135 -

---

## 1 Motivation, Hintergrund und Zielsetzung

### 1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung, Erprobung und Demonstration eines Verfahrens, mit dessen Hilfe Flächenkollektoren für Wärmepumpen installiert werden können, ohne dass das Erdreich auf der gesamten Fläche ausgehoben werden muss.

Der Flächenkollektor wird mit Hilfe eines Raktenschuss- bzw. eines Pressverfahrens in das Erdreich eingebracht. Diese Technologie der grabenlosen Rohrverlegung wird zum Beispiel für Wasser- und Gasleitungen seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Mit diesem Verfahren werden die Herstellkosten von Erdwärmekollektoren vorraussichtlich um mindestens 50 % gesenkt und die Markteinführung sowie der Ausbau neuer regenerativer und CO<sub>2</sub>-einparender Heizungstechnologien beschleunigt.

#### **Projektentwicklung:**

In diesem Vorhaben wird ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt auch Wärmeübertragerrohre mit grabenlosen Verfahren zu verlegen. Typische Materialien, Wandstärken und Durchmesser von Rohren für die Nutzung als Erdwärmekollektor unterscheiden sich deutlich von denen, die nach heutigem Stand der Technik im Rohrvortrieb für Wasser- und Gasrohre eingesetzt werden. Es muss daher eine geeignete Materialauswahl und Dimensionierung sowie die Erprobung dieser Auswahl erfolgen. Dazu müssen Prototypen geeigneter Werkzeuge für die Bodenverdrängung mit ungesteuerten Erdraketen sowie für das Pressverfahren konstruiert und erprobt werden.

Darüber hinaus werden Flächenkollektoren in der Regel in Sandbetten ausgelegt, so dass eine definierte Beschaffenheit des direkt umgebenden Erdreiches vorliegt. Aus der Installation im vorhandenen Erdreich nach dem Pressen eines Kanals können sich demnach später Veränderungen im Betrieb ergeben, die zu ermitteln sind (Spaltmaße der Verlegung, Verdichtung und Absetzung des Bodens, etc.).

### **Erprobung:**

Die Wärmeübertragungseigenschaften des installierten Rohres werden anhand einer Feldtestanlage untersucht und in regelmäßigen Abständen messtechnisch erfasst. So werden die verschiedenen Verfahren qualitativ beurteilt und miteinander verglichen. Ebenso werden verschiedene Beeinflussungen, wie zum Beispiel die zeitliche Veränderung des Wärmeübertragungsverhaltens über einen längeren Zeitraum durch Bodensetzung und ähnliche Effekte näher untersucht.

### **Demonstration:**

Die Funktion des Kollektors wurde an mehreren Wärmepumpenanlagen für die Einfamilienhaus (EFH)-Anwendung, die im Raum Berlin/Brandenburg und Essen installiert wurden, verifiziert. Die Kollektoren dieser Anlagen wurden mit dem neu entwickelten Verfahren installiert und messtechnisch über den Zeitraum eines Kalenderjahres untersucht.

---

## 1.2 Begründung des Forschungsvorhabens

Wärmepumpen stellen eine hoch effiziente und umweltschonende Möglichkeit dar, Wohn- und Gewerbeobjekte mit Raumwärme sowie mit Wärme zur Trinkwarmwasserbereitung zu versorgen. Neben den elektrisch betriebenen Wärmepumpen sind verstärkt auch Geräte in der Entwicklung/Erprobung bzw. bereits am Markt verfügbar, die mit Primärenergie (hier Erdgas) betrieben werden.

Ein wesentliches Kostenelement bei der Installation einer Wärmepumpenanlage ist in der Regel die Anlagenkomponente zur Einkopplung der regenerativen Umwärmequelle. Nach heutigem Stand der Technik stellt der erforderliche Aufwand bei der Verlegung einen deutliche Nachteil gegenüber Erdsonden (Tiefenbohrung) oder der Nutzung des Grundwassers dar. Auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpen, die ebenfalls mit Erdkollektoren betrieben werden können, stellen die hohen Installationskosten ggf. ein Hindernis dar. Beim Einsatz in Bestandsgebäuden ist der aufwendige Eingriff in die Fläche oft unerwünscht und teils undurchführbar (Erreichbarkeit der Fläche mit Baumaschinen, Möglichkeiten der Zwischenlagerung des Aushubs, Beschädigung bestehender Gartenanlagen etc.). Wärmepumpen werden dann alternativ mit anderen Wärmequellen (z. B. Luftkollektoren) betrieben, die jedoch energetisch auf eine geringere Effizienz führen und zusätzliche Lüfter benötigen. Dies führt langfristig zu höheren Betriebskosten und einem höheren Energieverbrauch. Das Potential zur CO<sub>2</sub>-Reduktion kann so nicht vollständig ausgeschöpft werden. Zum sinnvollen Einsatz der Wärmepumpentechnologie im Bestand ist daher ein System erforderlich, das auch unter weniger günstigen Randbedingungen zur Installation von Flächenkollektoren eingesetzt werden kann. Die deutlichen Unterschiede bei Durchmesser und Wandstärke der dabei verwendeten Materialien machen die unbesehene Nutzung bestehender Werkzeuge und Verfahren der grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen unmöglich. Wird der Flächenkollektor direkt in das Erdreich eingebracht, können sich gegenüber der heutigen Installation im Sandbett das Wärmeübertragungsverhalten sowie auch die Regenerationsfähigkeit des Bodens verändern. Diese Parameter müssen validiert werden. Der Einfluss einer Verdichtung des Erdreiches durch den Vortrieb der Rakten bzw. der Preßwerkzeuge muss ebenfalls analysiert und experimentell untersucht werden.

Dieses System kann insgesamt zu deutlich niedrigeren Installationskosten im Bestand sowie im Neubau führen. Der Einsatz der Wärmepumpentechnologie kann so nachhaltig gefördert werden.

---

### 1.3 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhabens

Die grabenlose Verlegung von Rohrleitungen ist heute ein anerkanntes Standardverfahren im Baugewerbe. So beschreiben zum Beispiel die DVGW-Merkblätter GW 304 und GW 312 verschiedene Verfahren des Rohrvortriebs. Dabei wird durch Verdrängen, Rammen, Bohren oder Pressen ein Hohlraum geschaffen, in den die Rohre eingezogen, eingeschoben oder eingepresst werden. Je nach erforderlicher Ziel- oder Lagegenauigkeit kommen steuerbare oder nichtsteuerbare Verfahren zum Einsatz.

Bei der Installation von Flächenkollektoren für den Einsatz von Wärmepumpen kommen nach heutigem Stand der Technik dagegen kaum innovative Verfahren zum Einsatz. Lediglich die Entwicklung sogenannter großvolumiger Kompaktabsorber hat die Verlegung der Kollektoren für Sole/Wasser-Systeme (mit separatem Verdampfer) vereinfacht. Für Direktverdampfer-Wärmepumpen, bei denen Kupferrohre mit Kunststoffummantelung verlegt werden, scheidet diese Vereinfachung allerdings aus.

Flächenkollektoren können nach heutigem Stand der Technik nur dann installiert werden, wenn die Erdboden-Deckschicht zuvor abgetragen wird. Für den Kollektor wird in etwa die gleiche bzw. die 1,5-fache Fläche benötigt, wie die zu beheizende Fläche im Gebäude. Die Entzugsleistung von etwa 35 W/m<sup>2</sup> entspricht annähernd dem Wärmebedarf pro m<sup>2</sup> eines Niedrigenergiehauses. Bei einer Verlegetiefe von rund 1 m bedeutet dies einen Aushub in einer Größenordnung von 100 m<sup>3</sup>, der während der Bauphase zwischengelagert werden muss.

Dabei entstehen Kosten für die Durchführung des Aushubs, den Einsatz eines Baggers, gegebenenfalls die Schaffung einer geeigneten Zuwegung und nicht zuletzt für das Verfüllen der kompletten Fläche mit dem zuvor ausgehobenen Erdreich. Zusätzlich erfordert diese Methode in jedem Fall die vollständige Neugestaltung des Gartens bzw. der betroffenen Fläche nach der Installation des Flächenkollektors.

Im Umfeld der Entwicklung alternativer Kollektoren zur Nutzung des Erdreichs sind in den vergangenen Jahren neue Geometrien erprobt worden. Hier sind besonders die so genannten Erdwärmekörbe zu nennen. Dabei handelt es sich um ein durchgehendes Rohr, das zylindrisch oder in Form eines Kegelstumpfes konisch gewickelt ist. Vorteil dieser Methode ist die hohe Energiedichte im Vergleich zum horizontalen Flächenkollektor. Allerdings erfordert die Installation der Körbe den

---

Einsatz großer Baumaschinen und den Aushub der einzelnen Löcher für die Körbe in ausreichender Tiefe. Diese ist mit 3 m bis 5 m deutlich aufwendiger und größer, als beim Flächenkollektor.

Die Forschungsarbeiten im Rahmen der Bauforschungsförderung haben sich in der Vergangenheit auf die Grundlagen der Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle sowie auf den Betrieb und die Anbindung von Wärmepumpenanlagen konzentriert. Eine vergleichbare Initiative zur Vereinfachung der Installation von Flächenkollektoren ist nicht bekannt.

#### **1.4 Forschungsansatz**

Das Forschungsvorhaben sieht vor, die bis heute als Stand der Technik anerkannten Methoden aus dem Bereich der oberflächennahen Erdwärmenutzung und der grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen in einem innovativen Verfahren zu kombinieren.

Mit der Technik des grabenlosen Rohrvortriebs zum Beispiel im Bodenverdrängungsverfahren können heute Bohrlängen von über 50 m realisiert werden. Damit wird es möglich, auch größere Kollektorflächen zu erschließen, ohne die gesamte Fläche ausheben zu müssen. Durch die Möglichkeit, entsprechend kleine Geräte zum Einsatz zu bringen (Ziel: max. 80 kg Gewicht, von 2 Personen zu bewegen), können Flächen erschlossen werden, die mit schwerem Gerät nicht erreichbar sind.

Durch die verstärkte Nutzung der Wärmepumpe werden Technologien gefördert, die eine besonders effiziente und CO<sub>2</sub>-arme Bereitstellung von Raumwärme und Wärme zur Trinkwassererwärmung ermöglichen. Diese Technologien sind aktuell vor allem auf Basis von Primärenergieträgern (zum Beispiel Erdgas) Thema der Forschung und Entwicklung.

## 2 Überblick und Bewertung oberflächennaher geothermischer Wärmequellen

### 2.1 Einführung in die Geothermie

Geothermie ist unter der Erdoberfläche gespeicherte Wärmeenergie: Im Tiefenbereich entstanden durch die Restwärme der Akkretion (Erdentstehung), aus radioaktiven Zerfallsprozessen der Erdkruste; im oberflächennahen Bereich im Wesentlichen durch die Sonneneinstrahlung sowie durch versickerndes Niederschlagswasser, welches einen verbesserten Wärmetransport durch höheren Wasserhaushalt im Boden bewirkt.

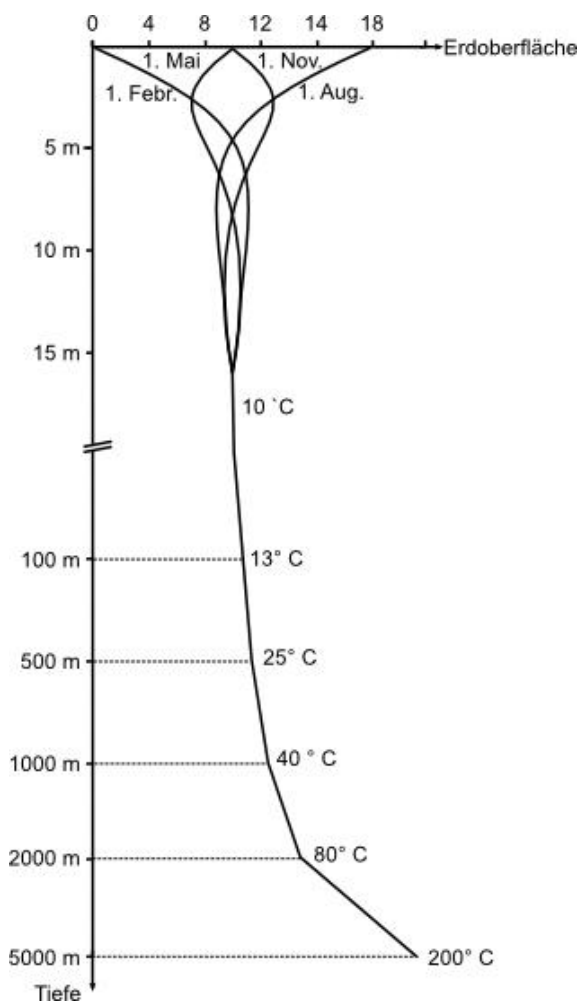


Abbildung 2-1: Exemplarischer Temperaturverlauf einer Erdoberfläche bis 5000m Tiefe [13]



---

Bei Betrachtung der in Abbildung 2-1 exemplarisch dargestellten Bodenuntergrundtemperaturen übers Jahr sind im Regelfall ab einer Tiefe von 15 m kaum nennenswerte Temperaturschwankungen festzustellen. Temperaturen von etwa 10 °C stellen sich je nach geologischen Gegebenheiten ein, die mit Tiefenzunahme pro 100 m um etwa 3 °C ansteigen (der sog. geologische Gradient). Hieraus folgt, dass im Winter höhere Temperaturen als an der Erdoberfläche herrschen und im Sommer geringere. Dies kann für Heiz- sowie Kühlzwecke genutzt werden. Die Erde ist im oberflächennahen Bereich hauptsächlich ein Speicher für Sonnenenergie. Der Wärmefluss aus dem Erdinneren spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Erdwärmesonden und Kollektoren sind die gängigsten Möglichkeiten, diese Wärme als regenerative Energiequelle zu erschließen. Aktuell steigt das Interesse von Hausbesitzern für diese Variante der Wärmeversorgung stark an. Eine Erdwärmeheizung ist anfänglich mit höheren Investitionskosten behaftet als eine konventionelle Heizanlage. Gegenüber einer Ölheizung ergeben sich, trotz des elektrischen Antriebs der Wärmepumpe, je nach Jahresarbeitszahl, um etwa 50 % geringere Betriebskosten und beim aktuellen Strommix eine um 40 % verringerte Emission von Kohlendioxid (JAZ von 3 angenommen) [6]. Grundsätzlich ist eine Erdwärmennutzung nahezu überall möglich. Einschränkungen sind bei bestimmten geologischen Vorkommnissen möglich, wie z. B. bei Anhydrit-Schichten, bei der die Gefahr der Erderhebung droht, sowie bei Beeinträchtigung des Grundwassers, hierbei sind das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die wasserrechtliche Regelung bzw. die jeweiligen Wassergesetze der Länder zu beachten.

---

## 2.2 Arten und Erschließung der Geothermie

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie, ihre Differenzierung wird zwischen den Tiefen zur Erschließung der geothermischen Quellen gemacht. Laut VDI-Richtlinie 4640 ist die Erdwärme bis zu einer Tiefe von 400 Metern oberflächennahe Geothermie [29].

Unter tiefer Geothermienutzung versteht man Bohrungen ab ca. 400 m bis ca. 5.000 m. Die tiefen Erdschichten weisen Temperaturen bis zu 200 °C auf und die anfallende Wärme des tiefen Untergrundes kann zu Heizzwecken sowie zur Stromerzeugung genutzt werden. Ihre Erschließung ist nur bei größeren Objekten wirtschaftlich vertretbar. Die zurzeit technisch möglichen und unter den in Deutschland gegebenen Randbedingungen vielversprechendsten Verfahren nach [62] sind:

- Erdwärmesonden in Tiefen von 400 m bis 2.000 m, wo Temperaturen von bis zu 70°C herrschen. Das in den Sonden zirkulierende Wasser erwärmt sich und kann an der Oberfläche zur Energiegewinnung für Heizung und Wassererwärmung genutzt werden. Das relativ hohe Energiepotenzial bedingt aber einen großen Wärmebedarf, wie z. B. Mehrfamilienhäuser, Bürokomplexe oder Schwimmbäder [62].
- Hydrothermale Geothermie: Mittels Tiefenbohrungen wird Thermalwasser erschlossen und an die Oberfläche gepumpt. Es wandelt sich durch die Druckentlastung beim Austritt an der Oberfläche in Dampf um, mit dem Turbinen angetrieben werden können. In der Dampfturbine werden ca. 40 % der thermischen Energie in mechanische bzw. elektrische Energie, umgewandelt, der Rest verbleibt als thermische Energie mit einer Wassertemperatur um 95°C. Hier ist es sinnvoll, mittels Wärmepumpen ein Wärmenetz zu erstellen, wodurch die Wärme letztendlich bis zu 10°C genutzt werden kann [62].
- Die Nutzung trockener Formationen nach dem sogenannten Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR): Wasser wird in den Untergrund gepresst, erwärmt sich am zerklüfteten Gestein und wird wieder an die Oberfläche gepumpt. Dort entzieht ein Wärmetauscher dem Wasser die Energie zur Strom- und Wärmeproduktion [62].

Oberflächennahe Geothermie umfasst eine Tiefe bis ca. 400 m und damit einen Temperaturbereich, der um ca. 20°C über der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche liegt (max. 40°C). Diese vorhandene Wärme reicht nicht aus, um Brauchwasser zu erwärmen oder zu heizen, hier ist ggf. der Einsatz von Wärmepumpen erforderlich.

---

Die Erdwärme wird mittels verschiedener Möglichkeiten technisch verfügbar gemacht:

- Als Erdwärmekollektoren bezeichnet man horizontal verlegte Kunststoff-Rohrsysteme in einer Tiefe zwischen 1,2 und 2,0 m. Der hier verwendete Wärmeträger ist Sole oder ein Kältemittel. Für den Einsatz von Erdwärmekollektoren sind ausreichende Flächen erforderlich. Es gibt Sonderformen mit kompakten Kollektoren, z. B. Graben, Spiralen.
- Erdwärmesonden ermöglichen eine Erdwärmenutzung im Bereich von 8–200 m Tiefe. Hierbei handelt es sich um geschlossene Rohrsysteme, die meist vertikal, seltener in schräg angelegten Bohrlöchern installiert werden. Ein Wasser-/Frostschutz-Gemisch zirkuliert und entzieht dem umgebenden Gestein die Wärme. Erdwärmesonden benötigen wenig Platz und zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Die Materialien der Rohrsysteme sind Kunststoff oder Stahl.
- Energiepfähle sind Gründungspfähle mit Wärmetauscherrohren, einsetzbar in Tiefen von 8 bis 45 m. Als Wärmeträger verwendet man Sole oder Wasser. Bei den Energiepfählen hat die statische Funktion der Gebäude Vorrang.
- Koaxialbrunnen werden auch als „offene Erdwärmesonden“ bezeichnet. Von Vorteil ist der Einsatz in Tiefen von 120 bis 200 m, nachteilig wirken sich die hohen Bohrkosten und leichte Überlastung aus.
- Wärme lässt sich auch über Grundwasserbrunnen direkt entziehen, möglich sind Tiefen von 4 bis 50 m. Das Grundwasser wird über einen oder mehrere Brunnen gefördert, dem Wasser wird die Wärme entzogen und es wird über Schluckbrunnen wieder in den Untergrund geleitet. Wichtig ist die Beachtung der Hydrochemie: das Grundwasser darf keine hohen Eisen- und Mangan-Gehalte aufweisen, da sonst die Gefahr einer Verockerung der Brunnenanlage besteht [62].

Die zu wählende Variante richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen und ist durch Einzelfalluntersuchung zu bestimmen [62].

Mit Hilfe von Wärmepumpen wird nun die in der Erde auf niedrigem Temperaturniveau natürlich gespeicherte Energie in ihrem Temperaturniveau angehoben. Damit lassen sich Niedrigtemperaturanlagen für Heizungen und Brauchwassererwärmung betreiben, wie sie zu 90 % in Privathaushalten und von Kleinverbrauchern verwendet werden [62].

---

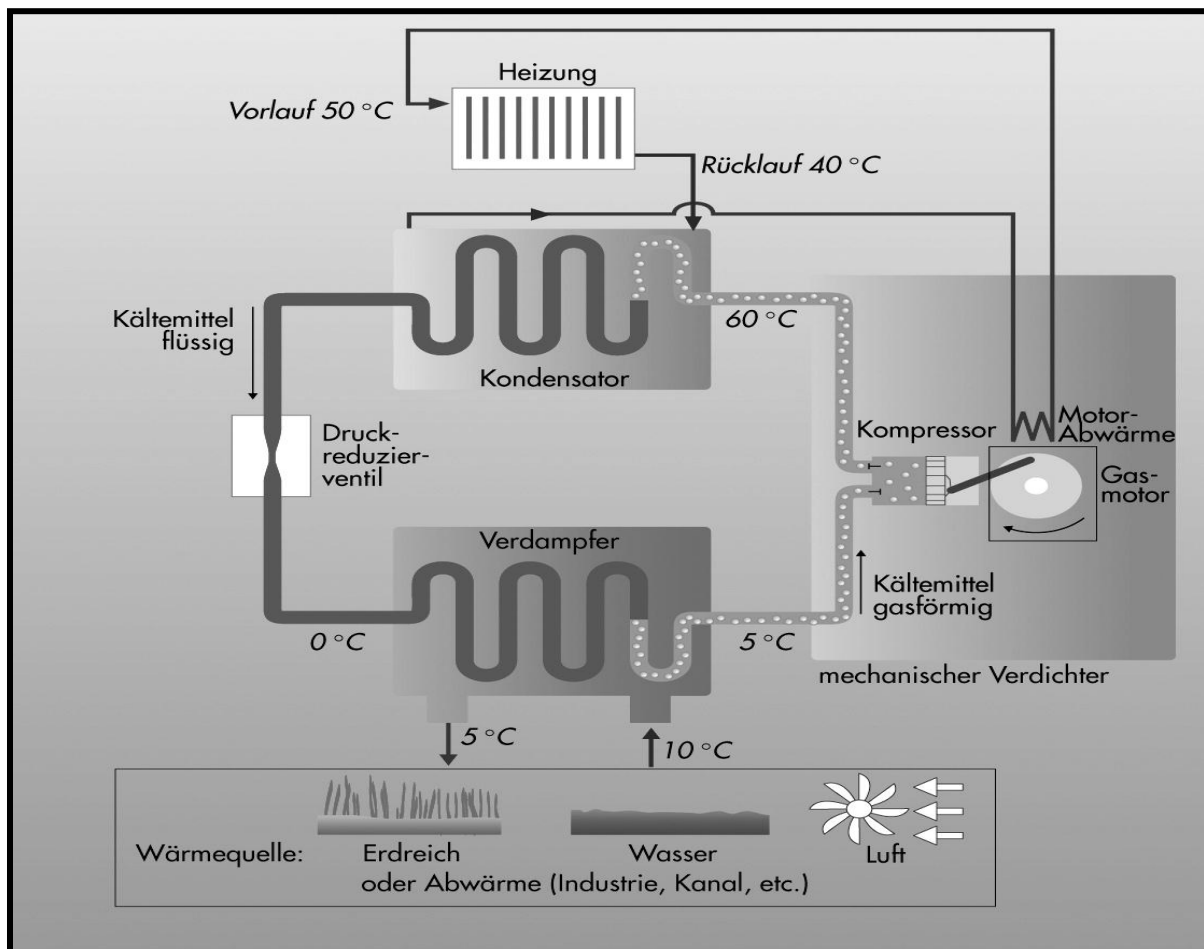
Geothermische Energie kann sowohl in einzelnen Objekten (kleineren wie z. B. Eigenheimen oder größeren wie z. B. Schwimmhallen, Gewächshäusern, Mehrfamilienhäusern) als auch zur Versorgung größerer Siedlungen, ganzer Städte, von Gewerbe- und Industriegebieten, Werkhallen oder Bürokomplexen eingesetzt werden. In letzter Zeit werden vermehrt komplette Neubaugebiete mit Energie aus der Tiefe beheizt - Beispiele dafür finden sich in Werne, Vlotho-Exter oder in Herford. Ausschlaggebend sind die örtlichen geologischen Gegebenheiten, dem Erdwärmeangebot und dessen Erschließbarkeit. In Deutschland sind (Stand 1999) knapp 400 MWh in geothermischen Anlagen installiert, davon ca. 340 MWh in kleinen dezentralen Systemen unter 100 kW, der Rest in geothermischen Heizzentralen mit einer installierten Leistung zwischen 100 kW und 20 MW, derzeit 24 Anlagen [62].

---

### 2.3 Wärmepumpentechnik

Im Jahre 1852 entdeckte William Thomson das thermodynamische Phänomen, dass sich Gase bei der Kompression erwärmen und bei der Expansion abkühlen. Diese physikalische Eigenschaft bildet die Grundlage einer Wärmepumpe (WP), hierbei wird eine Temperatur mittels Zufuhr von technischer Arbeit auf ein höheres Energie- bzw. Temperaturniveau „gepumpt“. Eine WP funktioniert nach dem umgekehrten Prinzip eines Kältschranks. Eine Flüssigkeit mit einem niedrigen Siedepunkt, das sogenannte Kältemittel, wird durch einen Kreislauf geführt und dort nacheinander verdampft, verdichtet, verflüssigt und entspannt.

In der Abbildung 2-2 ist dargestellt, wie die Umweltwärme dem Verdampfer zugeführt wird, wo sie auf das Arbeitsmedium (Kältemittel) der WP übertragen wird. Dabei geht dieses Medium in den dampfförmigen Zustand über. Im Kompressor wird der Dampf komprimiert und dadurch erwärmt. Diese Wärme wird zum Teil bereits in den Heizkreislauf abgegeben. Im Kondensator gibt der heiße Dampf seine Wärme an den Wasserkreislauf des Heizsystems ab. Im Expansionsventil wird der Druck abgebaut und der Prozess beginnt von vorn. Der Kompressor kann wie hier dargestellt als Hubverdichter ausgeführt sein, als Scroll- oder Rollkolbenverdichter, dabei sind Drücke von bis zu 20 bar keine Seltenheit. Als Antriebsarten sind im Regelfall Elektromotoren eingesetzt, Gas, wie in Abbildung 2-2 zu sehen, findet aktuell noch selten Verwendung. Der Antrieb mit Diesel wird eher als Exot betrachtet und wird in der Praxis sehr selten verwendet.



**Abbildung 2-2: Funktionsschema einer Erdwärmeheizung mit Wärmepumpe [2]**

Eine bisher weniger oft eingesetzte Wärmepumpentechnologie und bisher ausschließlich im Industriebereich angewendete, ist neben der bisher aufgeführten Kompressionswärmepumpe die so genannte Sorptionswärmepumpe. Mittlerweile hat diese Technologie auch im Segment der Hausenergieversorgung Einzug gehalten. Hierbei funktioniert die Temperaturerhöhung nicht mittels mechanischen Verdichters, sondern mit einem Thermoverdichter bzw. Austreiber. Allein die Zufuhr von Wärme setzt den Kreisprozess durch Dichte- und Konzentrationsunterschiede in Bewegung bzw. sorgt für die De- und Absorptionsvorgänge.

Physikalische Grundlage ist der in Abbildung 2-3 dargestellte Carnot-Kreisprozess.

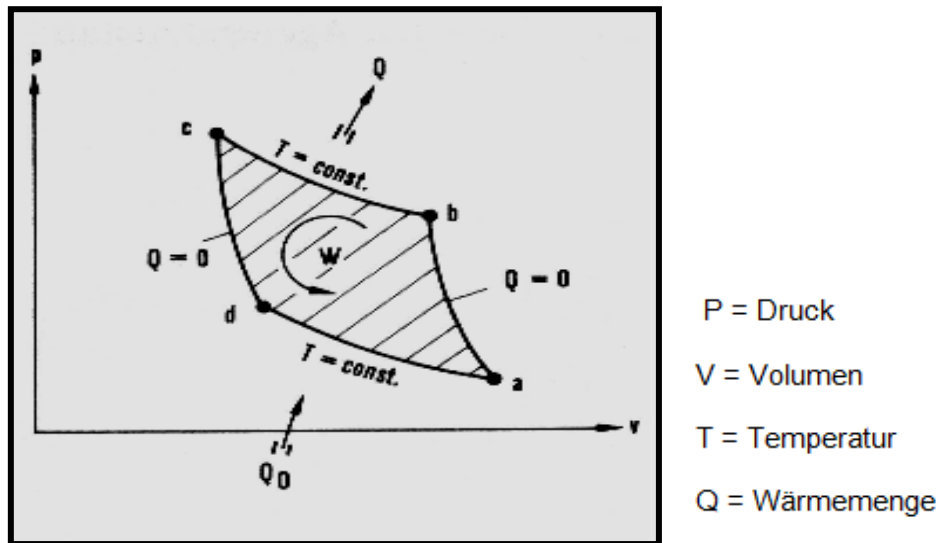


Abbildung 2-3: Darstellung des linksläufigen Kreisprozesses nach Carnot [9]

Ab Punkt a wird der Dampf adiabatisch verdichtet, hierbei steigt der Druck an. Von Punkt b nach c bleibt die Temperatur konstant (isotherm) und der Dampf verflüssigt sich, dabei wird die Wärmemenge  $Q$  abgegeben. Darauf folgt ab c nach d eine Entspannung ohne Wärmeaufnahme (adiabatisch) und Verflüssigung des Arbeitsmittels. Von d nach a erfolgt eine Wärmeaufnahme bei konstanter Temperatur (isotherm). Das Arbeitsmittel beginnt zu siedeln und zu verdampfen. Der Zyklus beginnt erneut (Kreisprozess).

Die abgegebene Wärme  $Q$  ist hierbei die Summe aus der aufgenommenen Wärme  $Q_0$  und der äußeren Arbeit  $W$ :

$$Q = Q_0 + W \quad (2.1)$$

Die Effektivität einer Anlage wird durch die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschrieben. Diese gibt das Verhältnis zwischen bereitgestellter Wärme und zugeführter Energie an, die umso günstiger ausfällt, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen zugeführter Umweltwärme und dem Vorlauf der Raumheizung ist. Darum eignen sich für WP-Anlagen besonders Fußbodenheizungen, da ihre Vorlauftemperatur bei nur ca. 35 °C liegt. Radiatoren benötigen mindestens 60 °C für eine ausreichende Beheizung. Aufgrund der jahreszeitlichen und tageszeitlichen

---

Temperaturschwankungen wird der Bezug der JAZ auf das Mittel des ganzen Jahres aufgestellt. Hersteller geben die JAZ auf Basis idealisierter Bedingungen an, die in der Praxis kaum zu realisieren sind. Bei Verwendung von Grundwasser oder Erdreich als Wärmequelle können üblicherweise Arbeitszahlen > 3, in günstigen Fällen auch > 4 erreicht werden. Arbeitszahlen < 3 sind ökologisch und auch ökonomisch nicht sinnvoll, da der Wärmegewinn durch einen hohen Stromverbrauch (Elektrowärmepumpe) erkaufte werden muss. WP mit Luft als Wärmequelle sind daher nur in Ausnahmefällen zweckmäßig einzusetzen. Seit dem 1. April 2008 ist z. B. im §3 des „Erneuerbaren-Energien-Wärme-Gesetzes EEWärmeG“ in Baden-Württemberg eine gesetzliche JAZ von mindestens 3,5 für elektrische Wärmepumpen vorgeschrieben.

Vereinfacht kann diese wie folgt berechnet werden:

$$\beta = \frac{Q}{P_{elek}} \quad (2.2)$$

Näheres ist der VDI 4650-2 zu entnehmen.

Durch die unterschiedlichen Wärmequellen lassen sich die Wärmepumpensysteme in drei Gruppen einteilen:

**Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen** entziehen mittels eines Luftkühlers der Außenluft Wärme. Da Luft überall in ausreichender Menge vorhanden ist, entfällt eine aufwendige Erschließung. Nachteilig ist jedoch, dass bei sinkender Außenlufttemperatur die Effizienz abnimmt, somit ist von einer monovalenten Betriebsweise abzusehen.

**Wasser/Wasser-Wärmepumpensysteme** nutzen die im Grundwasser oder in Oberflächengewässer gespeicherte Wärme und stellen damit das effektivste System dar, jedoch ist es an wenigen Stellen realisierbar, aufgrund der seltenen geologischen bzw. hydrologischen Gegebenheiten, der strengen Wasserhaushaltsgesetze (WHG) und der wasserrechtlichen Regelung.

**Sole/Wasser-Wärmepumpen** nutzen die im Erdreich gespeicherte Wärme. Als Wärmeübertrager dienen im Erdreich verlegte Rohre durch die ein Wärmeträger, meist ein Wasser/Glykol-Gemisch,



---

auch Wärmepumpensole genannt (kurz Sole), strömt. Dies ist das gängigste System mit den vielfältigsten Anwendungsmöglichkeiten.

Die Betriebsweisen von Wärmepumpen können in fünf Arten differenziert werden.

Bei der **monovalenten Betriebsform** ist die Wärmepumpe alleiniger Heizwärmeerzeuger im Gebäude. Diese Betriebsart ist geeignet für alle Niedertemperatur-Heizungen bis max. 65 °C Vorlauftemperatur.

Die **monoenergetische Betriebsform** benötigt das Heizsystem keinen zusätzlichen Energieträger mehr. Die Luft/Wasser-Wärmepumpe arbeitet bis zu einer Außentemperatur von -18 °C mit Außenluft, zusätzlich schaltet sich bei Bedarf bei tiefen Außentemperaturen eine Zusatzheizung ein. Im Fall einer Elektrowärmepumpe folglich eine zusätzliche Elektroheizung.

Bei der **Bivalent-Alternative** liefert die Wärmepumpe bis zu einer festgelegten Außentemperatur (z. B. 0 °C) die gesamte Heizwärme. Sinkt die Temperatur unter diesen Wert, schaltet sich die Wärmepumpe ab und der zweite Wärmeerzeuger übernimmt die Heizung. Für alle Heizungssysteme bis max. 95 °C Vorlauftemperatur ist diese Betriebsart möglich.

Bei der **bivalent-parallelen** Form erzeugt die Wärmepumpe bis zu einer bestimmten Außentemperatur die Wärme allein und erst bei dessen Unterschreitung schaltet sich der zweite Wärmeerzeuger zu. Im Gegensatz zum bivalent-alternativen Betrieb ist jedoch der Anteil der Wärmepumpe an der Jahresleistung größer. Diese Betriebsweise ist für Heizungssysteme bis max. 65 °C Vorlauftemperatur geeignet.

Die **bivalent-teilparallele** Form, wird bis zu einer bestimmten Temperatur mit der Wärme einer Wärmepumpe versorgt und bekommt bei Unterschreitung eines Schwellenwertes eine zweite Wärmequelle dazu geschaltet. Reicht die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe nicht mehr aus, wird die Wärmepumpe abgeschaltet. Der zweite Wärmeerzeuger übernimmt die volle Heizleistung. Diese Betriebsart ist für alle Heizsysteme über 65 °C Vorlauftemperatur geeignet.

## 2.4 Geothermische Aspekte des Bodens

Unter dem Begriff „Boden“ versteht man die oberste, von Organismen besiedelte, Verwitterungsschicht der festen Erdrinde. Diese besteht zu 50 % aus festen Bestandteilen, wie z. B. grobem Gestein, Kies, Sand, Lehm, Ton usw. Davon sind 90–98 % des festen Bodenmaterials anorganische, d. h. mineralische Bestandteile, die verbleibenden 2–10 % des festen Bodens sind tote organische Bestandteile des festen Bodens; davon sind 85 % tote organische Substanzen (Humus). Dieser ist entstanden bei der Zersetzung von abgestorbenen Lebewesen und wird selbst wiederum zur Lebensgrundlage der Pflanzen, sowie 15 % lebenden Organismen. Die restlichen 50 % des Bodens sind Hohlräume, welche zu 0–35 % mit atmosphärischer Luft bzw. Gasgemischen und zu 20–50 % mit Wasser bzw. Bodenlösungen gefüllt sind. Mit Hilfe dieses Porensystems wird der Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt des Bodens geregelt. In der Erdschicht sind Nährstoffe gebunden, welche bei Bedarf wieder an das Bodenwasser abgegeben werden. Wegen ihrer Mischung, aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen, werden Böden auch als Drei-Phasen-System bezeichnet [63].

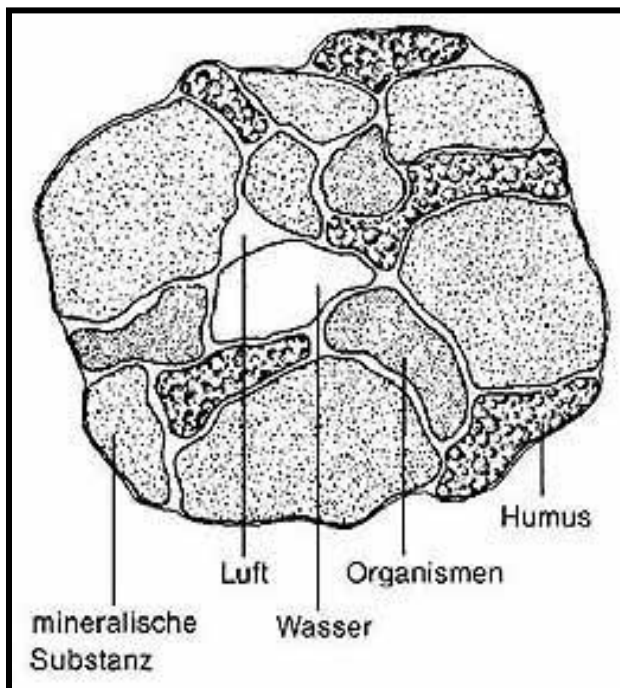


Abbildung 2-4: Bestandteile des Bodens [28]

Der Boden, in der Form und Zusammensetzung wie er heute existiert, ist im Verlaufe von Jahrtausenden entstanden. Er kann kurzfristig weder ersetzt noch erneuert werden [16]. Die DIN EN 18300 teilt Böden nach Löslichkeitsklassen in 7 allgemein gültige Klassen ein:

- 1 Oberboden Humus: Oberste Schicht des Bodens (Mutterboden)
- 2 Fließende Bodenarten: Boden mit relativ hohem Wassergehalt (flüssig bis zähflüssig)
- 3 Leicht lösbare Böden: Sand- und Kiesboden mit geringem Steinanteil (Anteil < 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
- 4 Mittelschwer lösbare Böden: Leichte bis mittlere Plastizität, ineinander gebunden, mit geringem Steinanteil (Anteil < 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
- 5 Schwer lösbare Böden: Bodenklasse 3 und 4 mit einem großen Steinanteil (Anteil > 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
- 6 Leicht lösbarer Fels und ähnliche Bodenarten: Felsiger Boden, jedoch brüchig, zerklüftet, weich oder verwittert, sowie ähnlich ineinander verfestigte Bodenarten
- 7 Schwer lösbarer Fels: felsiger Boden mit einem festem Gefüge, wenig zerklüftet, brüchig oder verwittert

Dabei werden folgende Erdarten nach ihren Korngrößen unterschieden:

Kies	>	2 mm
Sand	=	2 mm – 0,06 mm
Schluff	=	0,06 mm – 0,002 mm
Ton	<	0,002 mm

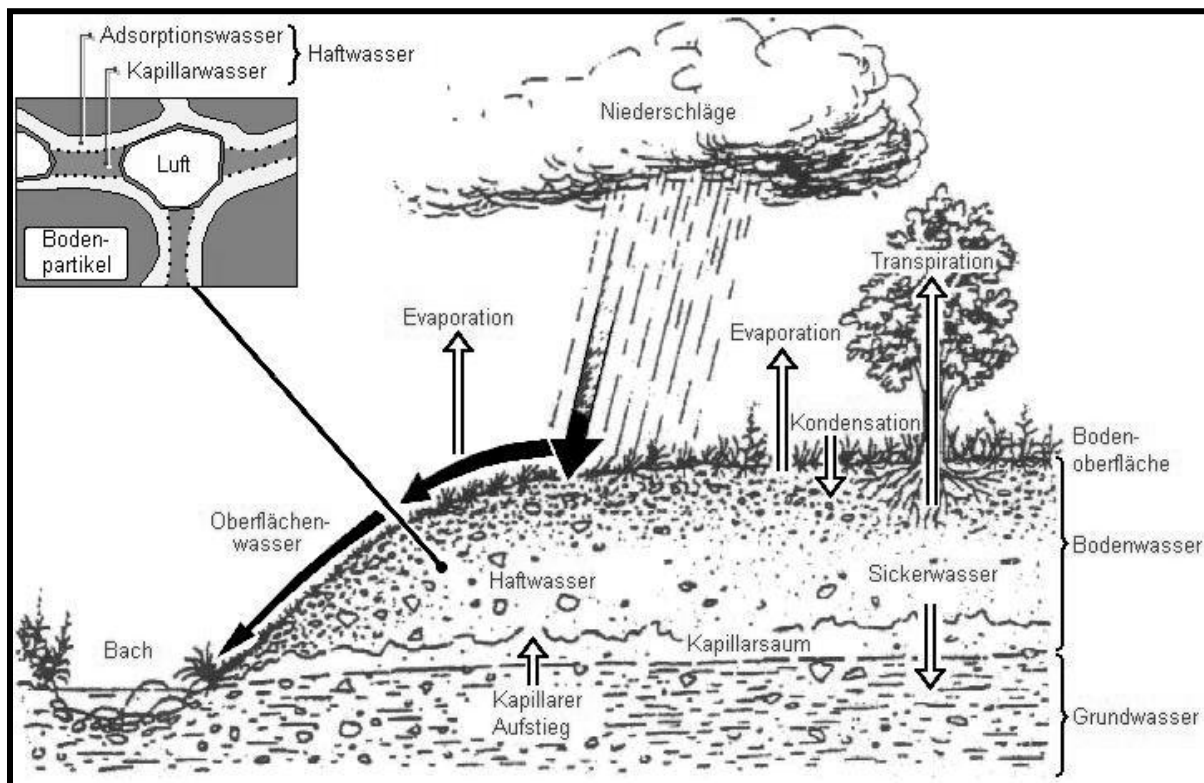
Die Hohlräume zwischen den festen Bodenpartikeln sind, sofern sie kein Wasser enthalten, mit Luft gefüllt (Ausnahme: Kapillarwasser). Sie bilden den gasförmigen Teil des Bodens. Diese Luftbestandteile in den Hohlräumen stehen entweder mit der Atmosphäre in Kontakt oder sind von Festteilchen und Wasser eingeschlossen. Sie können z. B. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Stickstoff (N<sub>2</sub>), Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) enthalten. Die Verteilung der Gase in der Luft weicht stark von der Zusammensetzung der Gase im Boden ab. In den Böden befindet sich deutlich mehr CO<sub>2</sub> als in der Atmosphäre. In der Tiefe sind die Gehalte von CO<sub>2</sub> deutlich höher, der O<sub>2</sub>-Gehalt nimmt dagegen um etwa den gleichen Faktor ab. Der hohe Anteil von Kohlenstoffdioxid entsteht durch die Wurzelatmung der Pflanzen, Atmung der Bodentiere und der Stoffwechsellvorgänge [16].

**Tabelle 2-1: Bestandteile der Luft und des Bodens**

<b>Bestandteile der Luft</b>	<b>In Atmosphärenluft</b>	<b>In Bodenluft</b>
Stickstoff	78%	78%
Sauerstoff	21%	18% bis 20%
Kohlenstoffdioxid	0,03%	bis 2%
Andere	0,97%	0,97%

Zwischen Boden- und Atmosphärenluft findet ein permanenter Gasaustausch statt, welcher als „Bodenatmung“ bezeichnet wird. Mit dem Verlauf der Jahreszeiten hängen ständige Veränderungen der Gasgehalte zusammen, die durch die Zu- bzw. Abnahme der Wassergehalte stattfinden. Im Frühjahr sind die Wassergehalte relativ hoch, um im Laufe des Jahres durch die Vegetationsentwicklung abzunehmen, analog dazu nimmt der Luftgehalt zu. Die Gasphase, die auch in tieferen Schichten der Erde vorzufinden sind, liegt meist in von Wasser eingeschlossenen Blasen (siehe Kapillarwasser), in wassergelöster Form, vor. Dabei spielt Diffusion eine große Rolle. Sauerstoff ( $O_2$ ) diffundiert aus der Atmosphäre in den Boden und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) aus dem Boden in die Atmosphäre. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Konzentration des Sauerstoffes, wobei sie beim Kohlenstoffdioxid steigt [24].

Bodenwasser ist die flüssige Komponente der Bodenbestandteile. Es handelt sich dabei um eine wässrige Lösung oder Suspension, in der Bestandteile aus der Atmosphäre, die durch direkte oder indirekte atmosphärische Niederschläge eingetragen werden und Bestandteile aus der Bodenmatrix (= die festen Bestandteile des Bodens) enthalten sind. Das in den Boden eindringende Niederschlags- und / oder Kondensationswasser verbleibt, je nach Bodengegebenheit, entweder als Haftwasser im Boden oder durchfließt ihn als Sickerwasser, Grundwasser oder Stauwasser.



**Abbildung 2-5: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser [25]**

Sickerwasser ist frei bewegliches Wasser, welches sich unter Einwirkung der Schwerkraft abwärts bewegt und nach Niederschlägen innerhalb weniger Tagen tiefere Bodenhorizonte bzw. den Untergrund (das Grundwasser) erreicht. Grundwasser ist unterirdisches Wasser, das die Hohlräume (z. B.: Poren, Haarrisse oder Klüfte) der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsrichtung durch die Schwerkraft bestimmt wird. Stauwasser ist eine Wasseransammlung, die sich auf undurchlässigen oder wenig durchlässigen Sohlen befindetet, z. B. verdichteter Horizont. Das Sickerwasser bildet das Grund- oder Stauwasser. Das Haftwasser setzt sich zusammen aus dem Adsorptionswasser, das gegen die Schwerkraft an den Oberflächen fester Bodenpartikel festgehalten wird, und aus dem Kapillarwasser, das in Kapillaren und Poren gebunden wird. Verluste des Haftwassers durch Transpiration der Pflanzen und Evaporation (Verdunstung) von Bodenoberflächen können durch kapillaren Aufstieg von Grund- und Stauwasser wieder ergänzt werden. Die Verteilung der Niederschläge und des Bodenwassers ist in der Abbildung 2-5 dargestellt.

Die Bodentemperatur resultiert aus der im Boden gespeicherten Wärmeenergie, die aus den stark schwankenden Faktoren von Wärmezufuhr und Wärmeverlusten, sowie Wärmekapazität und

Leitfähigkeit resultiert [25]. Dabei erfolgt die Wärmezufuhr des Bodens durch Niederschläge, Schmelzwasser und größtenteils durch Sonneneinstrahlung (elektromagnetische Welle), deren Intensität von den Absorptions- und Reflexionsverhalten der Bodenoberfläche abhängig ist. Beeinflusst durch seine Oberflächenstruktur (rau oder glatt) und seine stoffliche Zusammensetzung (mineralisch oder organisch), die Färbung (hell oder dunkel), den Bodenfeuchtegehalt, sowie Art und Grad der Bodenbedeckung. Die Sonnenstrahlung wirkt umso stärker auf die Erdoberfläche, je steiler der Strahlungseinfall und je kürzer der Weg der Strahlung durch die absorbierende Atmosphäre ist. In der Mittagszeit erreicht sie daher ihr Maximum. Trotz verdeckter Sonne gelangt Sonnenstrahlung zur Erdoberfläche, es sind die Strahlen, die von Wolken und Luftpartikeln gestreut werden. Zum weiteren gelangt Energie durch die langwellige Eigenstrahlung der Atmosphäre zur Erdoberfläche, die umso stärker ist, je wärmer die Atmosphäre ist und je höher die Konzentrationen der drei Gase Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Ozon sind. Das Verhältnis zwischen eingestrahelter und reflektierter Sonnenenergie wird als Albedo bezeichnet und wird in % der einfallenden Strahlung ausgedrückt. Je weniger Strahlung reflektiert wird, desto höher ist die Wärmeabsorption. So ist die Albedo von unbewachsenen (dunkel gefärbten) Ackerflächen sehr gering, so dass nur etwa 10–20 % der Einstrahlung reflektiert werden. Nach Messungen von Jaeger, Kessler, Garte [19] konnte ermittelt werden, dass eine Rasenoberfläche einen mittleren Albedowert von 21,6 % und ein Kiefernwald von 10,1 % besitzt. Entsprechend geringer muss die Absorption von Strahlungsenergie durch die Rasenoberfläche sein. Die Albedowerte von natürlichen und künstlichen Oberflächen variieren zwischen Werten kleiner 10 % (Wasseroberfläche) und 90 % (Schnee). Grundsätzlich absorbiert eine dunkle Bodenoberfläche mehr Strahlung als eine helle und nimmt damit mehr Wärme auf. Umgekehrt ist eine helle Oberfläche mit einer hohen Strahlungsreflexion und entsprechend geringer Wärmeaufnahme verbunden. Der Boden verliert Wärme durch den Verlust an Verdunstungswärme, der so genannten Evaporation und aus der Wärmeabstrahlung von der Bodenoberfläche. Die Wärmeverluste sind von der Wärmezufuhr vom Tagesverlauf abhängig und werden durch den Wasserzustand des Bodens, Bodenfarbe und Bodenbedeckung beeinflusst.

Die Wärmekapazität  $C$  ist ein Begriff aus der Thermodynamik und bezeichnet, wie viel Wärme  $\Delta Q$  ein Körper, in diesem Fall der Boden, pro Temperaturänderung  $\Delta T$  speichern kann.

Folgende Gleichung beschreibt die Wärmekapazität:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.3)$$

Dabei ist die Wärmekapazität C das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  (bei konstanten Druck) und der Masse m.

$$C = m \cdot c_p \quad (2.4)$$

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Anhand der Gleichung 2.5 kann abgeleitet werden, dass die Wärme Q der Masse m proportional ist, das heißt, vergrößert sich die Masse m, wird auch der Betrag der Wärme, der vom Erdreich aufgenommen werden kann, größer. Mit seiner großen Masse ist somit das Erdreich ein idealer Speicher von Wärme. Des Weiteren fließt auch die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  proportional ein und ist somit ebenso wichtig. Die spezifischen Wärmekapazitäten in Tabelle 2-2 zeigen, das Wasser den mit Abstand größten Einfluss auf den Bodens ausübt, sie ist zum Beispiel mehr als viermal so hoch wie bei Luft oder gar Quarz.

**Tabelle 2-2: spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Substanzen [64]**

Substanz (bei 20 °C)	spezifische Wärmekapazität $c_p$ in J / kg * K
Wasser	4182
Organische Substanzen	ca.1300
Luft	1005
Quarz	744

Die Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von den Temperaturen ist in Abbildung 2-6 am Beispiel des Wassers dargestellt.

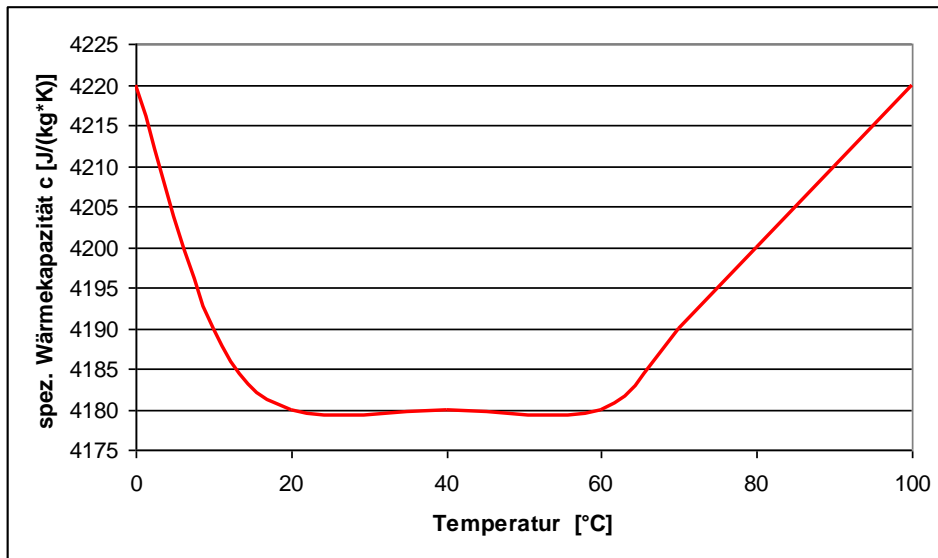


Abbildung 2-6: spez. Wärmekapazität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur [64]

In Abbildung 2-7 ist die Wärmekapazität  $[c_p]$  von Sand, Lehm und Ton in Abhängigkeit der Feuchtigkeit dargestellt.

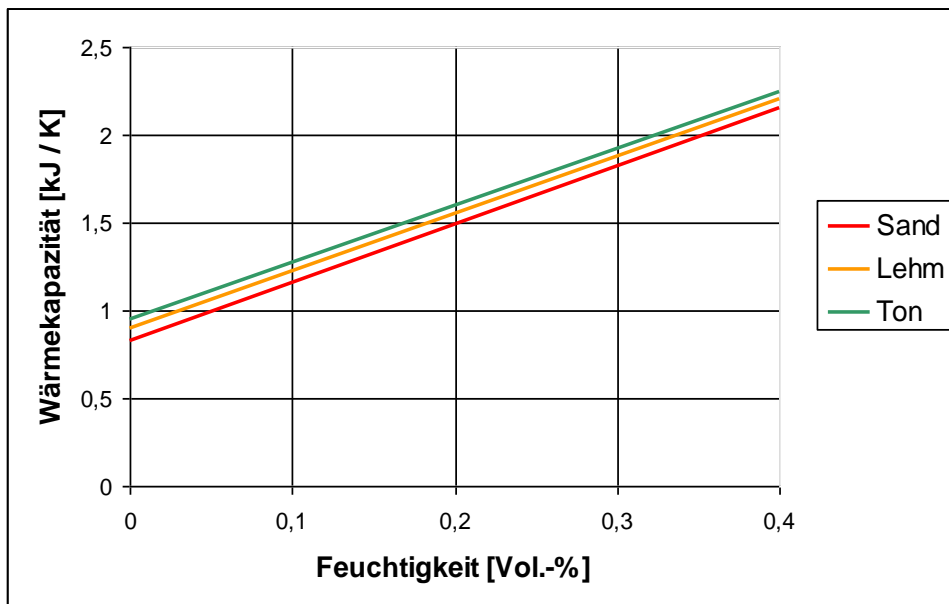


Abbildung 2-7: Wärmekapazität in Abhängigkeit der Feuchtigkeit [21]



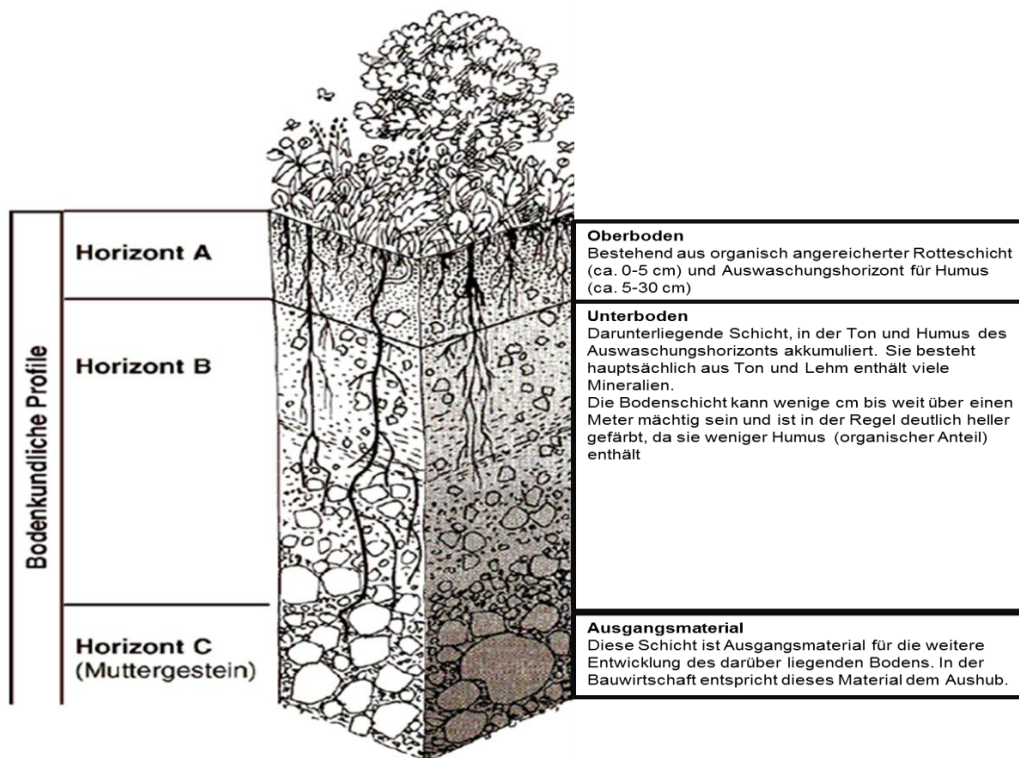
Ein weiterer Stoffwert ist die Wärmeleitfähigkeit. Molekularer Wärmetransport wird durch eben diese und den Temperaturgradienten beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens wird durch die Anteile und die räumliche Verteilung von Wasser und Feststoffen beeinflusst. Trockene organische Substanz hat eine kleinere Wärmeleitfähigkeit als z. B. Kies, da organische Böden große Porenanteile besitzen und damit geringe Substanzanteile haben. Im trockenen Zustand geht der Wert gegen den der Luft, steigt aber bei zunehmendem Wassergehalt erheblich an (siehe dazu auch Abbildung 2-7). Bewegungsvorgänge im Erdreich beeinflussen zudem diese Veränderungen dadurch, dass die Zahl der „Korn zu Korn Kontakte“ sich verkleinert oder vergrößert. Die Wärmeleitfähigkeit wird somit hauptsächlich durch den Luftgehalt bestimmt, da die Leitfähigkeit von Luft sehr gering ist und isolierend wirkt.

In Tabelle 2-3 ist eine Übersicht aus der VDI 4640 für die Wärmeleitfähigkeit von Böden dargestellt.

**Tabelle 2-3: Übersicht über Wärmeleitfähigkeiten von Böden [29]**

Bodenart/Substanz	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	
	in W / m * K	Typischer Rechenwert
Sand, trocken	0,3 bis 0,8	0,4
Sand, wassergesättigt	1,7 bis 5,0	2,4
Kies, trocken	0,4 bis 0,5	0,4
Kies, wassergesättigt	ca. 1,8	1,8
Ton/Schluff	0,4 bis 1,0	0,5
Ton/Schluff, wassergesättigt	0,9 bis 2,3	1,7
Torf	0,2 bis 0,7	0,4
Luft	0,0261	0,03
Wasser	0,58	0,6

Die Abbildung 2-8 zeigt beispielhaft den Aufbau eines typischen Bodens. Flächenkollektoren werden zumeist unter der Frostgrenze in einer Tiefe von etwa 1,2 m verlegt. Hier findet man oft ein Gemisch zwischen den Horizonten B und C, welche je nach Beschaffenheit unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen.



**Abbildung 2-8:Typischer Schichtenaufbau Erdboden [33]**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der „Wärmehaushalt“ im oberflächennahen Bereich abhängig ist von der Sonneneinstrahlung als Energiequelle und den Niederschlagstemperaturen (Schmelzwasser im Frühjahr), sonstige Quellen können vernachlässigt werden, wie z. B. biologische Aktivitäten oder geothermische Wärmequellen (bezogen auf den Mitteleuropäischen Raum). Die Menge und die Intensität der Sonneneinstrahlung sind abhängig von der geographischen Breite, Bewölkungshäufigkeit, Höhenlage, sowie der Hanglage (Inklination) und seiner Ausrichtung auf eine bestimmte Himmelsrichtung (Exposition). Darüber hinaus spielen das Absorptionsverhalten der Bodenoberfläche, die Phasenzusammensetzung des Bodenkörpers, sein Wassergehalt und die davon abhängige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität eine Rolle. Die Bodentemperatur unterliegt periodischen Schwankungen abhängig vom Tages- und Jahresverlauf, hierbei liegen die Höchstwerte in den Mittagszeiten und in den Sommermonaten. Da die Schwankungen der Tagesverläufe

größtenteils auf den Oberboden wirken, ist der Oberboden stärker geprägt als der Unterboden. Trockene Böden erwärmen sich schneller als feuchte Böden. Jedoch können feuchte Böden die Wärme besser speichern und kühlen entsprechend langsamer aus. Die Sonneneinstrahlung erwärmt den Boden mit seinen darunter liegenden Schichten, gleichzeitig findet auch eine permanente Wärmeabstrahlung statt, welches eine sich ständig ändernde Temperatur zur Folge hat. Die Temperaturänderungen sind in der Abbildung 2-10 vom Monat August im Tagesverlauf beispielhaft dargestellt sowie in der Abbildung 2-9 im Jahresverlauf.

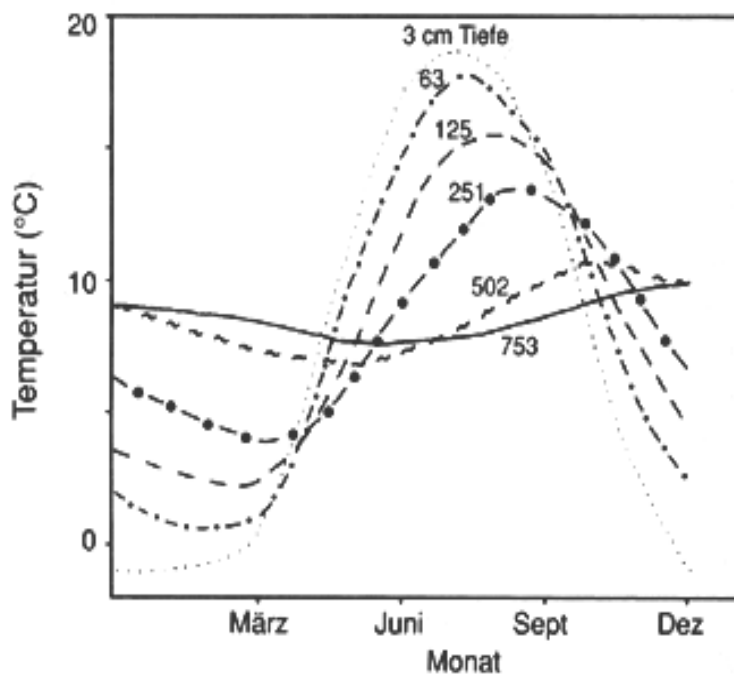
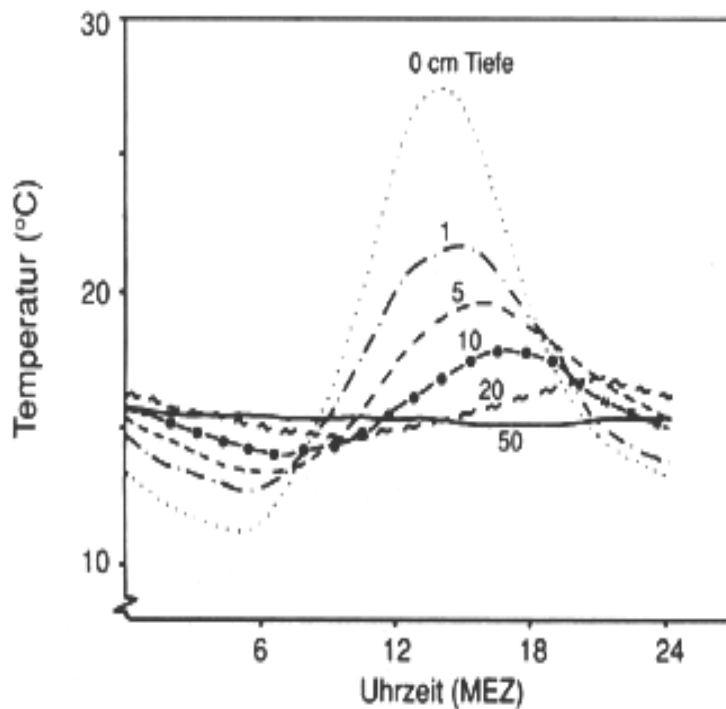


Abbildung 2-9: Jahresgang der Temperatur in einem Boden bei Königsberg in Abhängigkeit von der Tiefe [24]



**Abbildung 2-10: Tagesgang der Temperatur in einer Sandbraunerde bei Königsberg in Abhängigkeit von der Bodentiefe [24]**

Der Wärmetransport im Erdboden erfolgt durch die drei Transportprozesse: Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder konvektiven Transport. Bei der Wärmestrahlung erfolgt der Wärmetransport über die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Dies spielt die größte Rolle beim Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche. Die Wärmeleitung beruht auf der Übertragung kinetischer Energie beim Zusammenstoßen von Molekülen und ist der wichtigste Mechanismus zum Wärmetransport in humiden Böden. Konvektion findet z. B. in Form von Wasserdampfbewegungen und Wasserfluss statt. Diese Temperaturverlagerung geschieht z. B. bei Grundwasser, Niederschlägen etc. [24].

Im Allgemeinen wird die Eignung von Böden für oberflächennahe Geothermienutzung nach VDI 4640 mittels Kollektoren in fünf Varianten eingeteilt, geordnet nach der möglichen Entzugsleistung:

**Variante 1:** Überdurchschnittliche Verhältnisse (Standort: sehr gut geeignet)

- Grundwasserführender Boden, spezifische Entzugsleistung 30 bis 35 W/m<sup>2</sup>, Boden mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit

---

**Variante 2:** Überdurchschnittliche Verhältnisse (Standort: gut geeignet)

- Feuchter lehmiger Boden, spezifische Entzugsleistung 25 bis 30 W/m<sup>2</sup>, Boden mit hoher Wärmeleitfähigkeit

**Variante 3:** Normale Verhältnisse (Standort: geeignet)

- schluffig bis trockener lehmiger Boden, sehr gut Sonneneinstrahlung (Südausrichtung), spezifische Entzugsleistung 20 bis 25 W/m<sup>2</sup>, Boden mit normaler Wärmeleitfähigkeit

**Variante 4:** Normale Verhältnisse (Standort: geeignet)

- schluffig bis sandiger feuchter Boden, normale Sonneneinstrahlung, spezifische Entzugsleistung 15 bis 20 W / m<sup>2</sup>, Boden mit normaler Wärmeleitfähigkeit

**Variante 5:** Ungünstige Verhältnisse (Standort: wenig geeignet)

- steiniger und / oder trockener sandiger Boden, schattig, spezifische Entzugsleistung 10 bis 15 W/m<sup>2</sup>, Boden mit schlechter Wärmeleitfähigkeit

---

## 2.5 Oberflächige Geothermienutzung mittels Flächenkollektoren

Erdwärmekollektoren sind horizontal verlegte Kunststoff-Rohrsysteme in einer Tiefe zwischen 1,2 und 2,0 m. Unterhalb der Frostgrenze entziehen die großflächigen mit Sole durchflossenen Kunststoffrohrsysteme dem Erdreich Wärme. Die aus tieferen Schichten nach oben transportierte Wärme beträgt nur 0,063 bis 0,1 W / m<sup>2</sup> und scheidet als Wärmequelle für die oberen Schichten aus. Der Erdreichkollektor wird unter anderem durch Sonneneinstrahlung, Regen, Tauwasser regeneriert bzw. nutzt die Energie aus diesen Umwelteinflüssen für die Erdwärmepumpe. Die Kunststoffrohre, in der Regel PE 100 in den Größen DN 20 oder DN 25, der Erdwärmepumpe befinden sich in einer Tiefe von 1,2 bis 1,5 m in der Erde (siehe Abb. 2-11). Diese Tiefe ist frostfrei und ist der Bereich, in dem immer Temperaturen größer als 0 °C vorherrschen. Regional können die Tiefen abweichen. Die einzelnen Rohrstränge sollten nicht länger als 100 m sein, da die Druckverluste und damit die aufzubringenden Pumpenleistung sonst zu hoch würden. Die Rohrstränge sollten jeweils gleich lang sein, um so einen hydraulischen Abgleich herzustellen. Bei unterschiedlichen Längen, Querschnitten kann ebenfalls eine Einregulierung der Nutzungsanteile der einzelnen Kollektoren mittels Steuerungsventilen vorgenommen werden. Auf diese Weise entzieht das Kollektorfeld dem Erdreich gleichmäßig die Wärme. Die Rohre sind an ihren Enden in etwas höher gelegenen Vor- und Rücklaufsammeln, der Entlüftung, zusammengefasst. Jeder Strang sollte einzeln mit Absperrventilen versehen sein. Die Sole wird mit einer Umwälzpumpe durch die Kunststoffrohre gepumpt und nimmt dabei die im Erdreich gespeicherte Wärme auf.

Das „entwärmte“ Erdreich regeneriert sich im Frühjahr und Sommer durch die Sonneneinstrahlung und durch Niederschläge. So wird sichergestellt, dass auch zur nächsten Heizperiode der Wärmespeicher Erdreich wieder für Heizzwecke der Wärmepumpe zur Verfügung steht. Aufgrund der Regenerierung sollten die Flächen über Erdkollektoren nicht bebaut oder versiegelt werden, eine Bepflanzung ist möglich, jedoch sollten keine tief wurzelnden Pflanzen angepflanzt werden. Beim Einsatz einer Erdwärmepumpe lassen sich die notwendigen Bewegungen des Erdreichs bei einem Neubau meistens ohne große Mehrkosten ausführen. Bei einem bestehenden Gebäude sind die Kosten meist recht hoch, dass die Nachrüstung mit einer Wärmepumpe allein aus diesem Grund ausscheidet.

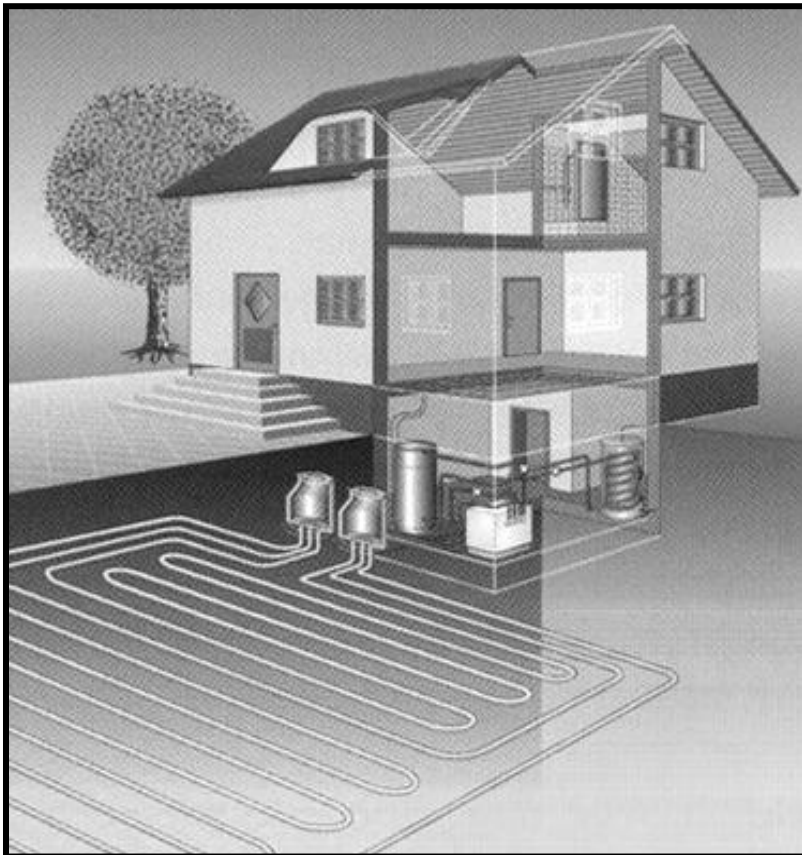


Abbildung 2-11: Aufbauschema von Erdwärmekollektoren [1]

### 2.5.1 Bemessung von Flächenkollektoren

Als Handlungsempfehlung für die Bemessung von Flächenkollektoren dient die VDI-Richtlinie 4640-2. Für Kollektoren existieren allerdings lediglich Richtwerte für den Wärmeentzug, Ansätze für ein detailliertes Bemessungsverfahren, welches als Stand der Technik angesehen werden kann, existiert derzeit nicht.

Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Bemessung von Flächenkollektoren sind der Jahres-Heizwärmebedarf, die Wärmepumpenleistungszahl, welche die Entzugsleistung definiert, der Volumenstrom der Wärmepumpe (kann aus Wärmepumpendatenblatt entnommen werden), sowie die geologischen Gegebenheiten bzw. die spezifische Entzugsleistung des Erdreichs. Der Jahres-Heizwärmebedarf ( $Q_n$ ) setzt sich aus  $Q_1$  dem Wärmeverlust,  $\eta$  dem Nutzungsgrad der Wärme-gewinnung und  $Q_G$  dem Wärmegewinn zusammen.

$$Q_h = Q_1 - \eta \cdot Q_g \quad [\text{kWh}] \quad (2.5)$$

Zur Auslegung der Wärmepumpe wird die Heizleistung ( $Q_{WP}$ ) und die Leistungszahl ( $\varepsilon$ ) ermittelt, um sie einer Betriebsart zuzuordnen. Somit errechnet sich die Entzugsleistung ( $Q_0$ ) aus folgendem Zusammenhang (siehe auch Entzugsleistungen des Bodens in Kapitel 2.4):

$$Q_0 = Q_{WP} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \quad [\text{kW}] \quad (2.6)$$

Die spezifische Entzugsleistung des Erdreichs hängt von der Bodenbeschaffenheit und der Jahresbetriebsdauer ab.

$$A_{EK} = \frac{Q_0}{q_{EK}} \quad [\text{m}^2] \quad (2.7)$$

Die Rohrdimensionierung des Flächenkollektors hängt von der möglichen Entzugsleistung des Erdreichs ab. Je größer die Entzugsleistung sein soll, desto größer sollte bei gegebener Temperaturspreizung der erforderliche Volumenstrom sein, sowie der notwendige Rohrquerschnitt. Die VDI 4640-2 empfiehlt einen Abstand (VA) zwischen den Flächenkollektorrohren von 30–80 cm [30]. Die benötigte gesamte Rohrlänge ( $l_{RI}$ ) errechnet sich dann aus folgendem Zusammenhang:

$$l_{RI} = \frac{A_{EK}}{VA} \quad [\text{m}] \quad (2.8)$$

Wichtig ist, dass die Entzugsleistung nicht überschritten wird, da sonst die Vereisung der Rohrleitungen zu groß wird (eine Vereisung ist sonst unproblematisch) und die vereisten



---

Rohrleitungszonen zusammen wachsen könnten. Bei Tauwetter im Frühjahr ist dann die Versickerung von Regen- und Schmelzwasser, die auch wesentlich zur Erwärmung des Bodens beiträgt, erheblich behindert. Weil durch den Flächenkollektor das Temperaturniveau im Erdreich verändert wird, sollten die Rohre mit ausreichender Entfernung von Bäumen, Sträucher und empfindlichen Pflanzen verlegt sein. Der empfohlene Abstand zu anderen Versorgungsleitungen und Gebäuden beträgt 0,7 m. Wird dieser Abstand unterschritten, muss eine ausreichende Isolierung der Rohrleitungen vorgenommen werden.

Sollen Flächenkollektoren auch zum direkten Kühlen von Gebäuden eingesetzt werden, so sollte fließendes Grundwasser und die Grundwassertemperatur berücksichtigt werden. Spitzenkühllasten können aber auch über spezielle Kältemaschinen abgedeckt werden.

## 2.5.2 Kostenbeispiel für einen Flächenkollektor

Um ein Standard-Einfamilienhaus von 150 m<sup>2</sup> beheizter Fläche mit Erdwärmekollektoren auszustatten bedarf es bei einem Faktor von 1,4 einer unbebauten, nicht versiegelten Fläche von 210 m<sup>2</sup>. Die üblichen Berechnungsfaktoren sind zwischen 1,3 und 1,6.

$$A_A = 150m^2 \cdot 1,4 = 210m^2 \quad (2.9)$$

Wird von einem Verlegeabstand von 0,5 m ausgegangen, können theoretisch 2 m Kollektorrohre pro m<sup>2</sup> angenommen werden.

$$l = \frac{210m^2}{0,5m} = 420m \quad (2.10)$$

$$\frac{420m}{5} = 84m \quad (2.11)$$

Somit ergeben sich 5 Kreise zu je 84 m Länge. Zu beachten ist, dass die gleiche Länge und die Maximallänge von 100 m pro Kreis eingehalten werden. Bei einer durchschnittlichen Entzugsleistung von 25 W/m<sup>2</sup> ergibt sich eine Wärmeleistung von 5,25 kW. Die Differenz zu einer angestrebten Wärmeleistung von etwa 6–8 kW kann durch einen Spitzenlastbrenner bereitgestellt werden.

Die Kosten für 420 m Rohr-Material und Anschlussteile liegen bei ca. 2000 €.

Erdarbeiten (300 m <sup>3</sup> Erde) ca.	3.000 – 6.000 € [20].
Kosten für den Arbeitslohn	2.000 bis 3.000 € [20].
Wärmepumpe ab	10.000 €.
Daraus resultieren die Gesamtkosten für eine solche Anlage von ca.:	<u>17.000 €.</u>

## 2.6 Alternative Formen

Eine Alternative zu horizontalen Flächenkollektoren sind Erdwärmekörbe oder senkrecht verlegte Künnetenkollektoren, wie in Abbildung 2-12 dargestellt. Sie sind in ihrer Funktion und Anwendung den Erdwärmekollektoren ähnlich. Es sind spiralförmig aufgerollte Kunststoffrohre aus PE 100, die in einer Tiefe von ca. 1,5 m bis 4 m in das Erdreich eingebracht sind. Die Entzugsleistung liegt bei 0,7 bis 2,0 kW pro Korb in Abhängigkeit und Auslegung der vor Ort vorhandenen Bodenbeschaffenheit, bei einer maximalen Entzugsleistung von ca. 1.800 Stunden/Jahr nach allgemein gültigen Auslegungskriterien [4]. In der Regel werden drei Standard-Körbe in Reihe verbunden, welche dann einer effektiven Länge von 300 bis 350 m entsprechen würden. Der Platzbedarf bei paralleler Stranganordnung des Erdwärmekorb-Feldes beträgt rund 10 m<sup>2</sup> je Korb (Großkorb: 15 m<sup>2</sup>).

Die Regeneration des Erdreiches erfolgt auch wie bei den horizontalen Flächenkollektoren durch Sonne, Regenwasser, Schneeschmelze usw. Erdwärmekörbe bieten die Vorteile, dass sie wenig Platz brauchen (optimal für kleine Grundstücke) schnell genehmigt und installiert werden können.

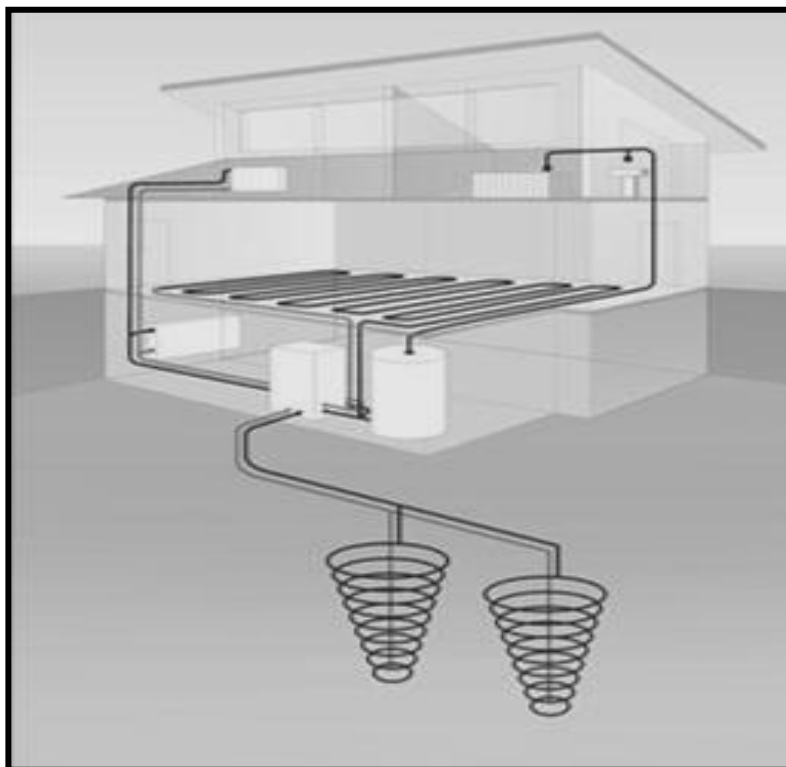


Abbildung 2-12: Funktionsschema von Erdwärmekörben [1]

---

Die durchschnittlichen Kosten bei 3 bis 4 Erdwärmekörpern mit Material und Einbringung liegen bei ca. 6.000 bis 8.000 €. Somit ergeben sich Gesamtkosten inklusive WP ab ca. 16.000 € für eine solche Anlage.

Der Kompakt-Absorber stellt eine weitere Alternative dar. Dies ist ein aus Kapillarrohrmatten bestehender Kollektor, der wie Flächenkollektoren horizontal und frostsicher etwa 1,2 m unter der Erdoberfläche verlegt wird, in dem Sole als Wärmeträger dient. Die Energieaufnahme bzw. Regeneration erfolgt ebenfalls durch Sonneneinstrahlung, Schneeschmelze und Regen. Eine partielle Verlegung an verschiedenen Stellen auf dem Grundstück ist hiermit möglich. Der Vorteil des Kompakt-Absorbers liegt im geringen Flächenbedarf, im Vergleich zu üblichen Flächenkollektoren. Daraus resultieren geringere Investitionskosten und eine von den Platzverhältnissen des Grundstücks unabhängige Einsatzmöglichkeit. Entgegen der oft angepriesenen extrem kompakten Bauweise sollte ein Absorber großzügig dimensioniert werden. Dies ist insbesondere bei trockenen Böden nötig. Genutzt werden sollten sie nur in kleinen, gut gedämmten Immobilien mit Systemtemperaturen von maximal 35 °C (Fußbodenheizung). Von einer monovalenten Betriebsweise sollte deswegen abgesehen werden. Beim Einsatz eines solchen Flächenkollektors ist Vorsicht geboten. So kann eine unfachmännisch ausgeführte Installation insbesondere Entlüftung zum ungleichmäßigen Entzug der Erdwärme führen und langfristig zum gänzlichen Funktionsverlust führen [22].

Ein Grabenkollektor beruht auf dem gleichen Prinzip wie alle Flächenkollektoren, lediglich in Form und Wirkungsgrad gibt es Unterschiede. Grundsätzlich sind hier die Soleleitungen parallel übereinander in einem stehenden Register angeordnet. Der Graben ist ca. 3 m tief und an seiner Basis ca. 1,2 m breit und vergrößert sich zur Oberfläche ansteigend auf etwa 2,5 m. Die Kollektorrohre sind in einem vertikalen Abstand von 10 cm verlegt. Dies ergibt je Graben-Meter eine Wärmetausfläche von etwa 2,5 m<sup>2</sup>. [30]

Wie bei allen Flächenkollektoren ist auch die Kälteentzugsleistung des Grabenkollektors saisonal stark schwankend, so dass der thermischen Regeneration des Erdreichs zwischen den Heizperioden eine besondere Bedeutung zukommt. Die zu erreichende Wärmeleistung hängt hauptsächlich von der Grabenlänge und nur geringfügig von der Verlegeform ab. Die Leistung ist aufgrund der oberflächennahen Verlegetiefe relativ gering, da hier eine hohe Abhängigkeit von den Entzugsleistungen bzw. der stark schwankenden Bodentemperaturen vorherrscht. Daher eignet sich

---

auch diese Technik nur zur Beheizung kleinerer Immobilien, insbesondere in modernen, gut gedämmten Häusern mit Fußbodenheizung.

Erdwärmegräben gehören zu den günstigen Varianten der Geothermie-Heizsystemen, ab ca. 18.000 € komplett mit Wärmepumpe, vergleichbar in etwa mit den horizontal verlegten Flächenkollektoren.

---

### 3 Analyse und Bewertung bestehender Einbringverfahren

#### 3.1 Konventionelle Einbringung von horizontalen Flächenkollektoren

Bei einer Flächenverlegung wird die zukünftige Kollektorfläche ausgehoben und planiert. Das vorhandene Bodenmaterial sollte nur bei Verwendung spezieller PE -100 Rohre wieder genutzt werden, ansonsten muss für den Einbau Sand verwendet werden. Die Kollektorrohre sollten nicht in Kies oder Schotter verlegt werden, da die entstehenden Lufteinschlüsse keine optimale Leitfähigkeit zum Erdreich bieten bzw. dämmen würden. Infolgedessen sollte bei solchen Böden um die Rohre feiner Sand Verwendung finden, der eine bessere Feuchtigkeitsaufnahme und auch geringste mögliche Lufteinschlüsse gewährleistet. Zu beachten ist bei steinigen Böden, dass diese vom Kollektor entfernt werden, um so spätere Beschädigungen zu vermeiden (siehe auch dazu Kapitel 2, Boden/Wärmeleitfähigkeit).

Bei der Verlegung wird eine Grube in der nötigen Größe und Tiefe ausgehoben. An höchster Stelle befindet sich der Verteiler, dieser ist großzügig zu seiner Umgebung zu isolieren, um Wärmeverluste gering zu halten. Er kann in Beton- / Kunststoffschächten oder sog. Lichtschächten montiert werden. Bei Lichtschächten gilt es die langfristige Lichteinstrahlung zu vermeiden, damit eine Versprödung durch UV-Strahlung vermieden wird. Die Kollektorrohre werden ausgelegt, ausgerichtet und fixiert. Dabei gilt besonderes Augenmerk auf die Biegeradien der Rohre. Anschließend werden sie mit Sand zugedeckt, eventuell auch eingeschlämmt und die Fixierungen entfernt. Das System wird mit Sole gefüllt, durchspült und anschließend entlüftet. Mit einer Druckprüfung wird die Installation auf Dichtigkeit geprüft. Das restliche Erdreich wird wieder aufgefüllt und verdichtet. Die Erdoberfläche wird optisch wieder rekonstruiert. Dies ist das Standardverfahren zum Einbringen von horizontalen Flächenkollektoren.

Der Nachteil bei diesen Verfahren besteht darin, dass die heraus geförderte Erde zwischengelagert werden muss. Je nach Kollektorfläche führt dies zu hohen Kosten. Zusätzlich fallen Entsorgungskosten für die nicht wieder eingebrachte Erde, die durch Sand und Rohre ersetzt wurde, an.

Eine weitere Möglichkeit, die sich lediglich in der Erdbewegung unterscheidet, stellt die Grabenaushebung dar. Dieses Verfahren umgeht das zuvor beschriebene Problem des Zwischenlagerns der großen Erdmenge. Hierbei wird der erste Graben ausgehoben und in ihm ein

---

Kollektorkreis verlegt, anschließend wird der nächste Graben ausgehoben. Das dort herausgeförderte Erdreich dient nun zur Befüllung des vorherigen Grabens. Dies wiederholt sich bis die Kollektoranlage komplett eingebracht ist. Dieses Verfahren wird meistens auf kleineren Grundstücken angewandt und in Eigenleistung erbracht. Die Eigenleistung senkt hierbei, je nach Einsatz, die Kosten für Arbeitsgerät und Arbeitslohn. Nachteilig sind der hohe Zeit- und Arbeitsaufwand. Ebenso sollte der Aspekt der eventuellen eingeschränkten Garantieleistungen bedacht werden.

---

### 3.2 Grabenlose Verlegungen von Leitungen

Eine weitere Methode zum Einbringen von Rohren ist der so genannte Leitungstunnelbau. Dieser bezeichnet das unterirdische Einbringen von vorgefertigten Rohren mit einem nahezu beliebigen Querschnitt. Bisherige Einsatzgebiete liegen zumeist bei der Verlegung von Ver- und Entsorgungsleitungen, insbesondere in der Wasser- bzw. Abwasserwirtschaft. Die Verlegung von Flächenkollektoren ist ein neues Marktsegment, da die Verlegung von Kollektorrohren bisher eher im Neubaugebiet relevant ist und eine flächenschonende Einbringung für den Bestandsbau eine eher untergeordnete Rolle spielte. Mit der zunehmenden Verbreitung von Gas- bzw. Wärmepumpen ist diese Option jedoch weiter zu untersuchen. Insbesondere die Eigenschaften der Wärmeübertragung bei einer nicht präparierten (konventionell: Kollektorrohrverlegung im Sandbett) sind zu prüfen.

Im grabenlosen Leitungsbau stehen generell verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Bodenverdrängungsverfahren
- Bohrpressung
- Horizontalspülverfahren.

Durch Verdrängen, Rammen, Bohren, Pressen oder durch den Abbau des Bodens wird ein Hohlraum geschaffen. Hier kann ein Rohr eingezogen, eingeschoben oder eingepresst werden. Die Rohre werden dabei in geraden, gekrümmten Trassen (Ebenen), in gerader, geneigter oder gekrümmter Gradienten (hier: Steigung) vorgetrieben. Der an der Ortsbrust anstehende Boden wird verdrängt oder weg befördert. Der Werkstoff und die jeweiligen Verbindungen der Rohre werden nach dem Verwendungszweck gewählt. Grundsätzlich wird zwischen bemannten und unbemannten Leitungsbau unterschieden. Laut Regelwerk GW 304 wird bemannter Leitungstunnelbau ab einem Durchmesser 1200 mm verwendet, kleinere Durchmesser sind unbemannt. Beide Verfahren werden des Weiteren noch in nichtsteuerbare und steuerbare Verfahren differenziert. Nachfolgend ist eine kleine Übersicht über die Verfahren gegeben.

#### Steuerbare Verfahren

- Pilotrohr-Vortrieb
- Pressbohr-Rohrvortrieb
- Schild-Rohrvortrieb
- Horizontal-Spülbohrung
- Horizontal Directional Drilling (HDD)



## Nichtsteuerbare Verfahren

- Bodenverdrängungsramme/ -Hammer
- Horizontalramme/ -presse mit offenen/ mit geschlossenem Rohr
- Horizontal-Pressen
- Horizontal-Pressbohren

### 3.2.1 Vorgehensweise beim grabenlosen Leitungsbau

Vor Beginn ist sicherzustellen, dass keine Leitung oder Ähnliches beschädigt wird und ausreichende Abstände eingehalten werden. Von einem Startschacht oder einer Baugrube werden Mantel- oder Produktrohre mit Hilfe von dynamischer Energie (der Rammung) oder statischer Energie (der Pressung) durch den Baugrund bis in einem Zielschacht vorgetrieben. Der Boden wird entweder verdrängt, an der Ortsbrust (Vortriebsrichtung) abgebaut und anschließend mittels Schnecken, hydraulisch oder pneumatisch zum Startschacht gefördert oder nach Fertigstellung des Vortriebs als Erdkern aus dem Rohr entfernt.

Die Wahl des Verfahrens ist abhängig von den folgenden Parametern:

- erforderliche Lagegenauigkeit,
- der Entfernung zu anderen Ver- und Entsorgungsleitungen,
- dem Außendurchmesser der Vortriebslänge,
- den Baugrundverhältnissen,
- der Mindestüberdeckung.

**Tabelle 3-1: Anwendungsdaten der nichtsteuerbaren Verfahren [26]**

Vortriebsverfahren	Max. Durchmesser [mm]	Max. Vortriebslänge [m]
Erdverdrängungshammer	200	40
Horizontalramme	200	40
Leichte Horizontal-Pressramme	220	65

Horizontalramme (offen)	1600	70
Pressbohrgerät	1400	80

**Tabelle 3-2: Anwendungsdaten der steuerbaren Verfahren [26]**

Vortriebsverfahren		Max. Durchmesser [mm]	Max. Vortriebslänge [m]
Pilotvortrieb		800	50 - 120
Horizontalspülbohrung (HDD)	Mini- Bohrgerät	200	150
	Mega- Bohrgerät	1800	1800
Mikrotunnelbau- Verfahren		1200	100 - 200

Die nichtsteuerbaren Verfahren werden für kurze Vortriebsstrecken (< 80m) bei möglichst homogenen Bodenverhältnissen genutzt. Laut DIN EN 12889 sollten im Nennweitenbereich < 200 mm Verdrängungshämmer und Horizontalrammen mit geschlossenem Rohr nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen, sowie der Einsatz von Horizontal-Pressanlagen sollte auf Hausanschlusspressungen mit Längen unter 10 m beschränkt werden.

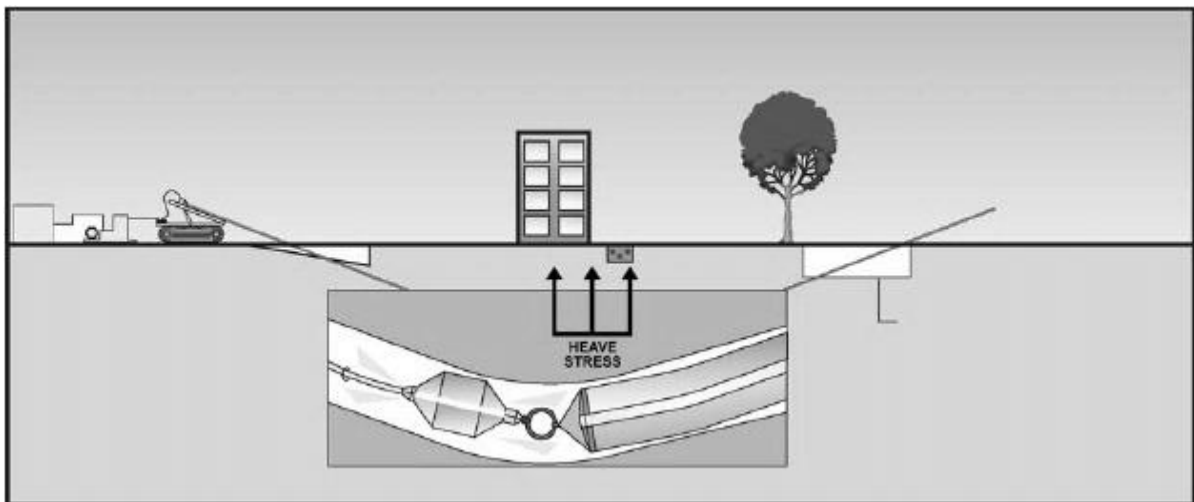
Die Zielgenauigkeit ist wesentlich von der Erfahrung und Qualifikation der ausführenden Firma, dem Durchmesser des Verdrängungshammers bzw. des Produktrohres und von den Bodenverhältnissen abhängig. Inhomogenität im Baugrund, wie Findlinge oder schräge Schichtverläufe, können zu Abweichungen führen.

Aus den oben genannten Randbedingungen, den bereits vorliegenden Erfahrungen aus der Praxis, dem benötigten Rohrdurchmessers, der Anlagengröße und den Kosten kommt als Einbringungsform

für horizontale, erdverlegte Flächenkollektoren das Horizontalspülbohrverfahren sowie das Verfahren mit dem Bodenverdrängungshammer in Frage (siehe auch Kapitel 4).

### 3.2.2 Horizontalspülbohrverfahren

Horizontalspülbohranlagen arbeiten mit Zug- und Schubkraft, Drehmoment (Rotation), Spülung und dynamischer Schlagkraft. Dieses so genannte HDD-System, (Horizontal Directional Drilling) besteht aus einer Horizontalspülbohranlage, Betonitmischanlage und einer Antriebsstation für den Betrieb der Mischanlage. An der Spitze befindet sich ein abgeschrägter, schwenkbarer Kopf mit Spülbohrungen. Er rotiert und bohrt sich damit durch das Erdreich. Gleichzeitig bringt eine rückwärtige Schubkraft die Spitze tiefer und schneller ins Erdreich. Die Betonitspülung baut zudem an der Ortsbrust Erde ab und spült sie zur Zielgrube heraus. Gestartet wird von der Startgrube zur Zielgrube mit einer Pilotbohrung. Anschließend wird, wie in der Abbildung 3-1 zu sehen ist, von der Zielgrube zur Startgrube ein Räumertypen hindurch gezogen, welcher nachfolgend das einzubringende Rohr einzieht.



**Abbildung 3-1: HDD Verfahren [18]**

Dieses Verfahren gehört zu den steuerbaren Verfahren, dies wird mit Hilfe des schwenkbaren Kopfes erreicht. Im klassischen Anwendungsbereich, der Horizontalspülverfahren finden PE-HD-Rohre Verwendung, wie sie z.B. auch bei Erdkollektoren genutzt werden, sowie duktile Gussrohre mit zugfesten Steckmuffenverbindungen und Stahlrohre mit kleiner Nennweiten für Druckrohrleitungen.

Vorteilhaft wirken sich bei diesem Verfahren sowohl die Mobilität der Anlage aus, als auch die geringen Investitionskosten, die z.B. gegenüber der Mikrotunneltechnologie etwa die Hälfte betragen, außerdem der große Anwendungsbereich der bis zur Bodenklasse 6 reicht. Ein Nachteil liegt in der „Trägheit“ der verwendeten Steuersysteme und der damit verbundenen größeren Ungenauigkeit, zudem in den Anwendungsgrenzen des Systems, vor allem bei kiesigen Böden. Für Freispiegelleitungen sollte dieses Verfahren trotz gelegentlicher Literaturhinweise keine Anwendung finden. Nähere Informationen sind aus der ATV A 125 zu entnehmen. Die dort geforderten Toleranzen können mit den erwähnten Steuersystemen in der Regel nicht eingehalten werden [17].

### 3.2.3 Bodenverdrängungshammer

Ein Bodenverdrängungshammer oder auch im Volksmund „Erdrakete“ genannt, gehört zu den ungesteuerten Verfahren des Leitungstunnelbau. Er ist ein 1,2 bis 2 m (je nach Durchmesser) langer Zylinder mit einem stufigen Kegel an der Vorderseite, welcher durch das Erdreich gerammt (geschossen) wird.

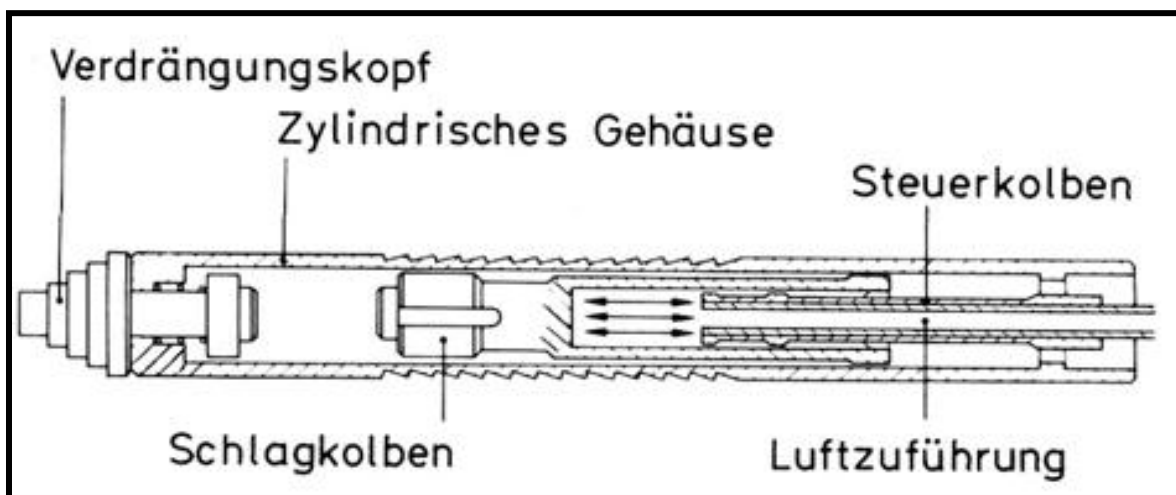


Abbildung 3-2: Erdrakete nach dem Zweitaktprinzip

Am Markt haben sich zwei Funktionsprinzipien etabliert: Die direkte Beaufschlagung (starrs System), bei dem der Kolben direkt Stoß für Stoß vorangetrieben wird. Zum anderen das Zweitaktprinzip, bei dem mit voller Energie eine Pilotbohrung mit dem Meißelkopf erstellt wird und anschließend das Gehäuse nachschlägt (siehe Abb. 3-2). Hierbei sind beim ersten Takt keine Reibungskräfte an der Mantelfläche zu überwinden, welches das System schneller und effektiver

---

gegenüber dem starren System macht. Als auch die Zielgenauigkeit ist hier mit 93 % sehr hoch, da Steine ohne Kursabweichungen durchschlagen werden. Abweichungen von bis zu 1 % gelten als zielgenau [26]. Der Überdeckungsfaktor beträgt mindestens 10, d. h. die Mindesttiefe beträgt das Zehnfache vom Bohrungsdurchmesser. Somit kann sichergestellt werden, dass es nicht zu Aufwölbungen an der Oberfläche kommt. Gestartet wird auf einer mit einer Zielvorrichtung ausgerichteten Lafette (=Abschussvorrichtung) in der Startgrube. Angetrieben wird die Rakete dabei mit einem handelsüblichen Baustellenkompressor (Arbeitsdruck ca. 7 bar). Die Erde wird verdrängt und es entsteht ein Hohlraum, Voraussetzung hierfür ist die Verdrängungsfähigkeit des Bodens. Dieser sollte idealerweise trocken oder erdfucht aus gemischtkörnigem Lockergestein sein, welcher den Bodenklassen 3–5 entspricht. Je nach Boden können bis zu 15 m pro Stunde und ca. 40 m Distanz erreicht werden. Verarbeitet werden im Allgemeinen muffenlose PVC-, PE-X, als Lang- oder Kurzrohre in 1 m-Teillängen oder Endlos-Rohr bis DN 200, die später oder direkt, je nach vorkommendem Erdreich, hinter der Rakete eingezogen werden. Eine Schrumpfung vom Verdrängungshammer geschaffenen Hohlraumes von 5 bis 15 % ist mit zu berücksichtigen. Die Start- und Zielgruben benötigen lediglich wenige Zentimeter mehr als die Eigenlänge der Rakete und eine Breite von ca. 0,6 m. Somit ist der Platzbedarf wesentlich kleiner als bei anderen grabenlosen Leitungsverfahren, sowie der Personalbedarf lässt sich auf eine Person reduzieren.

Die Kosten bei 400 m Rohrlänge mit Material und Arbeitslohn liegen bei 4000 – 5000 € [2]. Das Bodenverdrängungsverfahren ist in der ATV A 125 bzw. GW 304 Rohrvortrieb und anderen einschlägigen Regelwerken beschrieben.

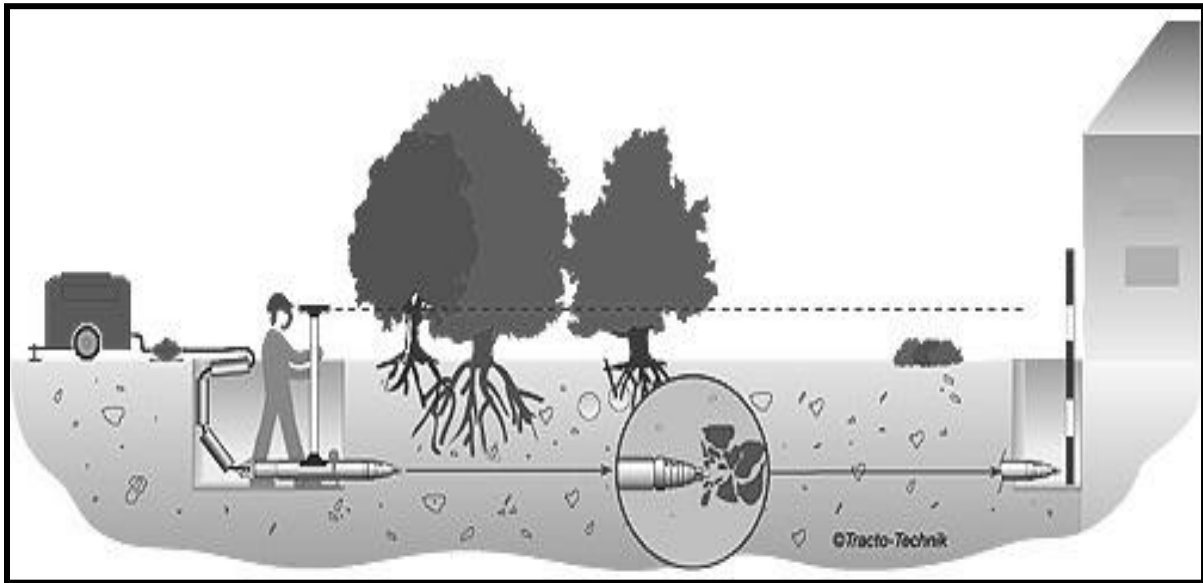


Abbildung 3-3: Funktionsdarstellung eines Bodenverdrängungshammers [26]

### 3.3 Vor- und Nachteile des innovativen Einbringverfahren gegenüber der konventionellen Einbringung

Die grabenlose Verlegung bietet für das Marktsegment bei der Verlegung von Flächenkollektoren einige Vor- aber auch Nachteile gegenüber dem konventionellen Verfahren, weshalb eine genaue Untersuchung der Machbarkeit, besonders aus wirtschaftlicher und technischer Sicht sinnvoll ist. Die Vorteile des innovativen Verfahrens liegen in der Vereinfachung bei der Durchführung und den damit verbundenen Einsparungen bei Zeit, Personal und somit Kosten. Die Bauzeit kann sich im Gegensatz zur offenen Bauweise – je nach lokalen Gegebenheiten – im Durchschnitt halbieren [26]. Das Verfahren ist aufgrund seiner minimal invasiven Art in vielen Natur- und Umweltschutzzonen zugelassen. Darüber hinaus entfällt die aufwändige Umlagerung der Erde, was das Verfahren erheblich vereinfacht und zu Einsparungen von Kosten führt.

Zum Zeitpunkt des Projektstarts war für die Verlegung von Flächenkollektoren nur ein Verfahren zum Patent angemeldet bzw. stand für die experimentelle Projektarbeit nur ein Verfahren zur Verfügung (nachfolgend Raketenschuss-Verfahren). Nachfolgend wird dieses Verfahren als Referenz für eine innovative Leitungsverlegung dienen (siehe auch Kapitel 4). Angaben zum zeitlichen Arbeitsaufwand

sowie zum weiteren Aufwand werden folglich darauf bezogen, da weitere Vergleichswerte zu diesem Zeitpunkt fehlen.

In den Tabelle 3-3

Tabelle 3-3 und 3-4 sind Näherungswerte für die benötigte Arbeitszeit zur Verfahrensdurchführung (konventionell und innovativ) sowie der Flächenbedarf für Erdaushubzwischenlagerung nach [3] dargestellt.

**Tabelle 3-3: Anzahl der Stunden und Mitarbeiter je Arbeitsvorgang bei verschiedenen Einbringungsverfahren [3]**

<b>Arbeitsvorgang</b>	<b>offenen Bauweise 1 fach WT-Rohr 40 m Kollektorlänge</b>	<b>Innovatives Raketenschussverfahren 1 fach WT-Rohr 40 m Kollektorlänge</b>	<b>Innovatives Raketenschussverfahren 4 fach WT-Rohr 80 m Kollektorlänge</b>
<b>Arbeitsvorbereitung</b>	1 h x 2 MA	1 h x 2 MA	1 h x 2 MA
<b>Aushub der Baugrube</b>	6 h x 2 MA	2 h x 2 MA	1 h x 2 MA
<b>Legen des Kollektorrohres inkl. Schweißarbeiten</b>	0,25 h x 2 MA	-	-
<b>Durchörtung</b>	-	4 x 0,5 h x 2 MA	0,5 h x 2 MA
<b>Einzug, Spielen, Schweißen des Kollektorrohres</b>	-	4 x 0,5 h x 2 MA	1 h x 2 MA
<b>Verfüllen und Oberfläche wiederherstellen</b>	3 h x 2 MA	1 h x 2 MA	0,5 h x 2 MA
<b>Setzen des Hausanschlusses inkl. Mauerdurchbruch</b>	2 h x 2 MA	2 h x 2 MA	2 h x 2 MA
<b>Gesamtzeit</b>	<b>24,5 h</b>	<b>20 h</b>	<b>12 h</b>

**Tabelle 3-4: Flächenbedarf bei verschiedenen Einbringungsverfahren [2]**

<b>Arbeitsflächen</b>	<b>offenen Bauweise 1 fach WT-Rohr 40 m Kollektorstärke</b>	<b>Raketenschuss 1 fach WT-Rohr 40 m Kollektorstärke</b>	<b>Raketenschuss 4 fach WT-Rohr 80 m Kollektorstärke</b>
<b>Erdaushub</b>			
<b>Länge (gesamt)</b>	20 m	2 x 3 m	2 x 1,2 m *
<b>Breite</b>	0,8 m	1,2 m*	0,8 m
<b>Tiefe</b>	1,2 m	1,2 m*	1,2 m
<b>Volumen (gesamt)</b>	19,2 m <sup>3</sup>	8,6 m <sup>3</sup>	2,3 m <sup>3</sup>
<b>Fläche für Erd-Haufen (H=1 m)</b>	40 m <sup>2</sup>	18 m <sup>2</sup>	5 m <sup>2</sup>
<b>Arbeitsbereich</b>	40 m <sup>2</sup>	20 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>
<b>Gesamt Flächenbedarf</b>	<b>80 m<sup>2</sup></b>	<b>38 m<sup>2</sup></b> * Raketenlänge	<b>15 m<sup>2</sup></b>

Des Weiteren wird die Unfallgefahr durch die Einsparung großer Maschinen reduziert. Oft können bei kleinen Rohrdurchmessern zwei oder gar eine Person die Arbeiten durchführen, was zur übersichtlicheren und sichereren Arbeitsweisen führt. Die Lärm- und Emissionsbelastungen werden für An- und Bewohner gering gehalten, da z.B. bei der Erdrakete nur der Kompressor eine nennenswerte Geräuschkulisse darstellt, die Lärmemissionen der Rakete werden nahezu komplett vom Erdreich gedämmt.

Weiterhin werden die Grünanlagen und Bebauungen geschont bzw. Schäden daran vermieden, da kein schweres, sperriges Gerät den Garten etc. passiert. Nur die Start- und Zielgruben müssen gerichtet werden, das nachträgliche aufwändige, großflächige Rekonstruieren der Grünanlage entfällt. Es kann wetterunabhängig gearbeitet werden, da zum einen unter der Bodenfrostgrenze gearbeitet wird, somit jahreszeitenunabhängig, zum anderen bei stark durchweichten Boden



---

bestehen eventuell Einschränkungen zum Befahren der Flächen. Die Ausfallzeiten sind somit gering, was zur Vermeidung von Kosten führt.

Trotz der Einsparung bei den Kosten und dem Arbeitsaufwand, gibt es auch Nachteile des innovativen Verfahrens. Durch die weitestgehend „blinde“ Arbeitsweise des grabenlosen Verfahrens, kann es zu Problemen bei der Verlegung kommen. Durch Wechsel zwischen durchgängigen bzw. weichen und felsigen Bodenstrukturen kann der Raketenkopf durch Hindernisse von seiner geraden Bahn abweichen. Deshalb ist diese Art der Verlegung nur für kürzere Rohrverlegungsstrecken zu verwenden. Um trotzdem eine ausreichende Wärmeeinkopplung ins System zu ermöglichen, werden parallele Rohrstränge verwendet (siehe Kapitel 5.4). Durch das fehlende Sandbett rund um die Kollektorrohre ist die Wärmeleitfähigkeit sowie der Drainage - Effekt nicht so optimal wie bei der konventionellen Verlegetechnik. Dies kann bei sehr niedrigen Bodentemperaturen die Aggregation von Eisstrukturen begünstigen. Die Auswirkungen der verschiedenen Geometrien, sowie der Wärmeleitfähigkeit des Bodens werden in den nachfolgenden Kapiteln sowohl theoretisch als auch experimentell näher untersucht.

---

## 4 Auswahl und Erprobung eines Werkzeuges

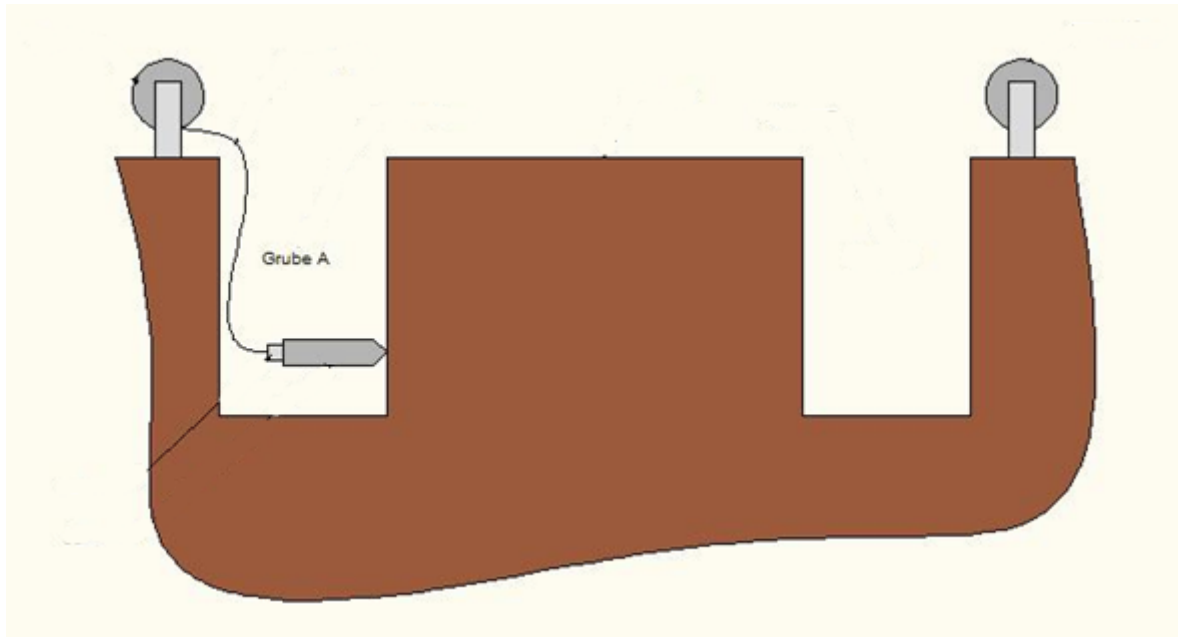
In einem vorläufigen Testlauf wurden das Horizontalspülbohrverfahren und der Einsatz eines Bodenverdrängungshammers für das Verlegen von Wärmetauschröhen getestet. Die Größe der Startbaugrube für das Horizontalspülbohrverfahren musste doppelt so groß eingelegt werden, um Presswerkzeug und Rohrmagazine einzubringen und zwischenzulagern. Die Zielbaugruben beider Verfahren sind in etwa gleich.

Hinsichtlich des Arbeitsfortschrittes lassen sich keine wesentlichen Zeitunterschiede im Erstellen der Tunnelung erkennen. Die Findung der Zielbaugrube ist mit dem Horizontalspülbohrverfahren auf einer Tunnellänge von 25 m etwas besser ausgeprägt, da mittels Sensortechnik im Presskopf eine kontinuierliche Überwachung und Korrektur des Schlagvektors möglich ist.

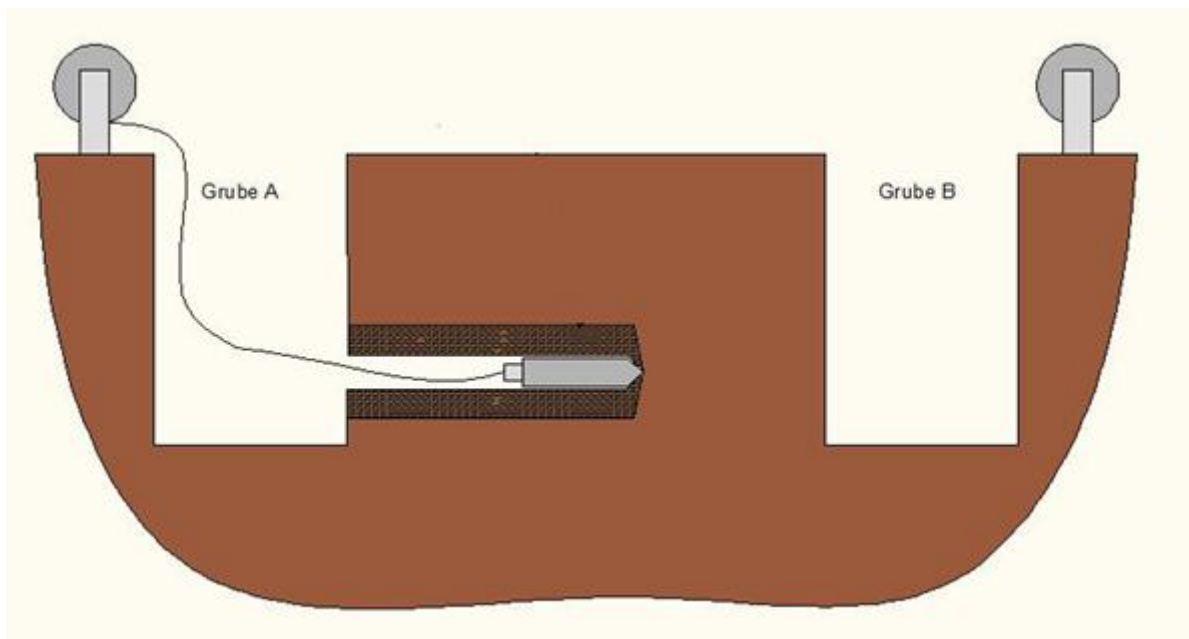
Die Genauigkeit des Bodenverdrängungshammers reicht jedoch mit ca. 10 cm auf der Teststrecke von 25m absolut aus und kann in Praxis bis auf 40 m problemlos eingesetzt werden. Die Geräteinvestitionen unterscheiden sich jedoch sehr deutlich. Das Horizontalspülbohrverfahren kostet mit ca. 80–100 T€ das Zehnfache gegenüber dem Bodenverdrängungshammers mit entsprechendem Kompressor.

Im extrem feuchten, z. B. mit Grund- oder Schichtenwasser getränkten Grund, ist die Bodenrakete allerdings nicht einsetzbar.

In einem weiteren Testlauf wurde das Verfahren zum Einbringen des Wärmetauscherrohres mittels des Bodenverdrängungshammers weiter optimiert. Einzelne Schritte des Baufortschrittes werden in den nachfolgenden Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-6 skizzenhaft dargestellt.



**Abbildung 4-1: Bodengruben beim Horizontalspülbohrverfahren mit Bodenverdrängungs-hammer und Seilwinden**



**Abbildung 4-2: Bodenverdrängungshammer bei der Tunnelung**

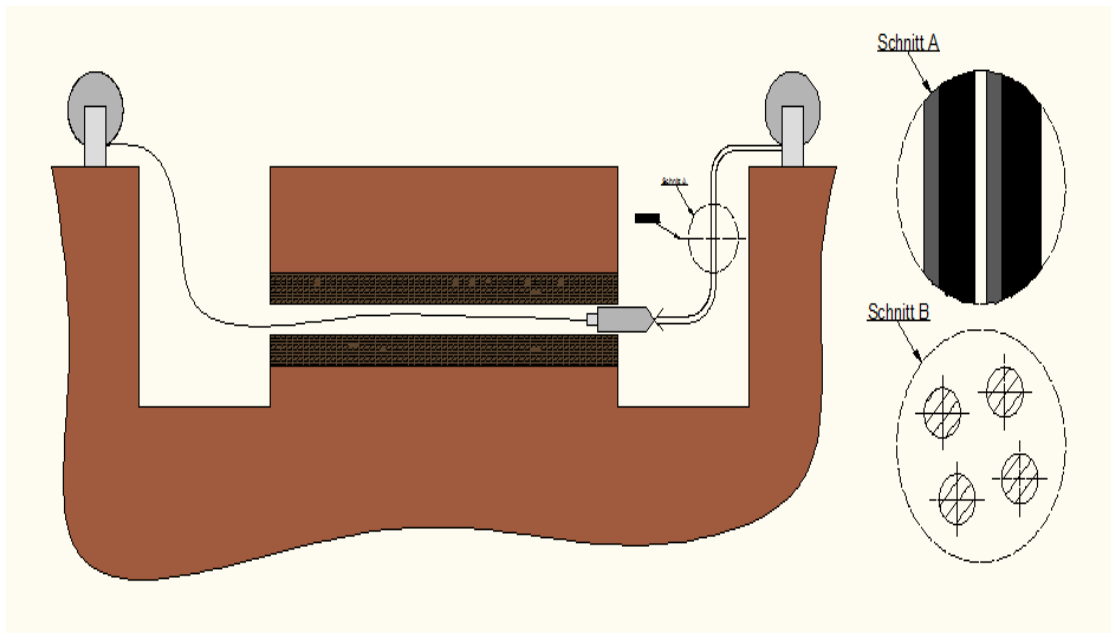


Abbildung 4-3: Anbringen des 4-fach-Rohres an den Bodenverdrängungshammer

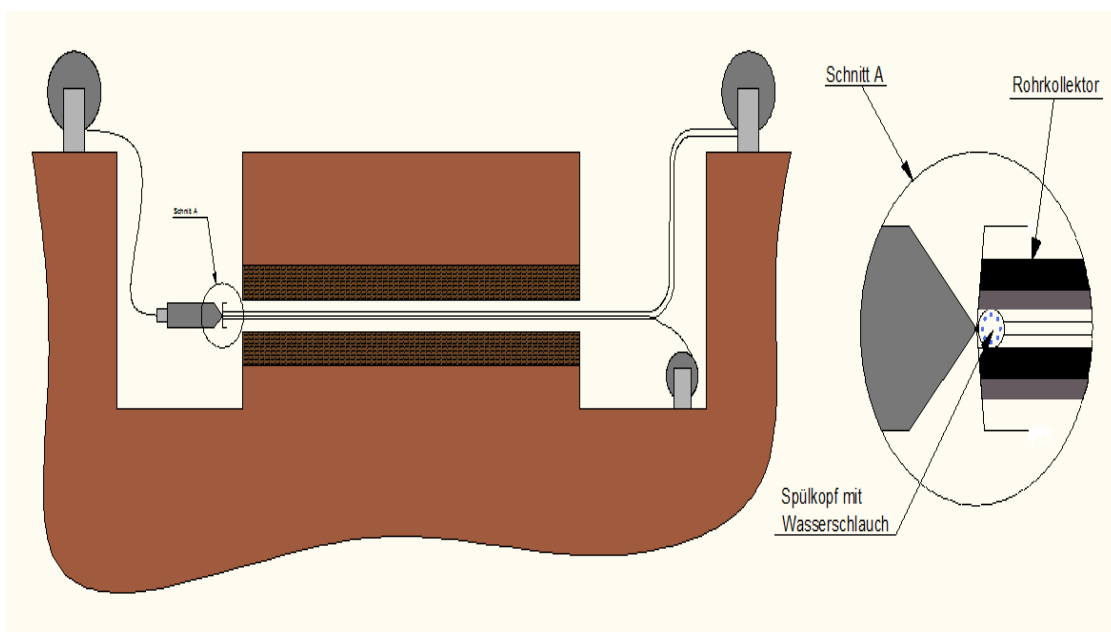
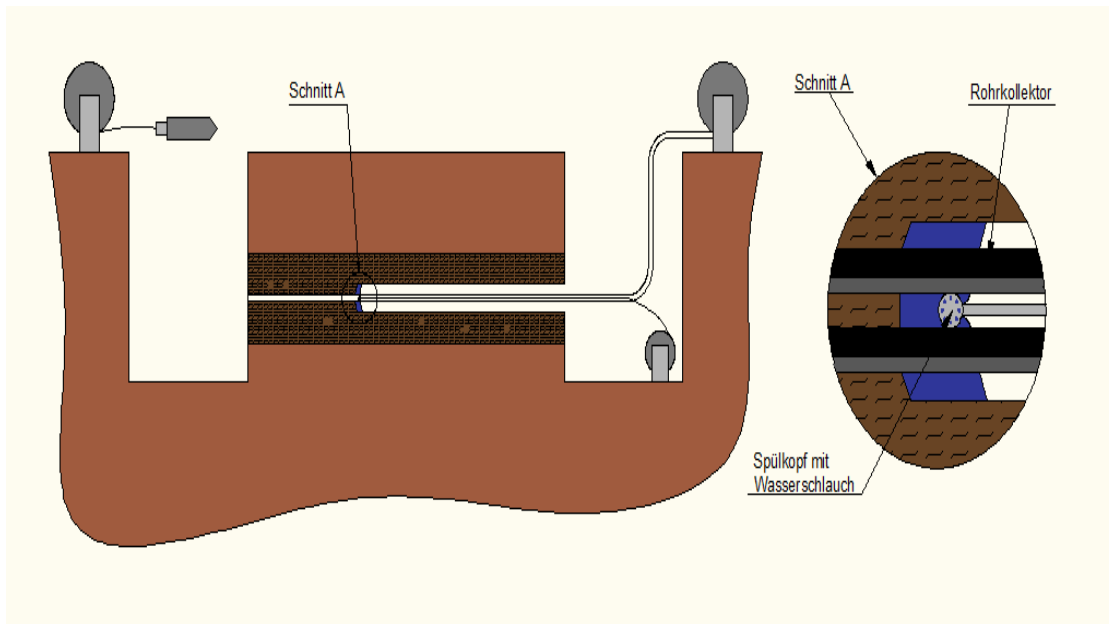
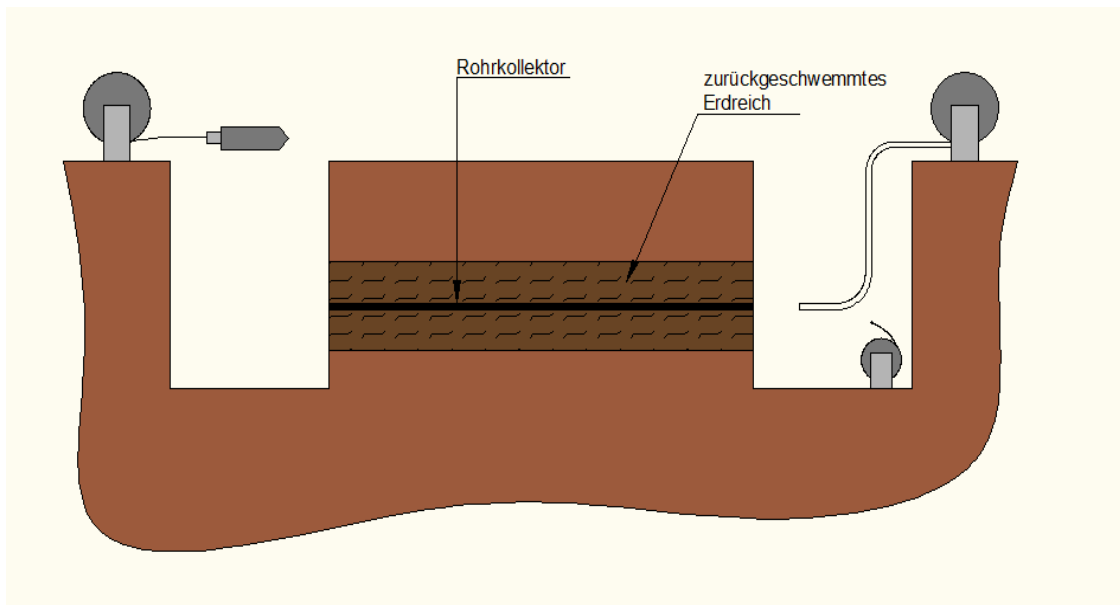


Abbildung 4-4: Rohrkollektor ist vollständig eingezogen



**Abbildung 4-5: Einschwämmen des Rohrkollektors beim Rückzug**



**Abbildung 4-6: Eingeschwämmtes 4-fach-Rohr im Erdreich**

Die wesentliche Innovation ist das Einschwämmen des Wärmetauschrohrs in einem Arbeitsgang<sup>1</sup>. Durch diesen Zeitgewinn insbesondere beim 4-fach Rohr ist ein erhöhter Materialeinsatz des PE-Rohres von untergeordneter Bedeutung.

<sup>1</sup> Patent der Firma Bega.Tec

## 5 Numerische Untersuchungen der Kollektoren

### 5.1 Allgemeine Information zum Simulationsprogramm

Das CFD (Computational Fluid Dynamics) Programmsystem FLUENT arbeitet auf der Grundlage der Finite-Volumen-Methode. Es besteht aus mehreren Programmen, die unter anderem der Gittergenerierung dienen, sowie Datenbanken für Stoffwerte zur Bestimmung des Speziestransports mit und ohne Verbrennung.

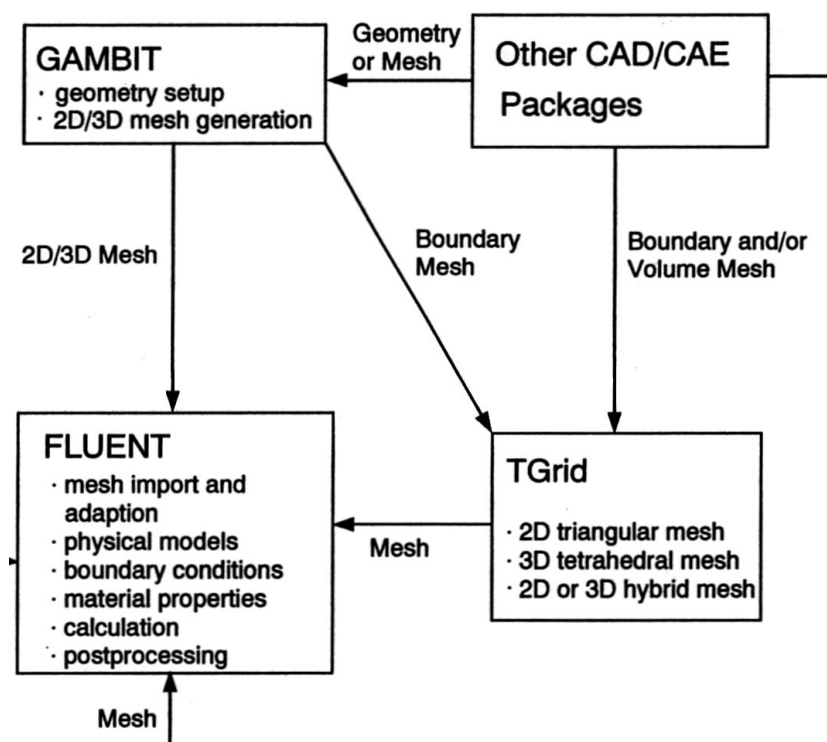


Abbildung 5-1: FLUENT Programmstruktur [34]

In Abbildung 5-1 ist die Programmstruktur von FLUENT dargestellt. Zur Lösung der Wärmeübertragungs- und Strömungsprobleme können strukturierte und unstrukturierte Gitter sowohl für den zwei- als auch für den dreidimensionalen Fall generiert werden.

Die Basis der mathematischen Modellierung der Wärme- und Strömungsverhältnisse in FLUENT sind die zeitabhängigen Differentialgleichungen für die Bilanzen der Massen-, Stoff-, Impuls- und Enthalpieströme. Dieses Gleichungssystem wird in den einzelnen Zellen des diskretisierten

Berechnungsraumes iterativ mit Hilfe numerischer Methoden gelöst. Abbildung 5-2 stellt schematisch die Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung in FLUENT dar.

In den folgenden Kapiteln werden die in FLUENT zur Auswahl stehenden mathematischen Modelle näher erläutert, mit denen die zwei Hauptvorgänge Strömung und Wärmeübertragung beschrieben werden. Die mathematischen und numerischen Grundlagen sollen hier nicht besprochen werden, da sie in der Literatur eingehend beschrieben worden sind [[35]-[40]].

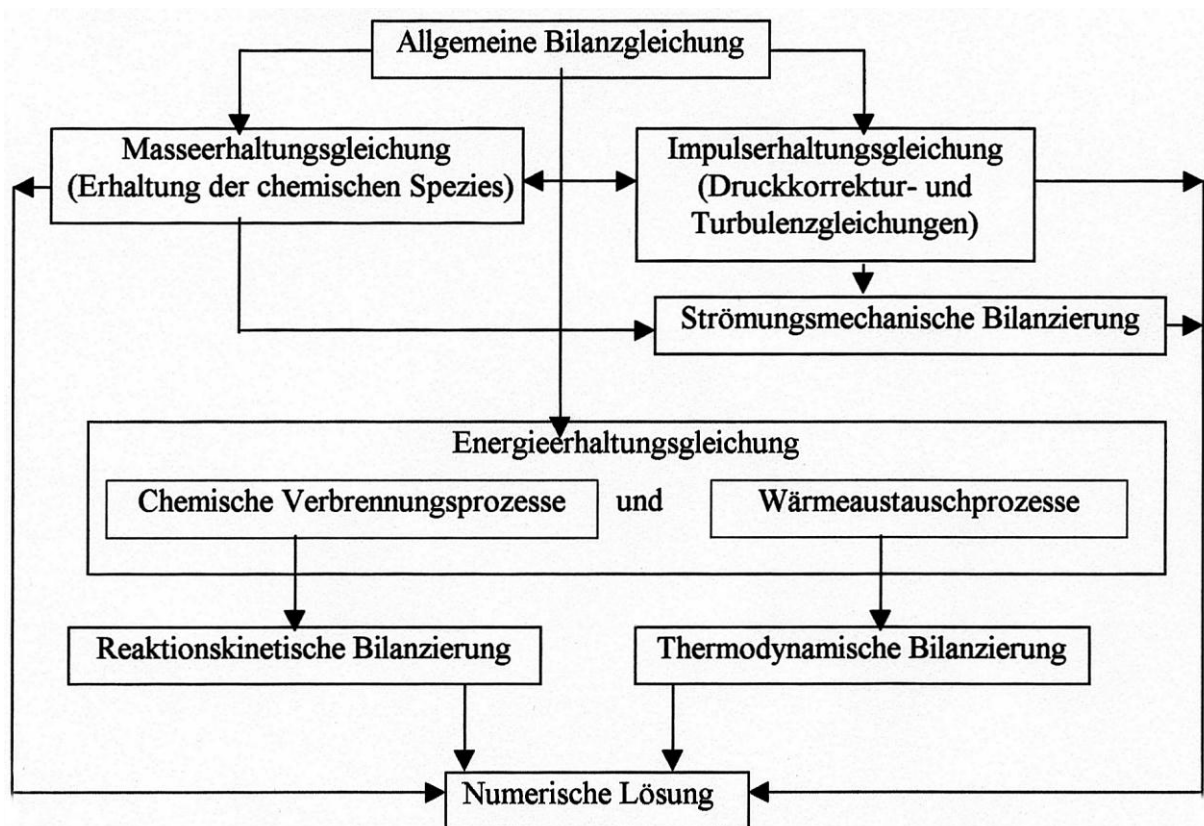


Abbildung 5-2: Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung mit FLUENT [39]

### 5.1.1 Beschreibung der Strömung in Flächenkollektoren

Bei den betrachteten Flächenkollektoren liegen aufgrund der unterschiedlichen Volumenströme und den damit verbundenen unterschiedlichen Reynolds-Zahlen in der Kollektorrohren entweder laminare oder turbulente Strömungen vor. Es ist bekannt, dass bei einer turbulenten Strömung in einem Kollektorrohr bei gleichem Rohrdurchmesser aufgrund des besseren Wärmeübergangs eine

---

höhere Entzugsleistung zu erreichen ist als im laminaren Fall. Bei der Simulationen wird angenommen, dass es sich bei den betrachteten dreidimensionalen Strömungen um stationäre Strömungen handelt und diese aufgrund der Temperaturänderungen in Strömungs- und Spannweitenrichtung temperaturabhängige Stoffwerte besitzen.

Bei der Erstellung des mathematischen Modells mit FLUENT muss, je nach Reynolds-Zahl, ein Modell für laminare oder turbulente Strömungen ausgewählt werden. Die Simulationsrechnungen werden mit der Auswahl des mathematischen Modells für die jeweilige Strömungsform durchgeführt. Bei der Berechnungen mit niedrigen Geschwindigkeiten im Rohr (z. B.  $c = 0,19$  m/s) wird die laminare Beschreibung der Strömung verwendet. Bei den Berechnungen mit den höheren Geschwindigkeiten wird die turbulente Strömung im Rohr mit einem dafür geeigneten Turbulenzmodell simuliert. Die turbulente Strömung und die dafür geeigneten Turbulenzmodelle werden nachfolgend kurz erläutert.

### 5.1.2 Turbulenzmodellierung

Durch die Zeitmittelung der Navier-Stokes-Gleichungen wird das Problem der Beschreibung der turbulenten Prozesse in einer Strömung auf die Modellierung der sogenannten Reynoldsspannungen reduziert. Aufgabe von Turbulenzmodellen ist es nun, hierfür geeignete Ansätze zu liefern [41]. Im Programmsystem FLUENT stehen verschiedene Turbulenzmodelle zur Verfügung, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Bei dem Spalart-Allmaras Modell handelt es sich um ein relativ einfaches Eingleichungsmodell, bei dem eine Transportgleichung für die turbulente Viskosität gelöst wird.

Mit dem Standard  $k-\varepsilon$  Modell [42], das zu den Zweigleichungsmodellen zählt, steht ein Turbulenzmodell zur Auswahl, das sich vielfach mit einer ausreichenden Genauigkeit bewährt hat. Neben dem Standard  $k-\varepsilon$  Modell stehen noch zwei weiterentwickelte Varianten zur Verfügung: das RNG  $k-\varepsilon$  Modell [43] und das realizable  $k-\varepsilon$  Modell [44]. Mit diesen beiden Modellen können auch Strömungsphänomene berechnet werden, für die das Standard  $k-\varepsilon$  Modell keine oder nur eingeschränkte Gültigkeit besitzt. Dabei handelt es sich zum Beispiel um abgelöste oder stark verdrallte Strömungen. Abgesehen von den genannten Modellen können noch das  $k-\omega$  Modell, das Reynolds-Spannungsmodell (RSM) [45]-[53] und die Large-Eddy-Simulation (LES) [46]-[59] zur Turbulenzmodellierung eingesetzt werden.



---

Das Standard  $k-\omega$  Modell in FLUENT basiert auf dem Wilcox  $k-\omega$  Modell [60], welches Änderungen für "Niedrig-Reynoldszahlen-Effekte" und Kompressibilität enthält. Dieses Modell ist gut für Strömungen im wandnahen Bereich und freie Scherströmungen anwendbar. Des Weiteren ist in FLUENT eine Variation des Standard  $k-\omega$  Modells implementiert: das Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Modell. Das SST  $k-\omega$  Modell wurde von Menter entwickelt, um die Genauigkeit des  $k-\omega$  Modells in Wandnähe und die gute Abbildung der unabhängigen freien Strömung durch das  $k-\varepsilon$  Modell miteinander zu verknüpfen. Um dies zu erreichen, wird das  $k-\varepsilon$  Modell in eine  $k-\omega$  Formulierung umgewandelt [61].

Das Reynolds-Spannungsmodell ist genauer als die  $k-\varepsilon$  - und  $k-\omega$  Modelle, da hier die Reynoldsspannungen über sechs Gleichungen direkt modelliert werden und damit der anisotrope Charakter der Turbulenz Berücksichtigung findet. Nachteil dieses Modells ist der erhöhte Rechenzeit- und Speicheraufwand sowie das schlechtere Konvergenzverhalten.

Für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Simulationen wurde das Laminar Modell für die laminaren Strömungen und das RNG  $k-\varepsilon$  Modell für die turbulenten Strömungen angewendet.

### **5.1.3 Wärmeübertragungsvorgänge**

Zur Berechnung der Wärmeübertragung wird in FLUENT eine Energiegleichung eingeführt, in der Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden [61]. Damit können Wärmeübertragungsprobleme sowohl in einem Fluid als auch in Festkörpern abgebildet werden. Die Wärmeübertragung zwischen dem Boden und der Sole erfolgt durch Leitung und Konvektion. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus spielt Strahlungswärmetransport bei dieser Anwendung keine Rolle, der Wärmeaustausch wird durch Wärmeleitung und Konvektion dominiert.

## **5.2 Angenommene Randbedingungen**

Um unterschiedliche Auswirkungen verschiedener Parameter zu untersuchen, werden am Gaswärme-Institut im Vorfeld der Demonstrationsanlagen verschiedene numerische Simulationen durchgeführt. Die angenommenen Randbedingungen sind in den Tabelle 5-1 und folgenden angegeben.

**Tabelle 5-1: Randbedingungen für die „Sole“ für die numerischen Untersuchungen**

<b>Solegemisch</b> aus: Ethylenglykol	30 Vol.-%
Wasser	70 Vol.-%
Volumenstrom	0,376 m <sup>3</sup> /h
Strömungsgeschwindigkeit	0,32 m/s
Eintrittstemperatur	<b>10 °C</b> <b>5 °C</b>

Bei den betrachteten dreidimensionalen Strömungen handelt es sich um einen stationären Zustand. Aufgrund der Temperaturänderungen in Strömungsrichtung werden für die Sole temperaturabhängige Stoffwerte (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und dynamische Viskosität) genutzt. Es werden verschiedene Varianten in Hinsicht auf die Eintrittstemperatur der Sole und die Bodentemperatur gerechnet. Die Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-4 zeigen die angenommenen Randbedingungen der Umgebungsluft, des Bodens und der Rohreigenschaften.

**Tabelle 5-2: Randbedingungen „Luft“ für die numerischen Untersuchungen**

<b>Luft</b>	
rel. Luftfeuchte	60%
Umgebungstemperatur	25 °C
Umgebungsdruck	1013,25 mbar
Dichte	1,1762 kg/m <sup>3</sup>
spez. Wärmekapazität	1015 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit	0,0259 W/mK
dynamische Viskosität	1,826e-05 kg/ms

**Tabelle 5-3: Randbedingungen „Boden“ für die numerischen Untersuchungen**

<b>Boden</b>	
Dichte	1834 kg/m <sup>3</sup>
spez. Wärmekapazität	950 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	<b>0,35 / 1,2 / 2,4 W/m*K</b>

Für alle betrachteten Geometrien wird ein einheitliches Bodenvolumen angenommen (2,5 m x 2,5 m x 21 m).

**Tabelle 5-4: Randbedingungen „Rohr“ für die numerischen Untersuchungen**

<b>PE-Rohre</b>	
Rohr-Innendurchmesser	20,4 mm 26,2 mm
Rohr-Außendurchmesser	<b>25,0 mm</b> <b>32,0 mm</b>
Rohrstärke	2,3mm 2,9 mm
Rohrlänge	<b>40 m</b> <b>80 m</b>
Dichte	958 kg/m <sup>3</sup>
spez. Wärmekapazität	2500 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	0,35 W/m*K
Rohrrauigkeit	0,007mm

Zusätzlich werden Einflüsse durch die Rohrlänge, den Rohrdurchmesser und die Rohrgeometrie untersucht.

### 5.3 Variante 1: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Längen

Es werden die Kollektorleistungen von zwei verschiedenen Rohrlängen mit gleichem Rohrdurchmesser ( $D_a = 25\text{mm}$ ) ermittelt. Die unterschiedlichen Geometrien sind in den Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 dargestellt.

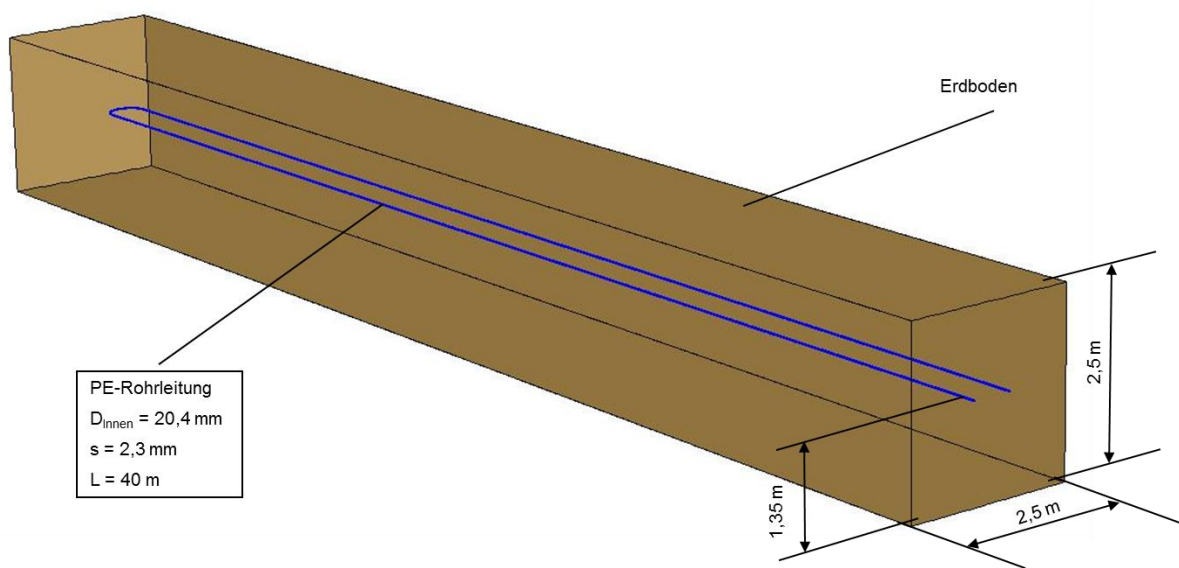


Abbildung 5-3: Geometrie mit 40 m Gesamtlänge (Geometrie 1)

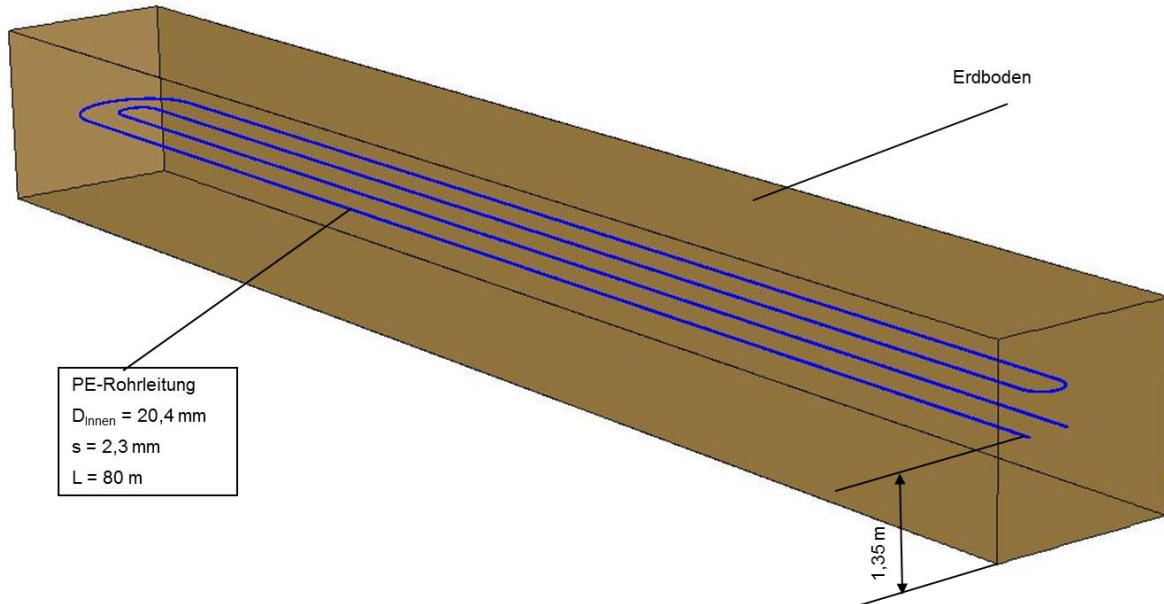


Abbildung 5-4: Geometrie mit 80 m Gesamtlänge (Geometrie 2)

Die Kollektorrohre werden in einem Abstand von 550 mm verlegt, siehe Abbildung 5-5.

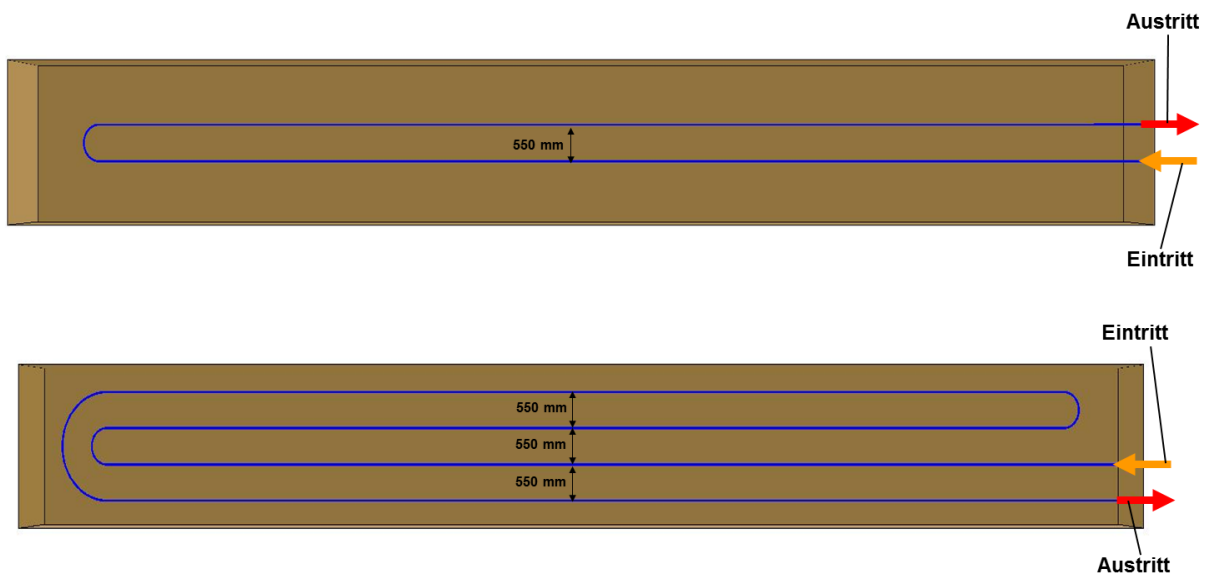


Abbildung 5-5: Abstände der Kollektorrohre

Die Abbildung 5-6 zeigt die Kollektorleistung der 40 m Rohrlänge (Geometrie 1) im Vergleich der 80 m Länge (Geometrie 2) unter Berücksichtigung verschiedener Sole-Eintritts- und Bodentemperaturen. Die Bodentemperaturen sind mit 14°C und 18 °C angenommen worden. Die Sole Vorlauftemperaturen entsprechen 5 und 10° C.

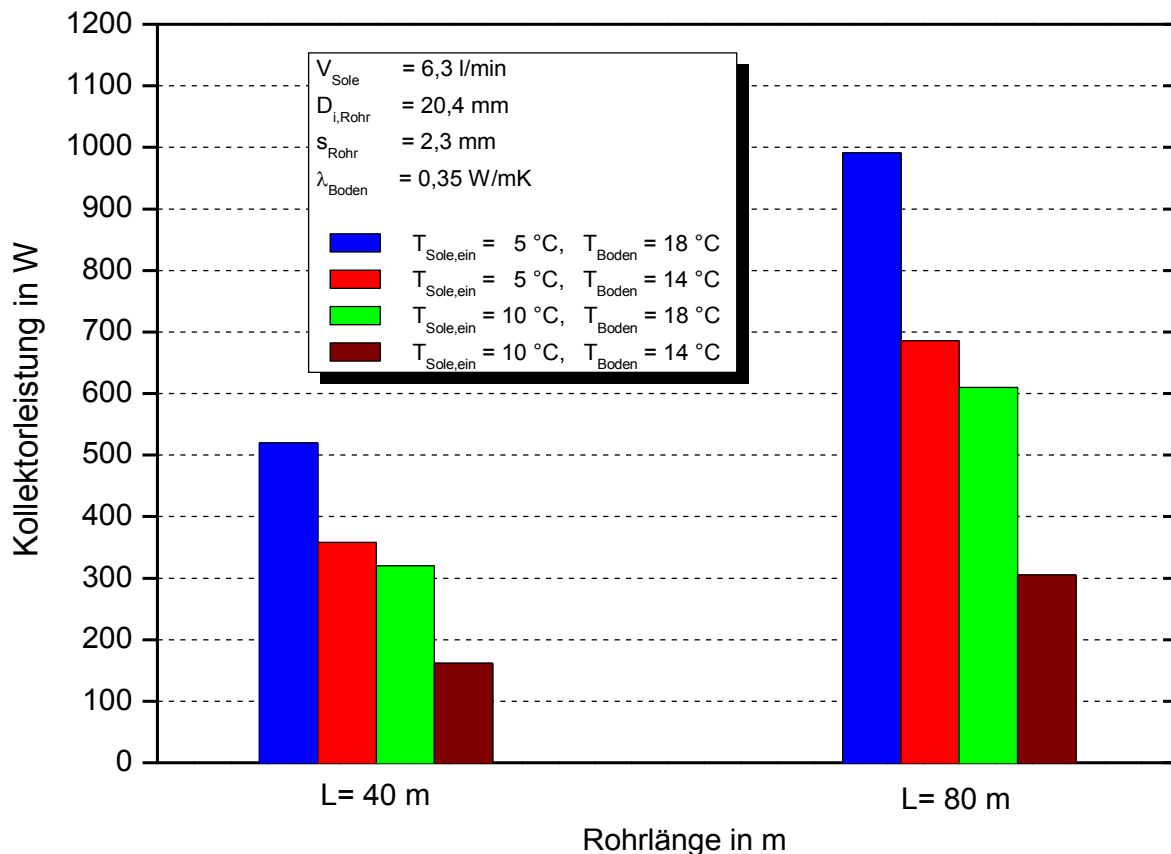
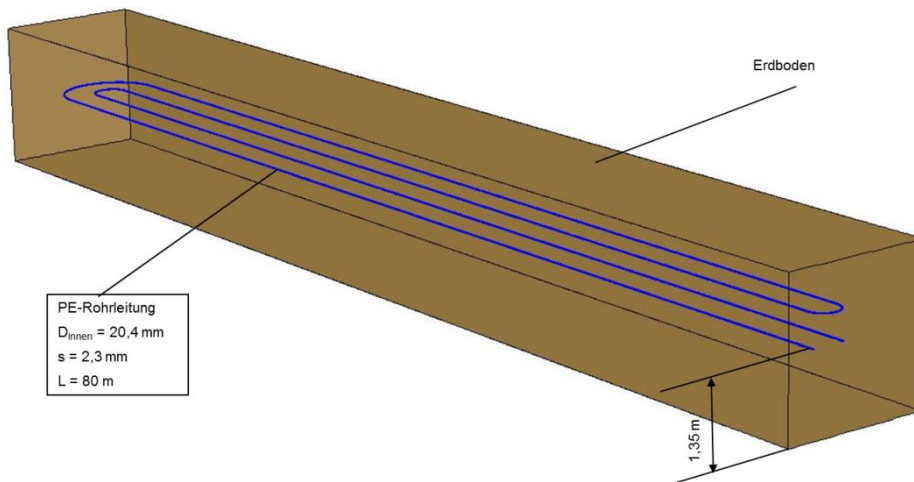


Abbildung 5-6: Vergleich Kollektorleistung von Geometrie 1 und Geometrie 2

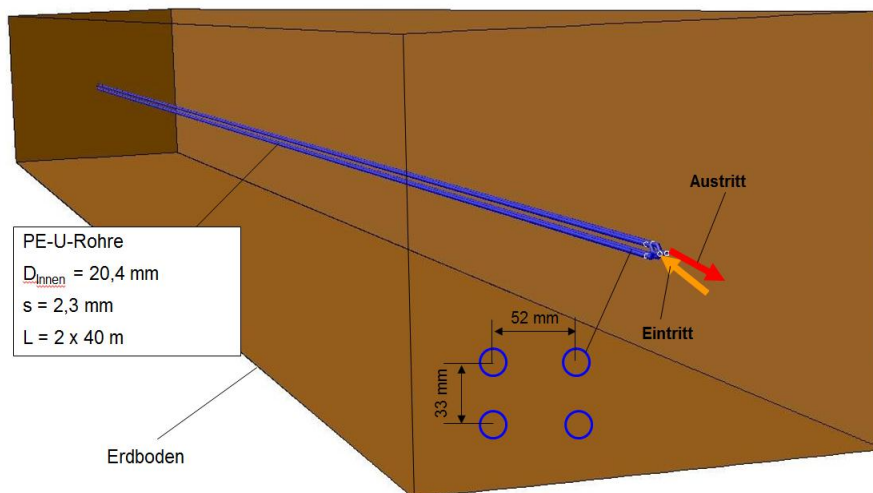
Die Abbildung 5-6 zeigt eine Verbesserung durch die verdoppelte Kollektor-Rohrlänge, im Schnitt werden zwischen 88,3 und 91 % mehr Leistung erbracht.

#### 5.4 Variante 2: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Geometrien

Nachfolgend werden zwei Kollektoren mit gleicher Gesamtlänge (80 m) sowie gleichem Durchmesser  $D_a=25 \text{ mm}$  und unterschiedlichen Geometrien untersucht. Die Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 zeigen die verschiedenen Geometrien (Geometrie 2 + 3).

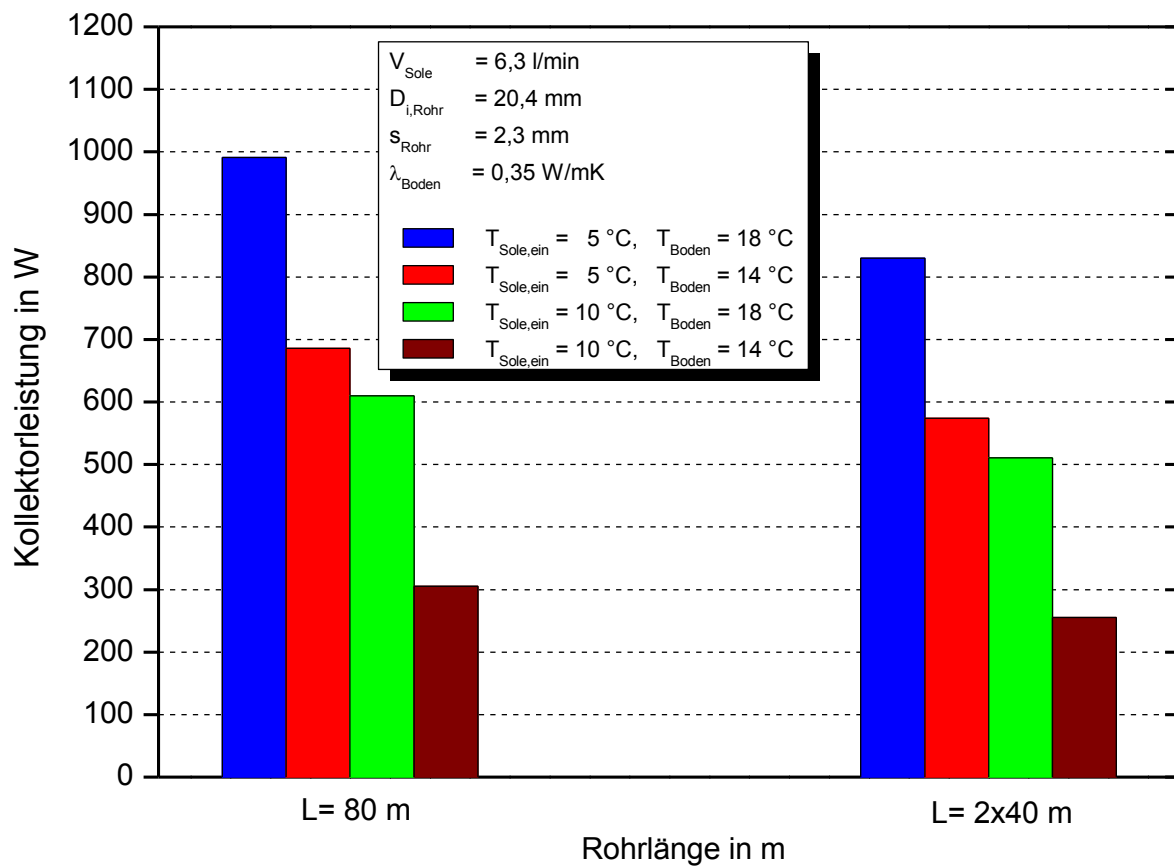


**Abbildung 5-7: Kollektor mit 80 m Länge (Geometrie 2)**



**Abbildung 5-8: Kollektor mit 80 m Gesamtlänge in paralleler U-Form (Geometrie 3)**

Die Abbildung 5-9 zeigt eine Verschlechterung der Leistung gegenüber der Geometrie 2.



**Abbildung 5-9: Vergleich Kollektorleistung von Geometrie 2 und Geometrie 3**

In Abbildung 5-9 erkennt man eine Verschlechterung der Leistung von Geometrie 3 zu Geometrie 2 von durchschnittlich 16,3 %. Dies ist mit der Rohranordnung zu erklären. Der Rohrabstand bei Geometrie 3 ist geringer als bei Geometrie 2 (siehe Abbildung 5-5 und Abbildung 5-8). Den in Reihe angeordneten Rohren (Querschnitt) in Geometrie 2 steht mehr Boden zum Wärmeentzug zur Verfügung.



### 5.5 Variante 3: Vergleich unterschiedlicher Rohr-Durchmesser

In Variante 3 werden zwei Kollektoren mit gleicher Länge (80 m) (Geometrie 2) und unterschiedlichem Rohrdurchmesser  $D_a=25$  mm und  $D_a=32$  mm numerisch berechnet und miteinander verglichen. Die Abbildung 5-10 zeigt die errechneten Leistungen der unterschiedlichen Varianten.

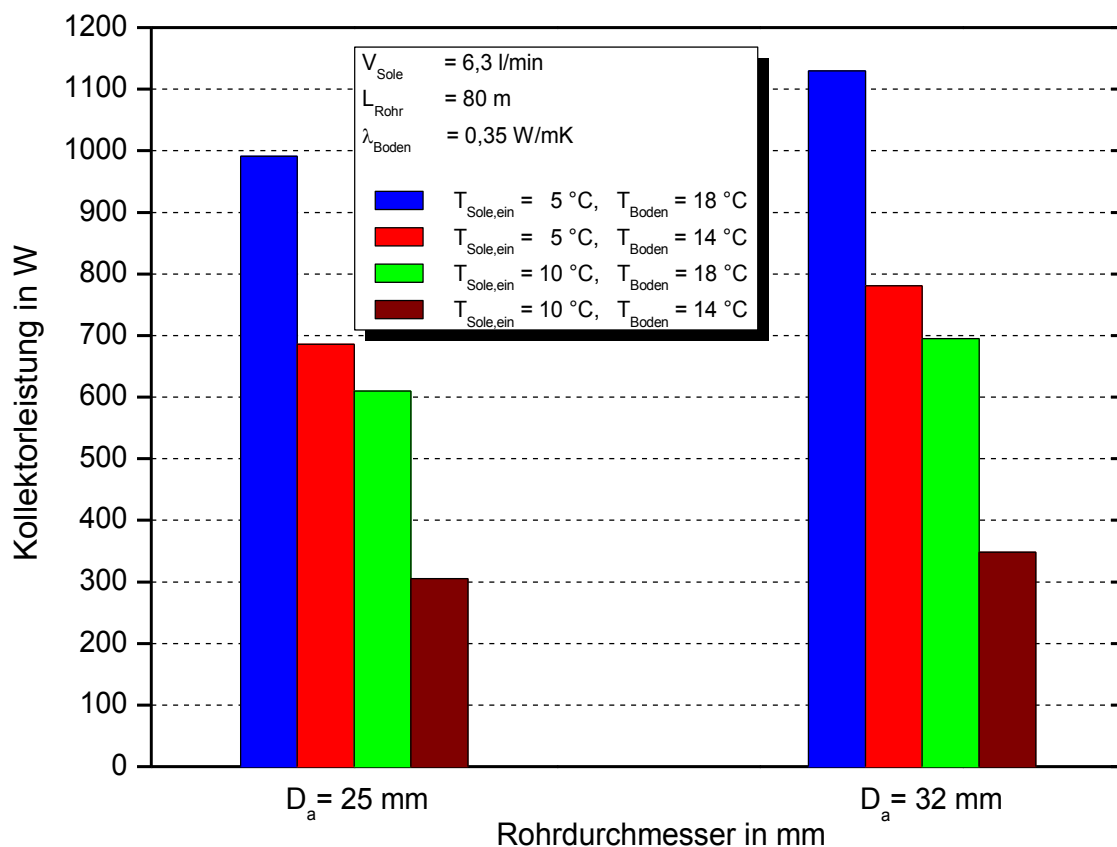


Abbildung 5-10: Kollektorleistung (Geometrie 2,  $L_{Rohr} = 80$  m) mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern

Die Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der Leistung um etwa 14 % durch den größeren Rohrdurchmesser.

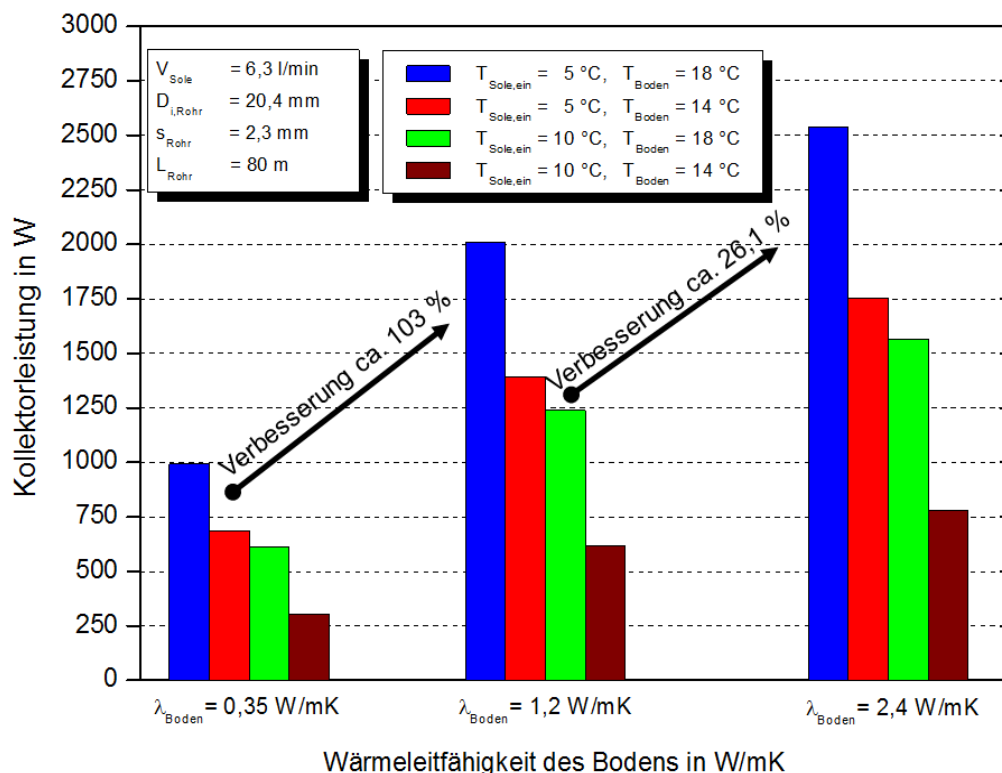
## 5.6 Variante 4: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

In Variante 4 werden verschiedene Werte zur Bodeneigenschaft bzw. zur Wärmeleitfähigkeit für zwei verschiedene Geometrien untersucht. Ausgehend von einer gleichen Geometrie werden 3 verschiedene Annahmen zur Wärmeleitfähigkeit des Bodens simuliert. Die Werte sind der Tabelle 5-5 zu entnehmen.

**Tabelle 5-5: Werte zur Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden**

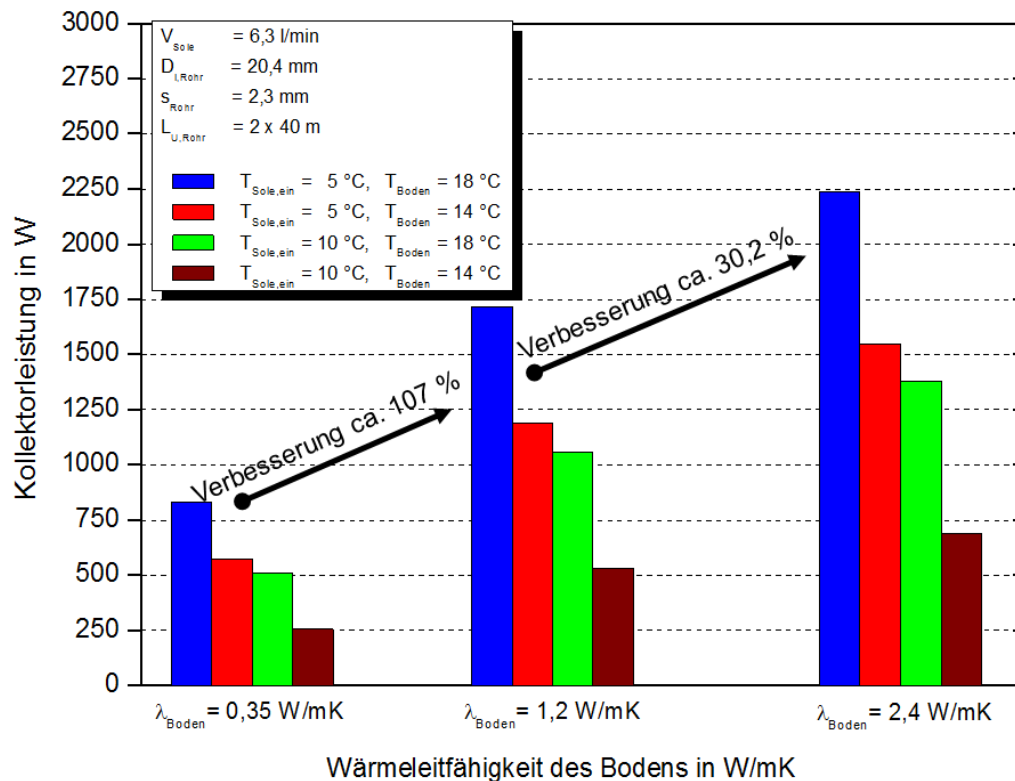
Bodenart/Substanz	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W / m * K
Sand, trocken	0,35
Ton/Schluff, wassergesättigt	1,2
Sand, wassergesättigt	2,4

Die Abbildung 5-11 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen der verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten ausgehend von der Geometrie 2.



**Abbildung 5-11: Vergleich Bodeneigenschaften anhand Geometrie 2**

Die Abbildung 5-12 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen der verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten ausgehend von der Geometrie 3.



**Abbildung 5-12: Vergleich Bodeneigenschaften anhand Geometrie 3**

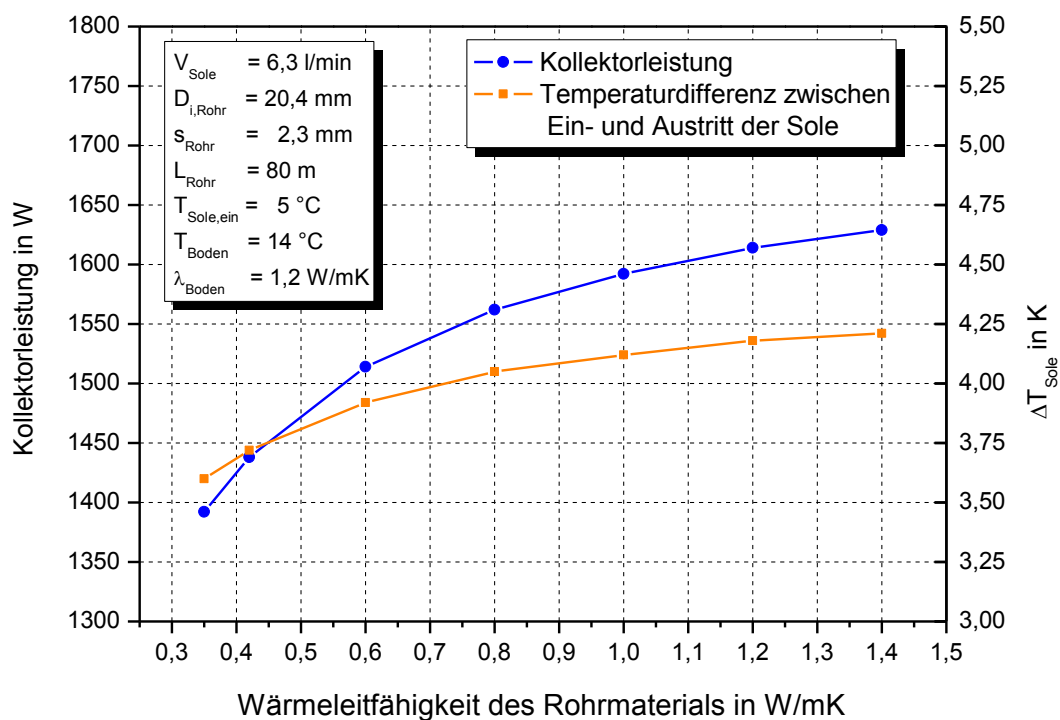
Der Einfluss des Wassergehaltes des Bodens auf die Wärmeleitfähigkeit ist groß. Liegt ein wassergesättigter Boden vor, steigt die Wärmeleitfähigkeit stark an und ermöglicht den Kollektoren einen höheren Wärmeentzug bzw. eine höhere Leistung. Je nach Geometrieform sind, ausgehend von der geringsten Wärmeleitfähigkeit bis hin zur höchsten, Verbesserungen von 156 und 170 % möglich.

Der Vergleich zwischen den beiden Geometrien zeigt, dass die Bauform 2 bei allen angenommenen Bodeneigenschaften bei gleichem Volumenstrom besser abschneidet. Die liegt an der Rohranordnung (siehe Kapitel 5.3).

### 5.7 Variante 5: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials

Um die Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials auf die Kollektorleistung zu bestimmen, werden verschiedene Werte zur Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials für die Geometrie 2 untersucht.

In Abbildung 5-13 ist die Kollektorleistung und der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt der Sole in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials ausgehend von der Geometrie 2 dargestellt.



**Abbildung 5-13: Verlauf der Kollektorleistung und der Temperaturdifferenz der Sole als Funktion der Rohr-Wärmeleitfähigkeit bei Geometrie 2**

Der Vergleich der Simulationsrechnungen zeigt, dass die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials bis zu 1,0 W/m-K zu einer starken Steigerung der Kollektorleistung führt. Bei größeren Wärmeleitfähigkeiten verläuft die Kurve dann flacher.

### 5.8 Variante 6: Wirkung Volumenstrom-Verdoppelung bei Geometrie 3

In Variante 6 wird untersucht, inwieweit sich eine Verdoppelung des Volumenstromes bei Geometrie 3 auf die Leistung des Kollektors auswirkt. Der Volumenstrom sowie die Geschwindigkeit halbieren sich aufgrund der gleichmäßigen Rohraufteilung in zwei parallele U-Rohre. Mit der Verdoppelung des Volumenstromes wird die Geschwindigkeit im Rohr der Geometrie 3 der Geschwindigkeit bei Geometrie 2 angepasst.

Des Weiteren wird dieses Szenario bei drei verschiedenen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 5-5) simuliert.

Nachfolgend sind in den Abbildung 5-14 bis Abbildung 5-16 die Wirkung einer Volumenstrom-Verdoppelung auf die Leistungsentnahme bei Geometrie 3 dargestellt.

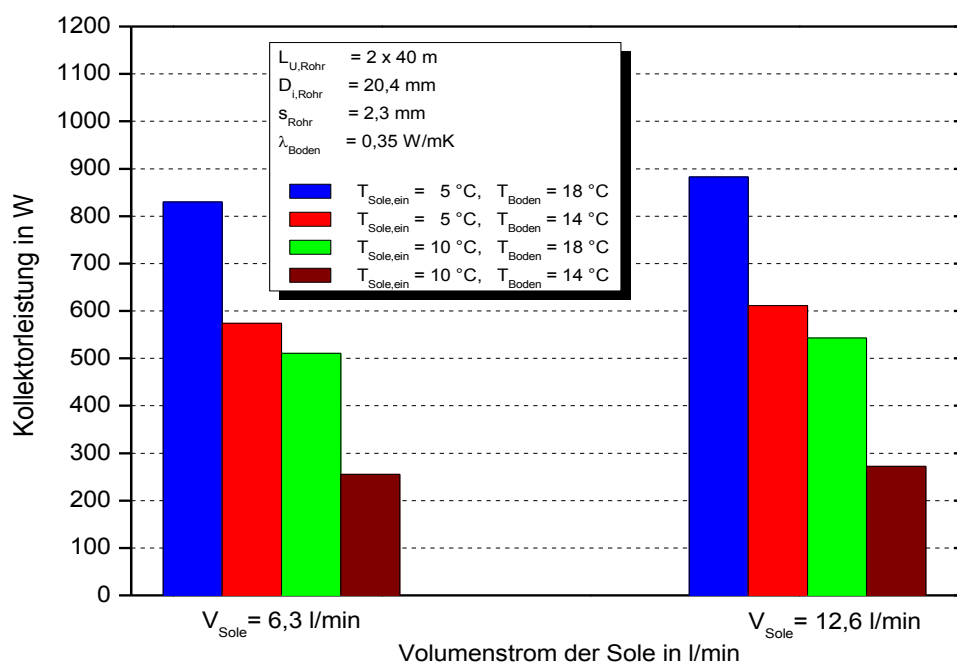


Abbildung 5-14: Verdoppelung der Volumenströme bei Geometrie 3,  $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$

Die Abbildung zeigt eine Verbesserung der Leistung von ca. 6,4 % gegenüber dem Volumenstrom mit  $V_{\text{Sole}} = 6,3 \text{ l/min}$ .

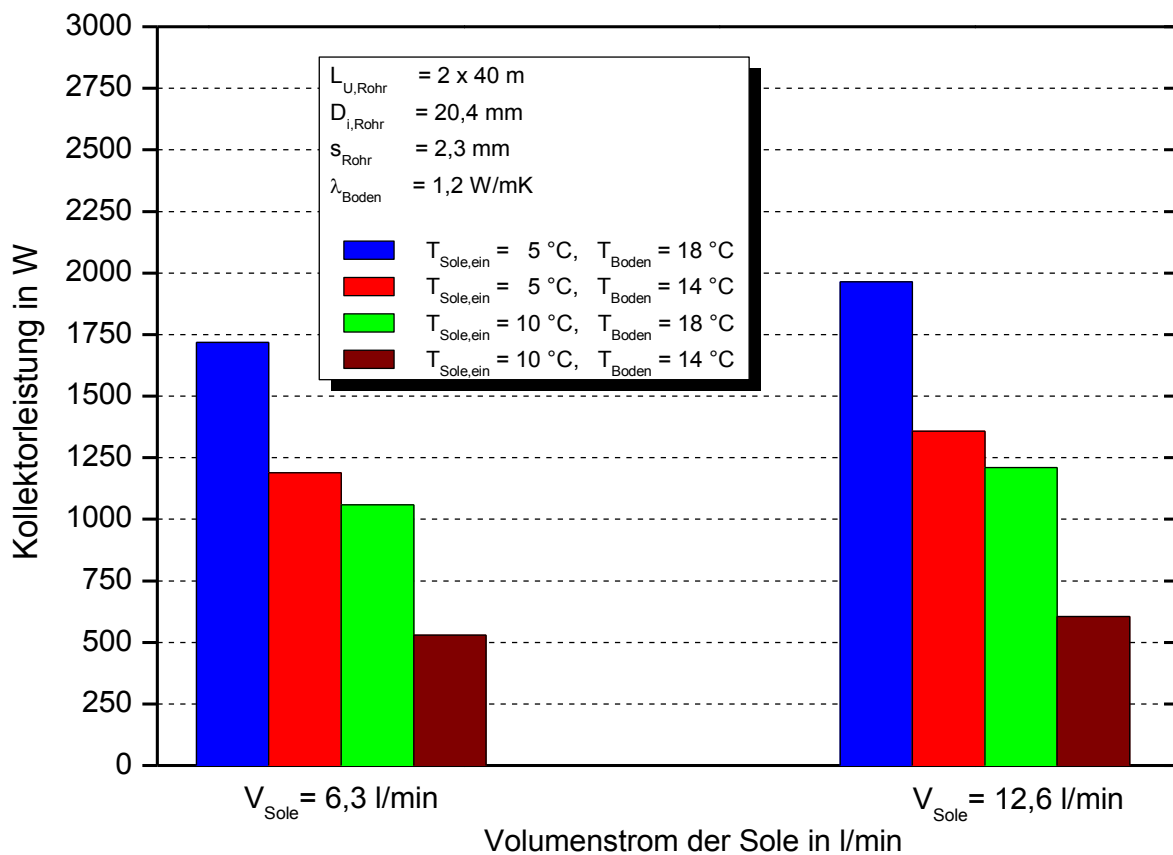


Abbildung 5-15: Verdoppelung der Volumenströme bei Geometrie 3,  $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$

Die Abbildung zeigt eine Verbesserung der Leistung von ca. 14,3 % gegenüber dem Volumenstrom mit  $V_{\text{Sole}} = 6,3 \text{ l/min}$ .

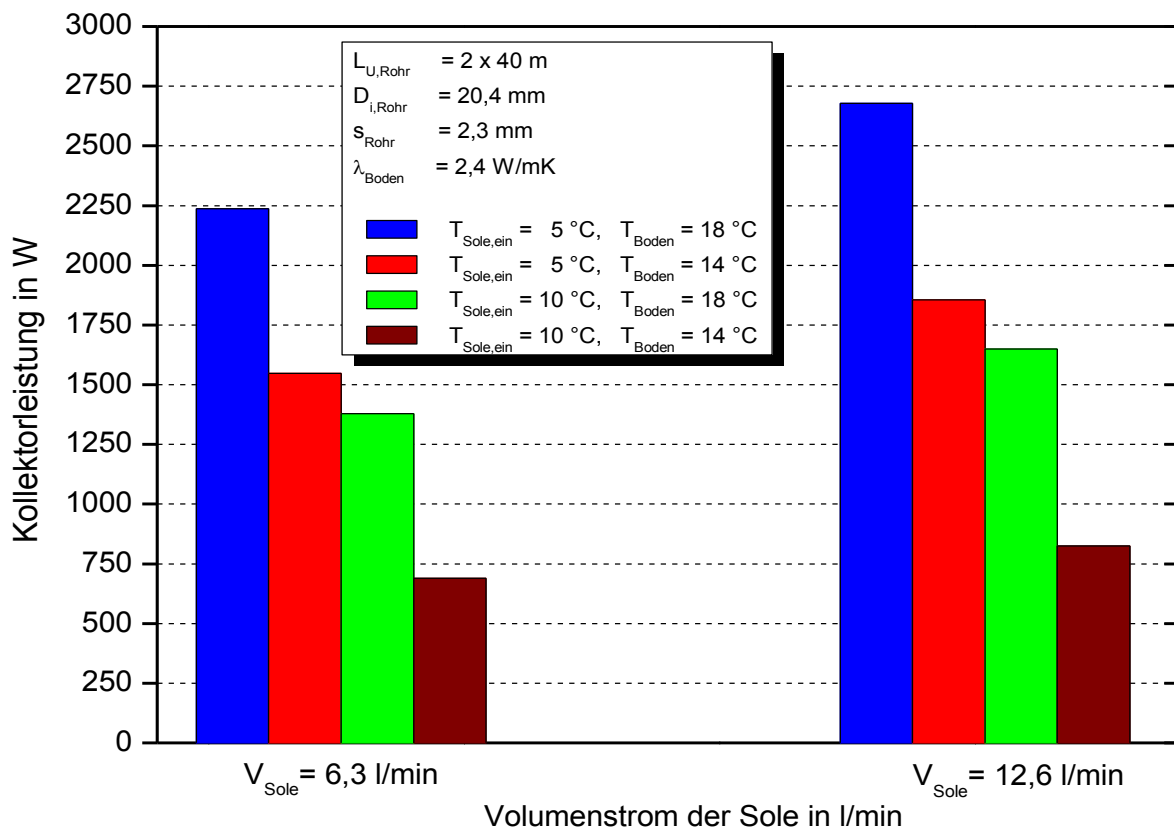


Abbildung 5-16: Verdoppelung der Volumenströme bei Geometrie 3,  $\lambda = 2,4 \text{ W/mK}$

Die Abbildung zeigt eine Verbesserung der Leistung von ca. 19,8 % gegenüber dem Volumenstrom mit  $V_{Sole} = 6,3 \text{ l/min}$ .

### 5.9 Variante 7: Vergleich der Geometrie 2 und 3 bei gleicher Geschwindigkeit und verschiedenen Bodeneigenschaften

In Variante 7 wird untersucht, inwieweit sich die Verdoppelung des Volumenstromes bei Geometrie 3 im Vergleich zu Geometrie 2 auswirkt. Beide Kollektoren haben nun die gleiche Strömungsgeschwindigkeit im Rohr.

Darüber hinaus wird dieses Szenario bei drei verschiedenen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 5-5) numerisch berechnet.

Abbildung 5-17 zeigt die Ergebnisse für Geometrie 2 und 3 mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,32 m/s im Rohr und einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 0,35 W/mK.

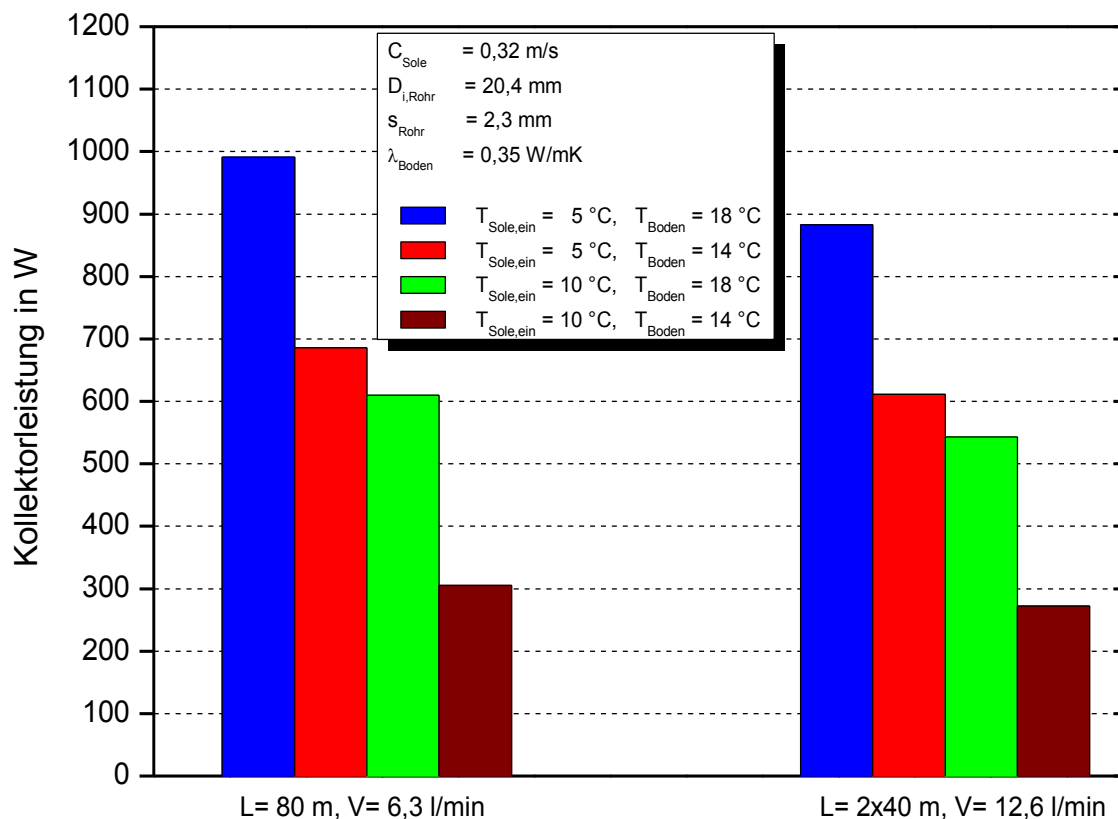


Abbildung 5-17: Geometrie 2 & 3 bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit,  $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$

Die Geometrie 2 schneidet im Gegensatz zu Geometrie 3 bei der Leistung ca. 11 % besser ab.



Abbildung 5-18 zeigt die Ergebnisse für Geometrie 2 und 3 mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,32 m/s im Rohr und einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 1,2 W/mK.

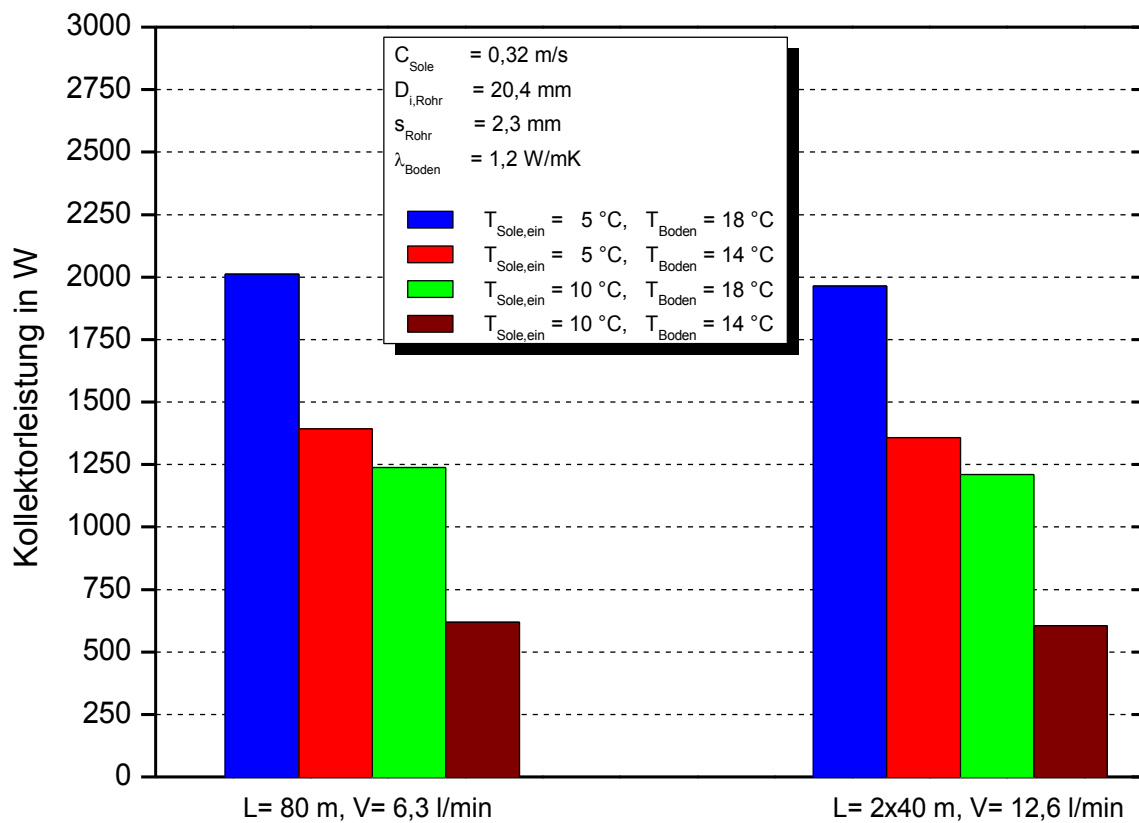


Abbildung 5-18: Geometrie 2 & 3 bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit,  $\lambda = 1,2$  W/mK

Die Geometrie 2 schneidet im Gegensatz zu Geometrie 3 bei der Leistung um 2,3 % besser ab.

Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse für Geometrie 2 und 3 mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,32 m/s im Rohr und einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 2,4 W/mK.

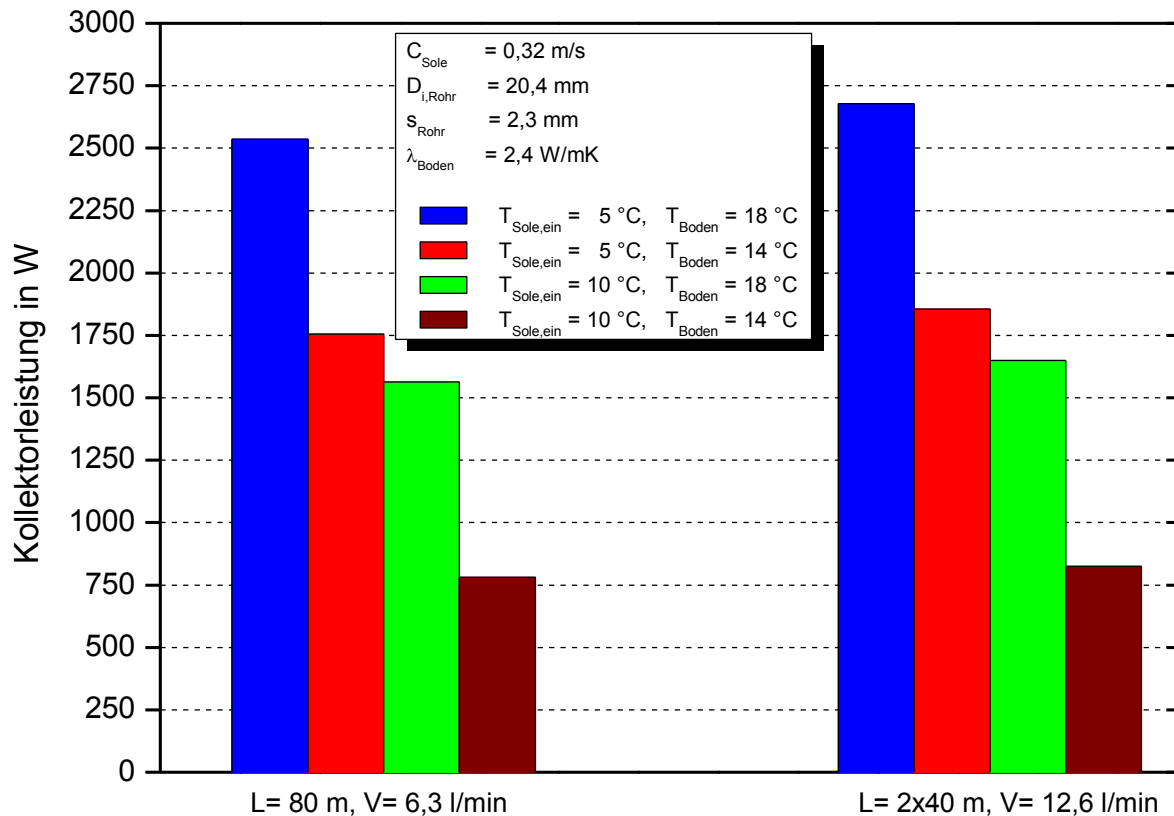


Abbildung 5-19: Geometrie 2 & 3 bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit,  $\lambda = 2,4 \text{ W/mK}$

Bei der höchsten untersuchten Wärmeleitfähigkeit des Bodens schneidet die Geometrie 3 besser ab als Geometrie 2. Die Verbesserung der Leistung liegt bei ca. 5,6 % gegenüber der Geometrie 2 (L=80 m,  $V_{\text{Sole}} = 6,3 \text{ l/min}$ ).

Des Weiteren beträgt der Druckverlust bei Geometrie 3 die Hälfte des Druckverlustes im Vergleich zu Geometrie 2. Bei einer Auslegung lohnt sich eine Verdoppelung des Volumenstromes bei Geometrie 3, wenn eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Bodens vorliegt (unter Berücksichtigung gleicher Geschwindigkeit in beiden Rohrgeometrien).

### 5.10 Numerische Auslegung verschiedener Kollektorgeometrien bei unterschiedlichen Parametern

Im Vorfeld der konkreten Anlagenplanung werden die verschiedenen Kollektorgeometrien unter verschiedenen Rahmenbedingungen simuliert, um den Einfluss verschiedener Größen zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-20 dargestellt. Gezeigt werden die Entnahmelastungen, die Druckverluste und die Temperaturspannungen bei drei verschiedenen Kollektorgeometrien (Geometriebeschreibung siehe Kapitel 5.2 und 5.3) in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeiten des Bodens. Als Randbedingung geht man von einer gleichen Geschwindigkeit, einem gleichen Rohrdurchmesser sowie Rohrwanddicke und einer einheitlichen Temperaturdifferenz von Bodentemperatur und Soleeintrittstemperatur von 9 K bei den untersuchten Fällen aus.

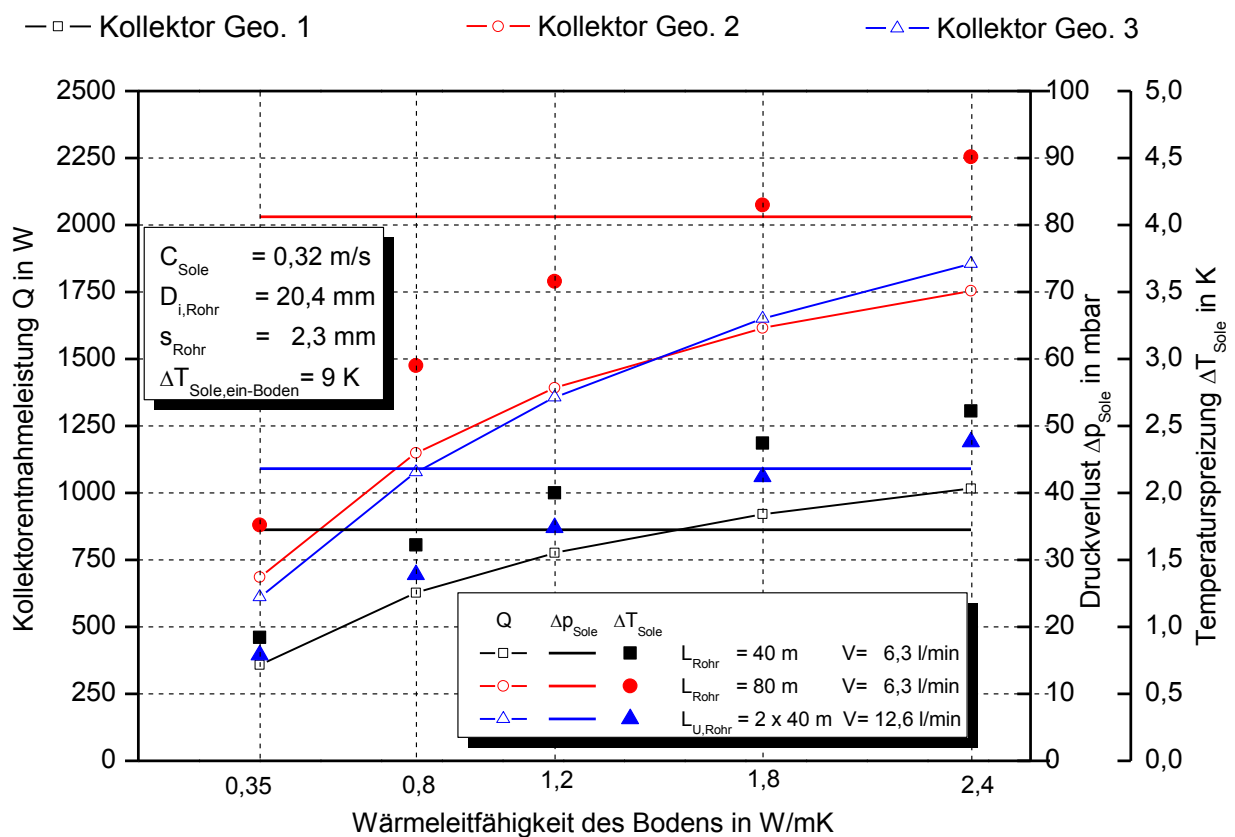


Abbildung 5-20: Kollektorentnahmelastung bei unterschiedlichen Parametern

---

Aufgrund der geringen Rohrlänge (40 m) von Geometrie 1 ist die Kollektor-Entnahmeleistung niedriger als die anderen beiden Kollektorgeometrien. Bei einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens von mehr als ca. 1,5 W/mK erreicht Geometrie 3 aufgrund seiner Bauform eine höhere Entnahmeleistung als Kollektor Geometrie 2. Wegen dem höheren Volumenstrom in Geometrie 3 werden die niedrigsten Temperaturspreizungen zwischen Soleintritts- und Austrittstemperatur erreicht. Aufgrund der Rohrlänge, die in einem Strang verläuft, ist der Druckverlust bei Geometrie 2 im Vergleich zu gleichlangen U-Rohr-Geometrie 3 ungefähr doppelt so groß.

---

## 6 Planung und Auslegung der Feldtestuntersuchung

### 6.1 Planung der Untersuchung

Das Vorhaben beinhaltet den Bau eines Versuchsstands zur Messtechnikaufnahme und Pilotanlagen zum Eignungstest bzw. Vergleich der einzelnen Verlegeverfahren. Das Augenmerk liegt insbesondere auf dem neu entwickelten Verfahren. Hierzu werden in mehreren Anlagen an verschiedenen Standorten jeweils drei Kollektorkreise installiert:

- ein konventioneller Kollektorkreis (Nr. 1) mit 40 m Gesamtlänge in herkömmlicher Grabeneinbringung zur Datenermittlung und als Referenzanlage.
- ein Kollektorkreis mit einem Kompakt 4-fach Kollektor (Nr. 2). Dieser ist ähnlich einer Doppel-U-Rohr-Sonde mit dem Unterschied seiner Verlegeweise und hat bei einer horizontalen Verlegeweise eine Baulänge von 20 m und damit eine effektive Länge von 80 m. Der Kollektorkreis wird mit einem neuartigen Raketenspülverfahren eingebracht.
- der dritte Kollektorkreis (Nr. 3) ist ein normaler Kollektor mit einer Gesamtlänge von 40 m und wird ebenfalls mit einem neuartigen Raketenspülverfahren eingebracht.

Alle Kollektoren werden auf gleicher Tiefe von 1,2 m und bei gleichen geologischen und hydrologischen Gegebenheiten eingebracht. Die angestrebten Leistungen liegen je Kollektorkreis bei ca. 0,6 kW.

Zur Auslegung der Anlagen ist die in Abbildung 6-1 dargestellte Oberfläche erstellt worden. Hiermit werden überschlägig die jeweiligen Systemparameter ermittelt. Alle Pilotanlagen zum Vergleich der Verlegeverfahren sind in Bauart und Material gleich.

### Strömungs- und Wärmetechnische Berechnungen des Ethylenglykollkreislaufs im Flächenkollektor

● nach bzw. bei Temperaturmessung  $\vartheta_2$  wird die Regelgröße ( $\vartheta_4$ ) erfasst - somit Temperaturerhöhung durch Pumpe kompensiert

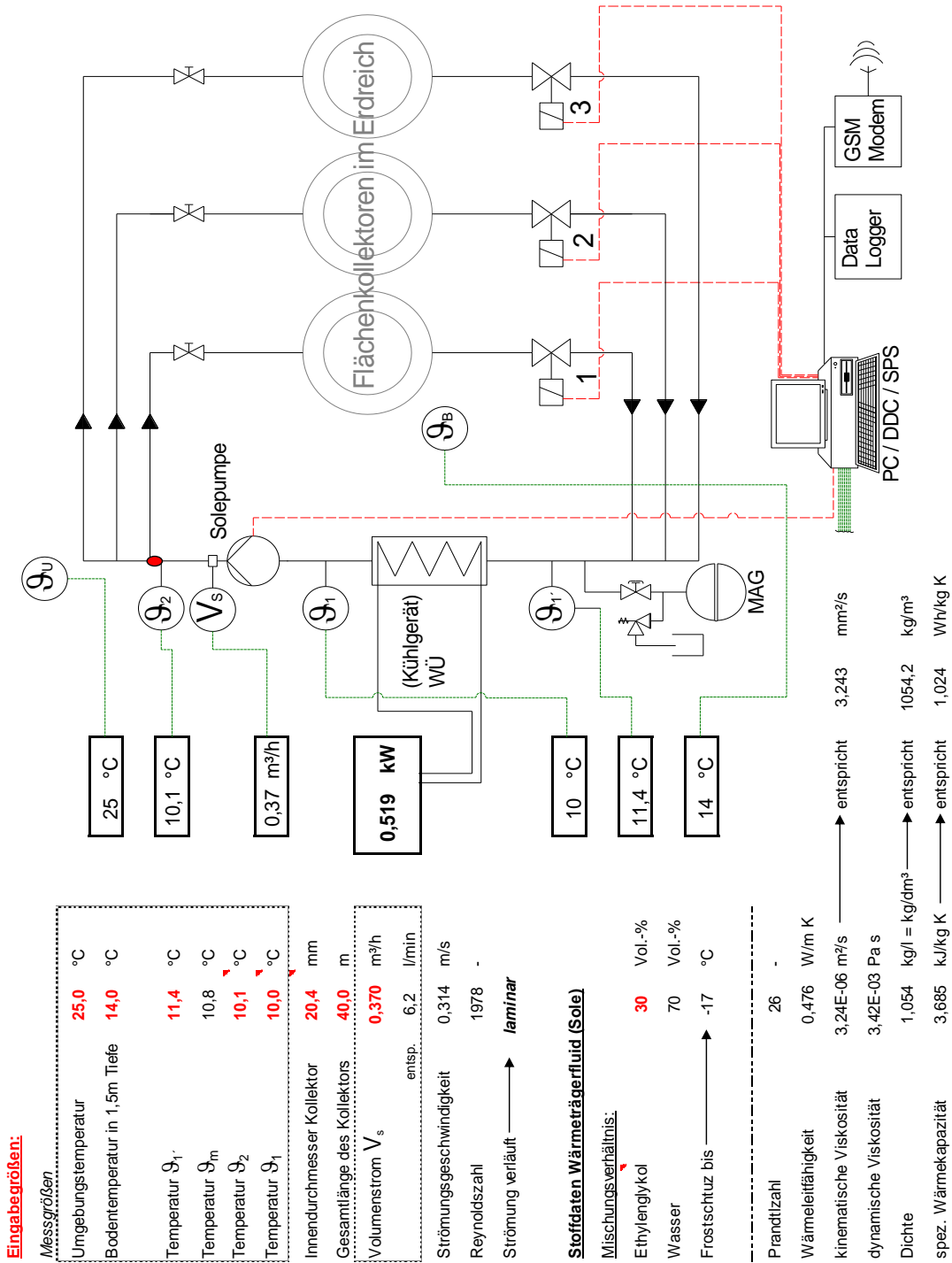


Abbildung 6-1: Strömungs- und Wärmetechnische Berechnung des Ethylenglykollkreislaufs im Flächenkollektor

## 6.2 Errichtung einer Pilotanlage

Zur Ermittlung der relevanten Kenndaten wird eine erste Versuchsanlage in Berlin-Wernsdorf errichtet. Es sind, wie in der Planung, drei unterschiedlich eingebrachte und verlegte Kollektoren aufgebaut. Ihre Verlegeform ist in der Abbildung 6-2 skizziert.

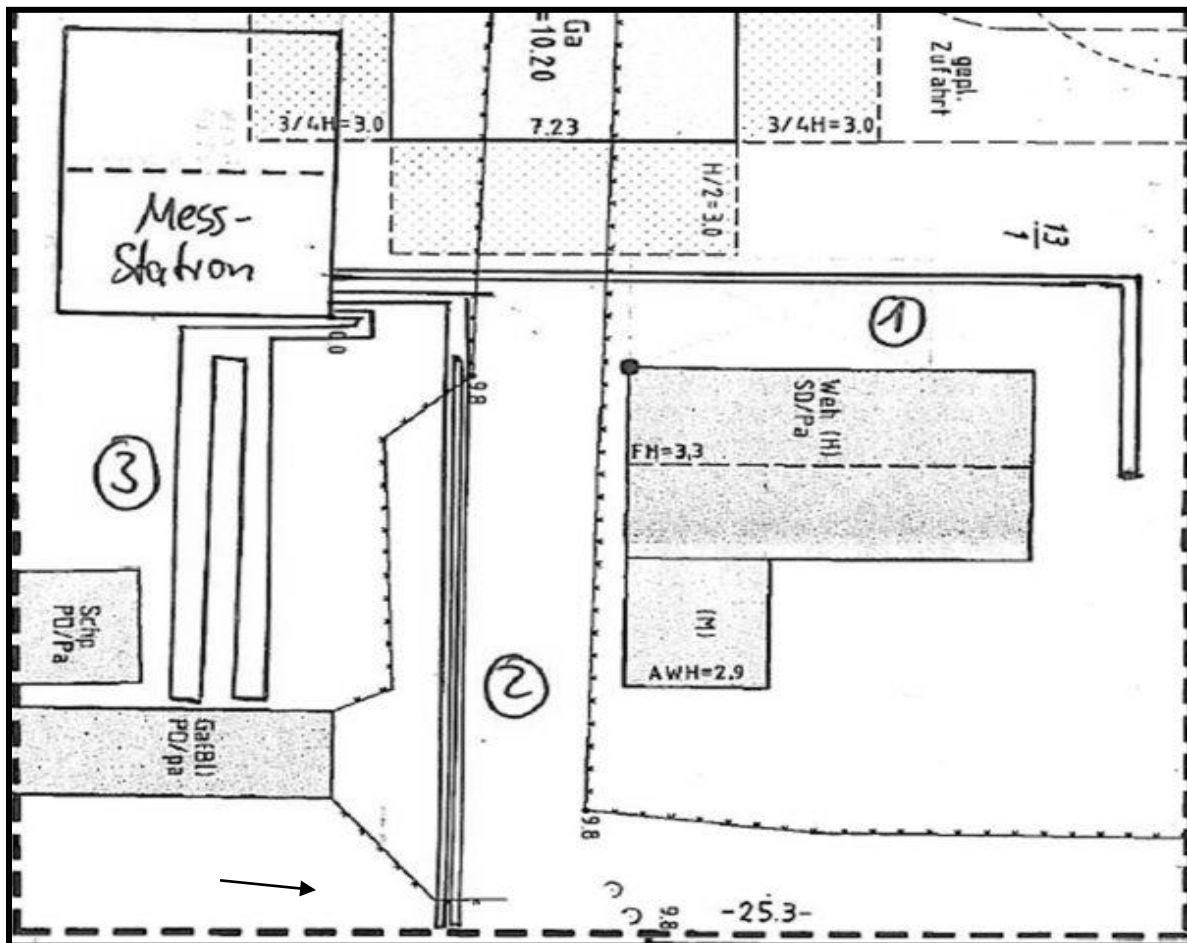
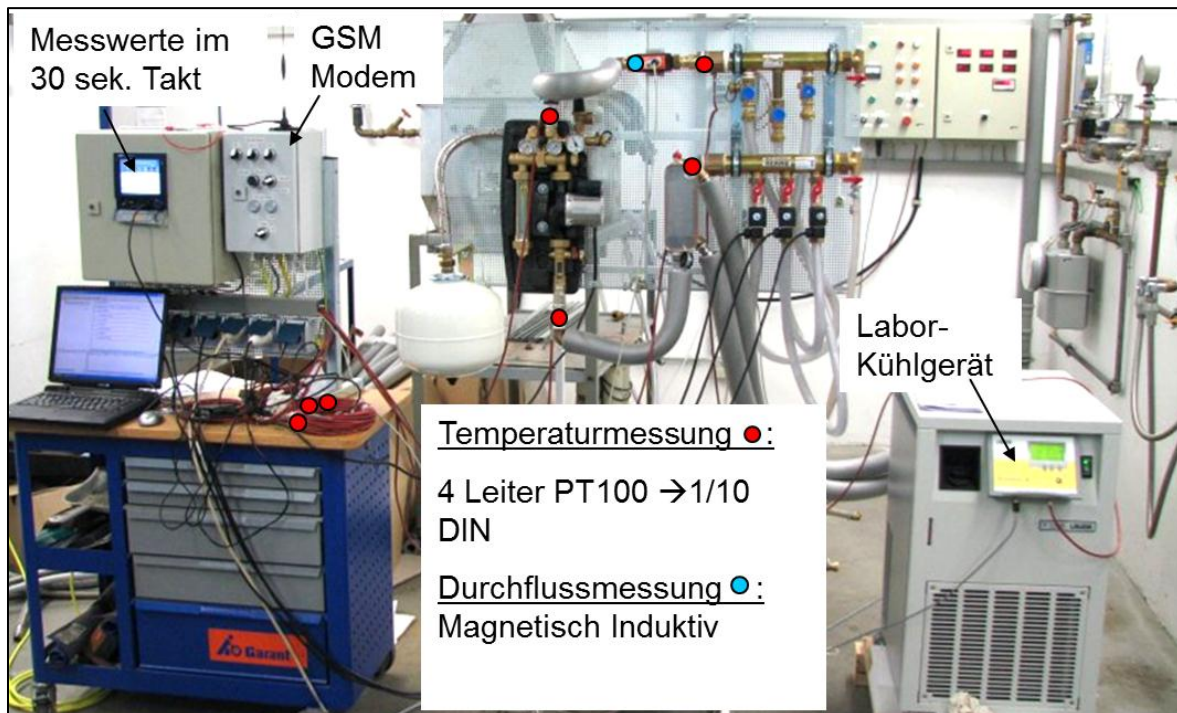


Abbildung 6-2: Skizze vom Versuchsanlage

Die drei auf dem Versuchsfeld installierten Kollektoren werden monatlich untersucht. Dabei wird die Wärmeaufnahme-fähigkeit der Kollektoren mit Hilfe einer mobilen Messeinrichtung bei reproduzierbaren Betriebsbedingungen zuverlässig ermittelt.

Die Wärmeleistung der installierten Kollektoren und die Bodentemperaturen werden kontinuierlich mit Temperaturfühlern vom Typ PT 100 erfasst. Die Durchflussmengen werden magnetisch-induktiv mit einem Volumenstrommesser MIK der Firma Kobold ermittelt. Mit einer EDV werden die Daten gespeichert und in regelmäßigen Abständen ausgewertet. Die Ermittlungspunkte der

Bodentemperaturen sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Der komplette Versuchsaufbau (hier in der Versuchsbox am GWI) ist in Abbildung 6-3 zu sehen. Dabei ist links der Datalogger zur Datenaufzeichnung zu sehen, in der Mitte der Soleverteiler mit seinen Steuerventilen und Temperaturmesspunkten, sowie rechts der Wärmeübertrager, welcher die reale WP simuliert.



**Abbildung 6-3: Pilotanlage im Versuchsaufbau**

Abhängig von der Jahreszeit werden die Kollektorkreise unterschiedlich von Sole durchflossen. Die Steuerung erfolgt durch Bausteine der Firma Siemens, welche mit der Firmensoftware LOGO! arbeiten. Diese sind in einem Automaten verbaut und steuern das Öffnen der jeweiligen Magnetventile. In der Sommerzeit, vom 11. April bis zum 9. Oktober, werden die Kollektoren im 5 Stunden Turnus abwechselnd durchflossen. In der Winterzeit, vom 10. Oktober bis zum 10. April, erfolgt ein längerer Steuerungszyklus. Der Wechsel zwischen den Kollektorkreisen geschieht nun wöchentlich, da in dieser Zeit die Regeneration des Erdreiches nur sehr langsam erfolgt. Die Überschneidung der Ventilöffnungszeiten liegt bei ca. 1 Minute.

Nachfolgend ist eine schematische Darstellung der Anlage in Abbildung 6-4 dargestellt.



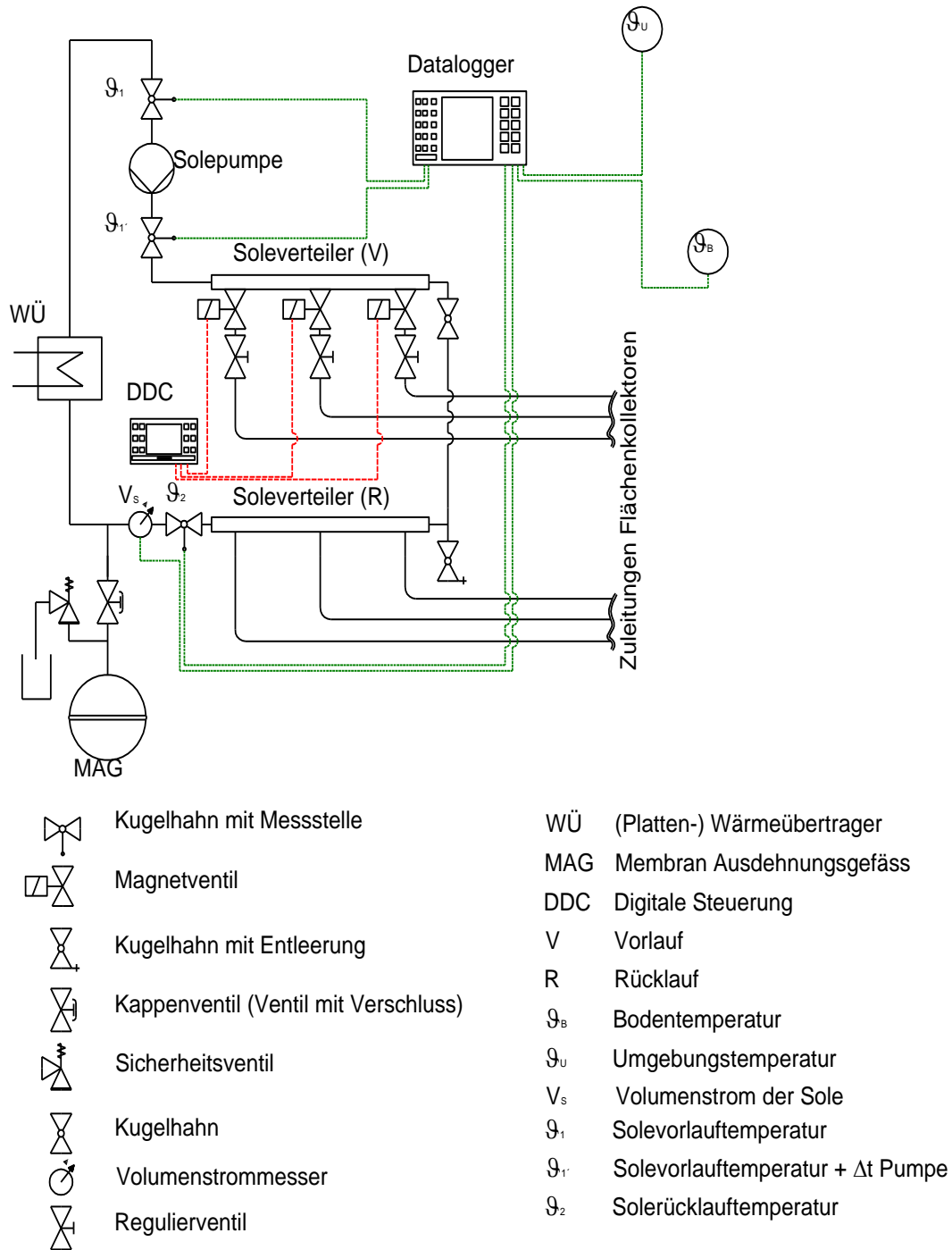


Abbildung 6-4: Schematischer Aufbau der Pilotanlage

---

### 6.3 Wärmeübertrager

Anstelle der Wärmepumpe ist ein Wärmeübertrager (WÜ) bzw. eine Kältemaschine der Firma Lauda vom Typ T 2200 installiert. Dabei handelt es sich um ein gängiges Gerät aus dem Laborbereich, welches in der Lage ist, präzise Temperaturbereiche einzuhalten. Laut Herstellerangaben liegt das Temperaturtoleranzfeld bei  $\pm 0,2$  K. Infolge dieser konstanten Wärmeentzugsleistung kann bei der Auswertung eine präzise Aussage zu den jeweiligen Kollektoren getroffen werden.

Jahreszeitenabhängig werden zwei unterschiedliche Kühltemperaturen gefahren. Durch manuelles Umschalten erfolgt der Wechsel zwischen Sommer und Wintertemperatur. Die Sommertemperatur beträgt  $7\text{ °C}$  vom 8. Juni bis zum 24. August und  $3\text{ °C}$  in der Winterzeit vom 25. August bis zum 7. Juni. Ziel dieser Umschaltung ist eine möglichst gleich bleibende Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- (Soleeintrittstemperatur) und Bodentemperatur bei unterschiedlichen Jahreszeiten. Somit wird z.B. sichergestellt, dass selbst im Winterbetrieb bei geringer Bodentemperatur eine Temperaturdifferenz zum Vorlauf existiert und die Funktion der Anlage gewährleistet wird. Es ist davon auszugehen, dass sich die Temperaturen ähnlich wie in Abb. 2-6 dargestellt verhalten. Danach wären die Temperaturen zwischen Dezember und März unter  $7\text{ °C}$ , eine Funktion wäre nicht möglich. Zusätzlich entspricht dies dem Systemverhalten der meisten WP, diese besitzen auch je nach Jahreszeiten und Heizbedarf unterschiedliche Vorlauftemperaturen.

---

## 6.4 Bodengutachten

Um die geologischen und hydrologischen Gegebenheiten zu kennen, wurde ein Bodengutachten für den Standort Berlin I erstellt und ergab folgende Ergebnisse:

- schluffig und mittelsandige Feinsande teils anlehmig SU (sehr locker)
- bei mitteldichte Lagerung  $D= 0,3 \dots 0,4$
- wasserführend ab 1.3 m (geschätzter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3 \dots 5 \times 1 / 10.000 \text{ m / s}$ )
- Feuchtwichte, Gamma  $18 \text{ kN / m}^3$  (unter Auftrieb 10, wassergesättigt  $20 \text{ kN / m}^3$ )
- Dichte = Feuchtwichte (Gamma) / Erdbeschleunigung ( $g$ ) =  $(18 \text{ kN / m}^3) / (9,81 \text{ m / s}^2) = 1834 \text{ kg / m}^3$
- Bodenklasse nach DIN 18300 SE; SU Klasse 3

### Beurteilung:

Es handelt sich hier um einen Boden der Klasse 3. Dies ist laut DIN 18300 SE ein leicht lösbarer Boden, bestehend aus nichtbindige bis schwachbindige Sande, Kies und Sand-Kies-Gemische mit bis zu 15 % Beimengen an Schluff und Ton (Korngröße kleiner als 0,05 mm) (siehe Kapitel 2.4). Die zu erwartenden Entzugsleistungen werden leicht überdurchschnittlich mit etwa  $25 \text{ W / m}^2$  sein. Zu beachten gilt besonders der hohe Grundwasserspiegel der bei 1,3 m Tiefe liegen kann. Eventuell sind hier Einflüsse zu erwarten. Der Sandanteil begünstigt die Wärmeübertragung positiv. Von einer guten Anschlammung ist auszugehen, hiermit werden die Lufteinschlüsse gering gehalten und ebenfalls eine gute Wärmeübertragung begünstigt.

## 6.5 Material der Kollektorrohre

Als Kollektorrohre dienen Polyethylen-Rohre, sie sind säure- und witterungsbeständig. Ihr geringes Gewicht und die gute Verarbeitungsfähigkeit stellt für dieses Anwendungsgebiet das Optimum dar. Es wird eine Lebensdauer von 80 Jahren garantiert, andere Materialien haben eine weitaus kürzere Lebensdauer oder sind mit zu hohen Kosten verbunden. Andere Materialien wie z.B. Beton oder Stahl entsprechen nicht dem Stand der Technik und sind mit vielen Problematiken oder zu hohen Kosten behaftet. Einen kurzen Überblick der Werkstoffkenndaten befindet sich in nachfolgend in Tabelle 6-1.

**Tabelle 6-1: Datenblatt Kollektorrohr - 138 -[32]**

Typ		PE-HD-Rohr	
Durchmesser Innen		20,4	mm
Außen		25	mm
Durchmesser Bohrung		90	mm
Werkstoffnummer		1411	
Dichte	ISO 1183	0,963	g / cm <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,42	W / K * m
max. Temperatur kurzzeitig		100	°C
max. Temperatur dauernd		90	°C
min. Anwendungstemperatur		-80	°C
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	< 0,1	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	< 0,1	%

---

## 6.6 Wärmeträgerfluid

Als Wärmeträgerfluid dient ein Gemisch aus Ethylenglykol zu 30 Vol.-% ( $C_2H_6O_2$ ) und Wasser zu 70 Vol.-% ( $H_2O$ ). Hiermit wird eine Frostsicherheit von bis zu  $-17^\circ C$  erreicht. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei  $0,467 W / m * K$ , sowie die spezifische Wärmekapazität bei  $3,685 kJ / kg * K$ .

## 6.7 Rakete mit Spülverfahren

Eingebracht werden die Kollektoren 2 und 3 mit einem neu entwickelten Verfahren<sup>2</sup> (siehe Kapitel 4). Es ist eine Kombination aus einer Erdrakete und Horizontaleinspülung. Das Prinzip läuft in zwei Takten ab, der Meißelkopf erstellt mit voller Energie eine Pilotbohrung, anschließend schlägt das Gehäuse nach. Zusätzlich befinden sich an den Seiten des Kopfes Düsen, aus denen eine Wassereinspülung erfolgt. Vorteilhaft ist hierbei, dass eine schnelle Vortriebsgeschwindigkeit möglich ist, da gerammt wird, mittels Pressluft und außerdem eine Einspülung den Vortrieb gewährleistet, sowie die Reibungskräfte verringert. Folge aus der höheren Vortriebsgeschwindigkeit sind Verkürzung der Arbeitszeit und somit eine Kostenreduktion. Durch die Einspülung sind geringe Überdeckungsfaktoren ausführbar, da das Erdreich nur stückweise gestaucht und zum anderen Teil ausgespült wird. Dies ist besonders für diese Anwendung geeignet, da eine Tiefe von 1,2 m genutzt wird und ein Überdeckungsfaktor von 6 resultiert. Ein weiterer Vorteil hat die Einspülung aufgrund ihrer Verschlammung, hier kommt es zu einer Schließung der Klüften im Erdreich und daher zu einem verbesserten Kontakt bzw. weniger Lufteinschlüsse zwischen dem eingebrachten Kollektor und dem Erdreich.

Laut Aussage der Herstellerfirma kostet die Einbringung für eine 6 kW Standard Anlage zwischen 2.000–3.000 € einschließlich Materialkosten, bei normalen Boden (Klasse 3) (siehe Bodeneinteilung in Kapitel 2.4) mit einer angenommenen Entzugsleistung von  $25 W / m^2$ .

---

<sup>2</sup> Patent der Firma BEGA.tec GmbH

---

## 7 Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung erfolgt über einen Bildschirmschreiber Jumo Logoscreen nt. Dieser Datenlogger erfasst sekundlich das Systemverhalten. Die ermittelten Messgrößen sind:

- 1 = Temperatur Solepumpeeintritt
- 1' = Temperatur Kollektorausritt
- 2 = Temperatur Solepumpeaustritt (Kollektoreintritt)
- R = Regeltemperatur (Kollektoreintritt)
- B1 = Bodentemperatur am Punkt BT1
- B2 = Bodentemperatur am Punkt BT2
- B3 = Bodentemperatur am Punkt BT3
- I = Innenraumtemperatur
- A = Außentemperatur
- $\dot{V}$  = Durchflussmenge
- Datum und Uhrzeit

Die Messtechnik besteht bei dieser Anlage aus einen Volumenstrommesser, sowie neun Temperaturfühlern. Die jeweiligen Ermittlungspunkte sind in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-4 dargestellt.

Über einen Datenschreiber der Firma Jumo werden die Messwerte gesichert und automatisch geprüft. Über ein GSM-Modem ist das System fernadministrierbar und die Daten werden per GPRS ans GWI übertragen. Zur Zusatzsicherung dient eine Compact-Flash-Speicherkarte, die mit beschrieben wird. Entgegen der Darstellung in Abbildung 6-1 wurde der Einfachheit halber im Feldtest kein PC mit eingebunden. Er diente lediglich in der Versuchsbox zur direkten Systemüberwachung.

Um eine fehlerfreien Datenübermittlung zu gewährleisten, wird eine Paritätskontrolle durchgeführt. Die Datenpakete werden automatisch auf eine zuvor bestimmte Anzahl Datenmengen kontrolliert. Bei einer Abweichung kommt es zur Auslöschung des unvollständigen Datenpaketes.

## 7.1 Temperaturfühler

Als Temperaturfühler werden PT 100 Sensoren nach DIN 60751 eingesetzt. Dieser Sensor ist ein Widerstandsthermometer (Kaltleiter), welcher bei zunehmender Temperatur seinen Widerstand erhöht. Hierbei wird eine in Magnesiumoxidpulver eingebettete Platinwendel oder Folie mit Strom durchflossen. Eine Änderung des Stromsflusses lässt Rückschluss auf den Widerstand zu und ermöglicht eine Temperaturbestimmung. Die Vorteile liegen in der einfachen und schnellen Auswechselbarkeit, da keine aufwendige Neukalibrierung der Messkette erforderlich ist. Die „Niederohmigkeit“ bietet den Vorteil, gegenüber elektromagnetischen Wellen, nahezu resistent zu sein. Für diesen Temperaturbereich eignen sich die PT 100 wesentlich besser als Thermoelemente, da die Messgenauigkeit in diesem Temperaturbereich wesentlich präziser ist, da die Messkette einfacher aufgebaut und dadurch weniger anfällig gegen Störgrößen ist. Die 100 bei der Bezeichnung ist stellvertretend für den Nennwiderstand  $R_0$  von  $100 \Omega$  bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Das Toleranzfeld liegt bei der hier verwendeten Klasse B bei  $1 / 10 \text{ DIN}$ . Das DIN Toleranzfeld ist in der der Tabelle 7-1 dargestellt.

**Tabelle 7-1: Grenzabweichung Pt 100 Temperaturfühler**

Grenzabweichung Pt 100 Thermometer nach DIN 60751		
Temperatur	Klasse B	
$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$\Omega$
-200	$\pm 1,3$	$\pm 0,56$
-100	$\pm 0,8$	$\pm 0,32$
0	$\pm 0,3$	$\pm 0,12$
100	$\pm 0,8$	$\pm 0,30$
200	$\pm 1,3$	$\pm 0,48$

Der hier eingesetzt Temperaturfühler wird mit einer so genannten Vierleitertechnik genutzt. Das heißt, dass entgegen der konventionellen Zweileitertechnik, bei der die Widerstände der Zuleitungen

mit gemessen werden, kann hier der Widerstand nur vom Messfühler ermittelt werden. Wie in Abbildung 7-1 dargestellt, sind jeweils zwei Leiter mit den Sensoranschlussdrähten verbunden. Es entstehen zwei getrennte Messkreise. Ein Messkreis wird zur Stromversorgung "I", der zweite zur Messung des Spannungsabfalls "U" genutzt. Da der Eingangswiderstand der Auswerteelektronik um ein Vielfaches höher als der Leitungswiderstand liegt, ist der ermittelte Spannungsabfall dann unabhängig von den Eigenschaften der Zuleitungen. Hiermit können auch Messungen über große Kabellängen ohne eine nennenswerte Beeinträchtigung erfolgen.

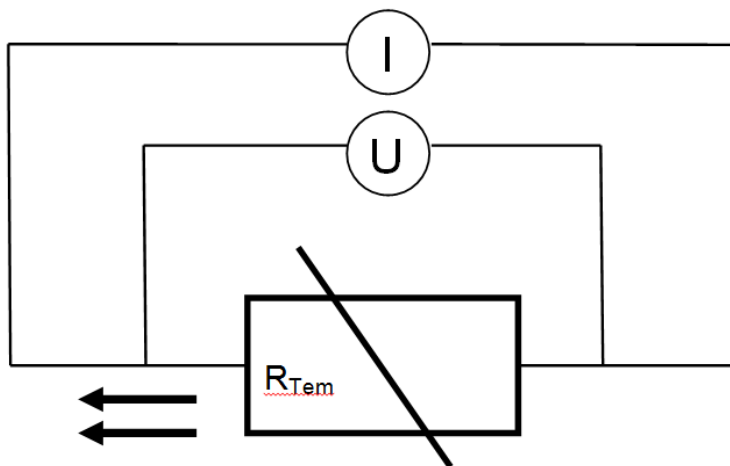


Abbildung 7-1: Darstellung der Vierleitertechnik



---

## 7.2 Volumenstrommesser

Die Volumenstrommessung erfolgt magnetisch-induktiv. Dabei wird ein nicht magnetisches Rohr, komplett elektrisch abgeschirmt, mit dem Messgut durchflossen. Voraussetzung hierfür ist eine elektrische Mindestleitfähigkeit. Ein umschließender Magnet richtet hierbei die Teilchen nach ihren Ladungen. Diese kann an den anliegenden Messelektroden gemessen werden. Da Spannung und Volumenstrom sich proportional zueinander verhalten, kann daraus der Volumenstrom bestimmt werden. Die Messung ist unabhängig vom Medium und dessen stofflichen Eigenschaften, wie Dichte, Viskosität und Temperatur. Der eingesetzte Volumenstrommesser ist ein kompakter, magnetischer, induktiver Durchflussmesser vom Typ: MIK der Firma Kobold.

Ansprechzeiten: ca. 3 s bei ansteigender Strömung

ca. 1 s bei absteigender Strömung

Messbereich: 0,8 bis 18 L / min

## 7.3 Stammdatenbearbeitungen

Die Datenbank zeigt an, welche Größe die jeweiligen Systemparameter haben. Dies gewährleistet eine schnelle und überschaubare Beurteilung der Messergebnisse und erkennt Systemveränderungen bzw. Fehler schnell und zuverlässig. Die Daten werden mit der gerätekompatiblen Jumo Software zu einer Textdatei (.txt) umgewandelt und anschließend in Microsoft Excel verarbeitet. Dabei ermöglichen zuvor erstellte Makros die schnelle Ergänzung der Datenreihen, sowie eine komfortable Erstellung der Auswertungsdiagramme.

## 8 Auswertung der Messdaten, Standort Berlin I

### 8.1 Standort Spezifikationen Berlin I (Wernsdorf)

Es handelt sich bei diesem Standort um die Pilotanlage, die in Berlin-Wernsdorf errichtet wird. Wie in der Planung (siehe Kapitel 6 „Planung und Auslegung der Feldtestuntersuchung“ beschrieben, werden drei unterschiedlich eingebrachte und verlegte Kollektoren aufgebaut. Ihre Verlegeform ist in der Abbildung 6-2 skizziert und wurde von der Firma BEGA.tec GmbH installiert.

Die Kollektorkreise sind aufgrund der Platzverfügbarkeit im Gegensatz zur Auslegungsplanung um die Hälfte gekürzt. Um verschiedene Bodentemperaturen (durch z. B. Schattenflächen) zu berücksichtigen, wurden die Messergebnisse durch einen Korrekturfaktor vergleichbar gemacht (siehe nachfolgendes Kapitel).

Die Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2 zeigen die Installationen der drei Kollektorkreise sowie die Messdatenerfassung am Standort.

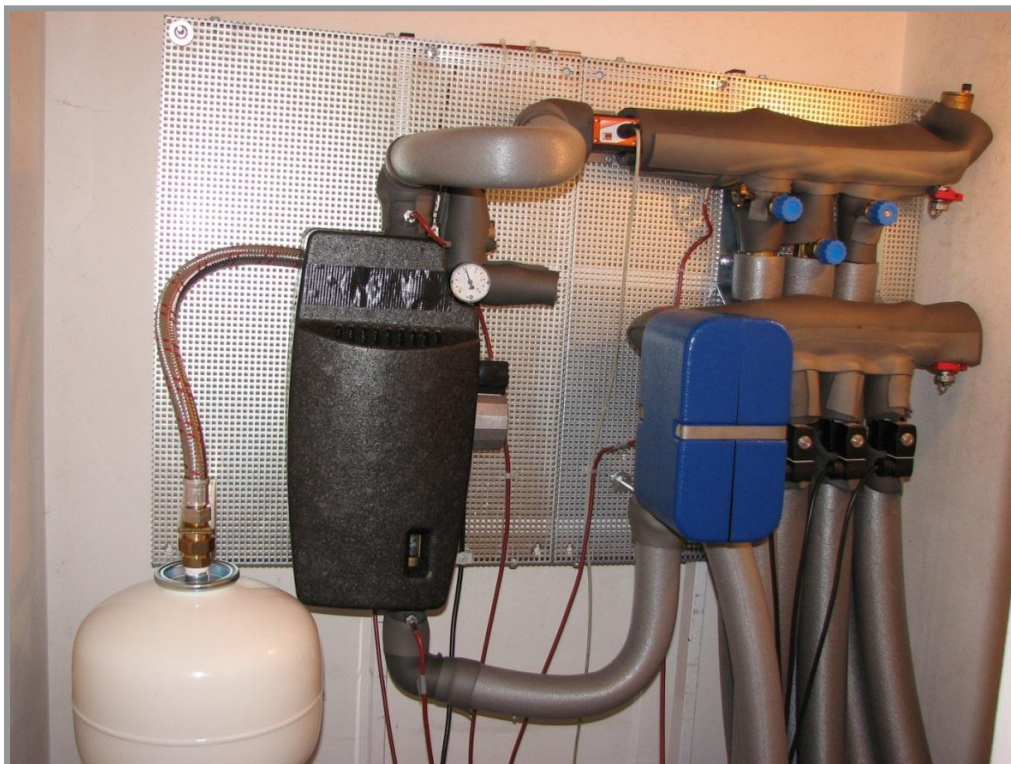


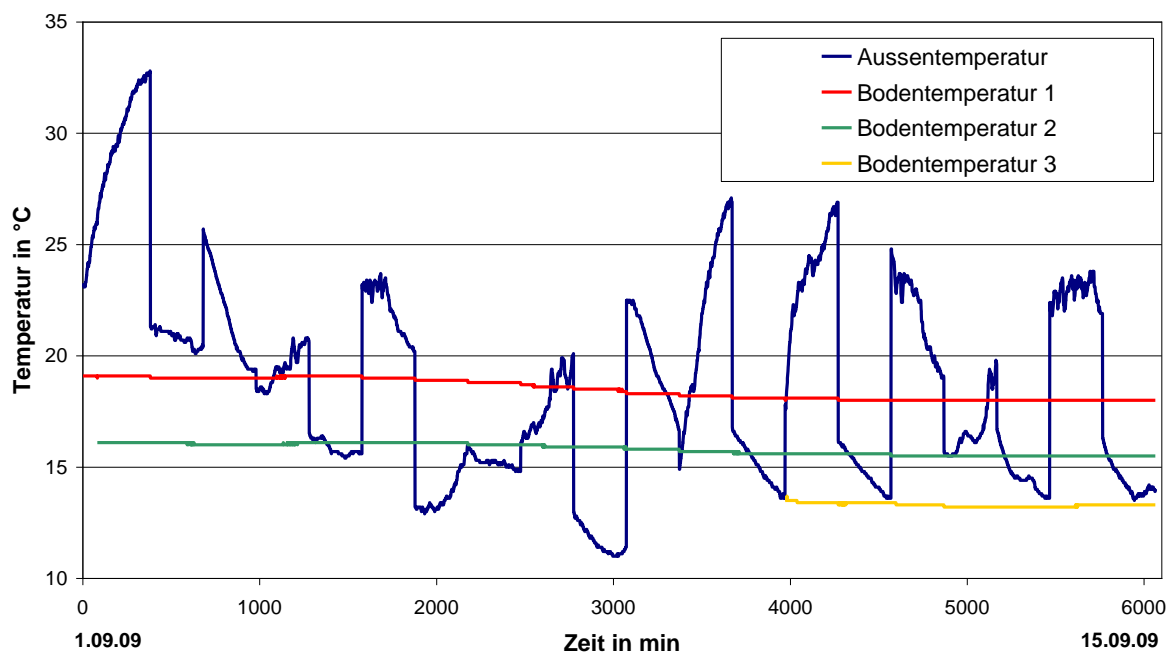
Abbildung 8-1: Kollektoransteuerung am Standort Berlin-Wernsdorf



**Abbildung 8-2: Messdatenerfassung am Standort Berlin-Wernsdorf**

## 8.2 Beurteilung der einzelnen Auswertungsperioden

Die Kollektorkreise werden in periodischen Zeitabständen durchströmt, dies hat zur Folge, dass die Kollektoren bei unterschiedlichen tageszeitlichen Temperaturen betrieben werden und somit die erzielten Leistungen nicht direkt miteinander verglichen werden können. Um einen realistischen, einheitlichen Vergleich zu ermöglichen, wird eine Temperaturkorrekturberechnung genutzt. Statt der sonst üblichen Gradtageszahl als Bezug wird die Bodentemperatur als Bezugsgröße genutzt, da sie in dieser Messtiefe kaum tageszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. In der Abbildung 8-3 sind die Bodentemperaturen 1 bis 3 unter dem Einfluss der Außentemperatur dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Bodentemperatur sich nur bei langfristig anhaltenden Außentemperaturen beeinflussen lässt.



**Abbildung 8-3: Boden- und Außentemperaturen vom 1.09.09 bis zum 15.09.09**

Des Weiteren sind die Kollektoren in nicht komplett identischen Böden eingebracht. Diese weisen einen unterschiedlichen Wärmehaushalt auf, wie in Abbildung 8-3 an den unterschiedlichen Bodentemperaturen abzulesen ist. Dies führt zu unterschiedlichen Leistungen. Deshalb wird für die jeweiligen Kollektoren ein gleiches Temperaturniveau angenommen, um das direkte Vergleichen der

Leistungen der einzelnen Kollektorkreise zu ermöglichen. Folgend sind die Korrekturberechnungen bzw. Korrekturfaktoren für Kollektor 2 und Kollektor 3 gezeigt:

$$Q_{Koll2Kor} = \frac{g_{BodenKoll1}}{g_{BodenKoll2}} \quad (5.1)$$

$$Q_{Koll3Kor} = \frac{g_{BodenKoll1}}{g_{BodenKollB}} \quad (5.2)$$

Wie in Abbildung 8-3 zu sehen ist, unterscheiden sich die Bodentemperaturen in der Zeit vom 1.09.09 bis zum 15.09.09 relativ stark. Die Sonneneinstrahlung trifft auf die Rasenfläche oberhalb der Kollektoren 2 und 3 nahezu den ganzen Tag ungehindert ein, im Gegensatz zu Kollektor 1, der ebenfalls an der Oberfläche mit Rasen bewachsen ist, aber die meiste Zeit im Halbschatten liegt. Aufgrund des gegensätzlichen Verhaltens ist auf eine bessere Wärmeleitfähigkeit des Bodens am Koll 1 zu schließen. Dies kann zum Beispiel durch höhere Wassersättigung, durch andere Erdarten oder weniger Lufteinschlüsse im Boden möglich sein. Abwasser, Fernwärmeleitungen etc. können weitere Ursachen sein, werden hier jedoch ausgeschlossen.

Um präzisere Aussagen zu den einzelnen Kollektoren zu erhalten und um die zuvor beschriebene Korrekturberechnung durchzuführen, wurden zu dem Messpunkt 1 noch zwei weitere ergänzt (zu erkennen an den unterschiedlich beginnenden Zeiten der Aufzeichnungen der Bodentemperaturen in Abbildung 8-3).

Die Temperaturmessstellen sind seitlich, auf gleicher Höhe der einzelnen Kollektoren, außerhalb des Kollektoreinflusses (Wärmeentzug durch Kollektor) im Boden verlegt worden.

Die einzelnen Temperaturmessstellen sind im Lageplan in Abbildung 8-4 dargestellt.

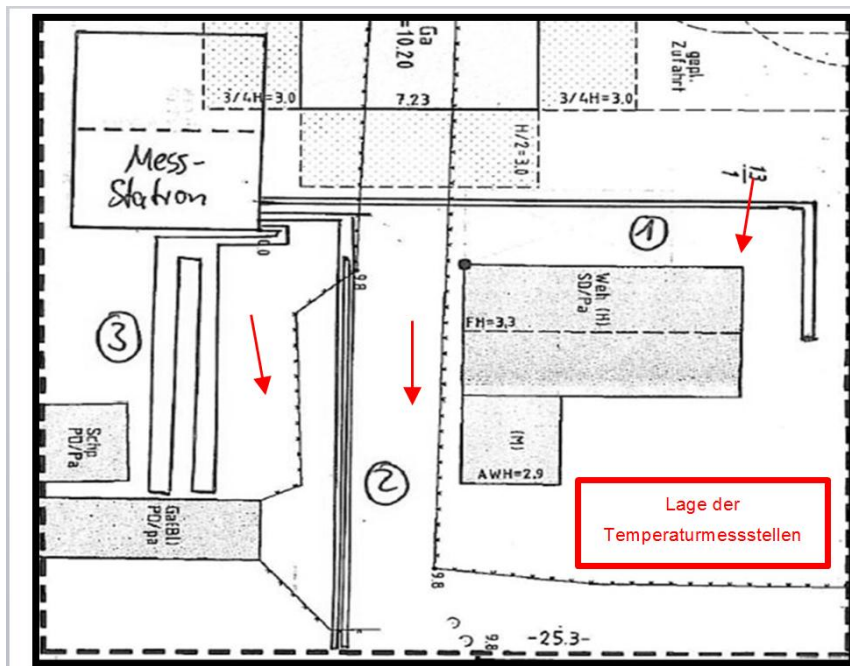
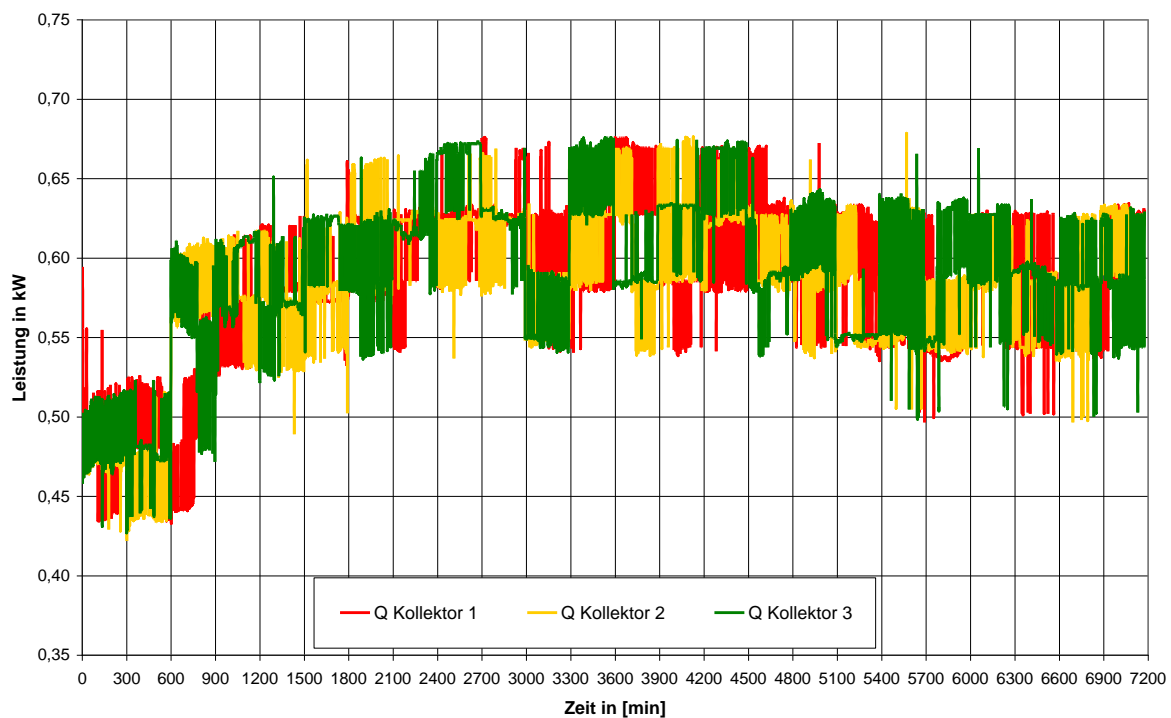


Abbildung 8-4: Lage der Temperaturmessstellen, Standort Berlin I

In der ersten Messperiode wurde die Temperaturkorrektur als statischer Wert von den folgenden Messungen angenommen. Die Fehlerabweichung ist hier im vernachlässigbaren Bereich.

### 8.3 Periode 1

Die Leistungen der Kollektoren sind in der Abbildung 8-5 gelistet. Dabei ist auf der X-Achse die effektive Laufzeit jedes Kollektors in diesem Zeitraum aufgetragen. Eine Art Blockmuster zeichnet sich ab. Da die Umschaltung der Kollektoren im 5- Stundenturnus erfolgt, ist bei jedem Kollektor alle 300 Minuten eine Veränderung der Leistung zu erkennen. Die Schwankungen in den einzelnen Blöcken werden von der aktuell vorherrschenden Temperatur des Erdreiches, des Volumenstromes, sowie von der Regeneration des Bodens beeinflusst. In Sommermonaten, bei größeren Wärmeeinträgen durch Sonneneinstrahlung geschieht dies schneller. Je kürzer die Zeit der Sonneneinstrahlung, desto länger ist die Regenerationszeit des Bodens (siehe dazu auch das Kapitel „Geothermische Aspekte des Bodens“).



**Abbildung 8-5: Leistung der Kollektoren vom 30.06.09 bis zum 15.07.09**

In der Startphase kommt es zu Setzungen des Erdreiches, welches ein nachfolgendes Ansteigen der Leistung, wie in Abbildung 8-5 zu erkennen, zur Folge hat. Die dämmenden Hohlräume am Kollektorrohr werden von der absinkenden Erde ersetzt und bieten einen besseren

Temperaturschluss zum Erdreich. Dennoch haben alle Kollektoren eine ähnliche Leistung und zeigen nahezu gleiche Verläufe. Geringfügig sind die Kollektoren mit der innovativen Einbringung auf einem höheren Leistungsniveau, als der konventionell eingebrachte Koll 1. Die Temperaturkorrektur wurde bei der Darstellung von Koll 2 und 3 mit erfasst.

Analog dazu ist das Durchflussvolumen, beispielhaft in Abbildung 8-6 für Kollektor 1 zu sehen. Zur besseren Übersicht sind die Leistungen mit Hilfe einer polynomischen Funktion dargestellt. Die Abbildung 8-3 zeigt eine Erhöhung des Volumenstroms sowie der Leistung mit einer anschließenden Einregulierung. Dies ist auf die Einspülung des Systems zurückzuführen, sämtliche noch lockeren Verunreinigungen im Rohrsystem werden weggespült bis sich ein konstanter Volumenstrom einstellt.

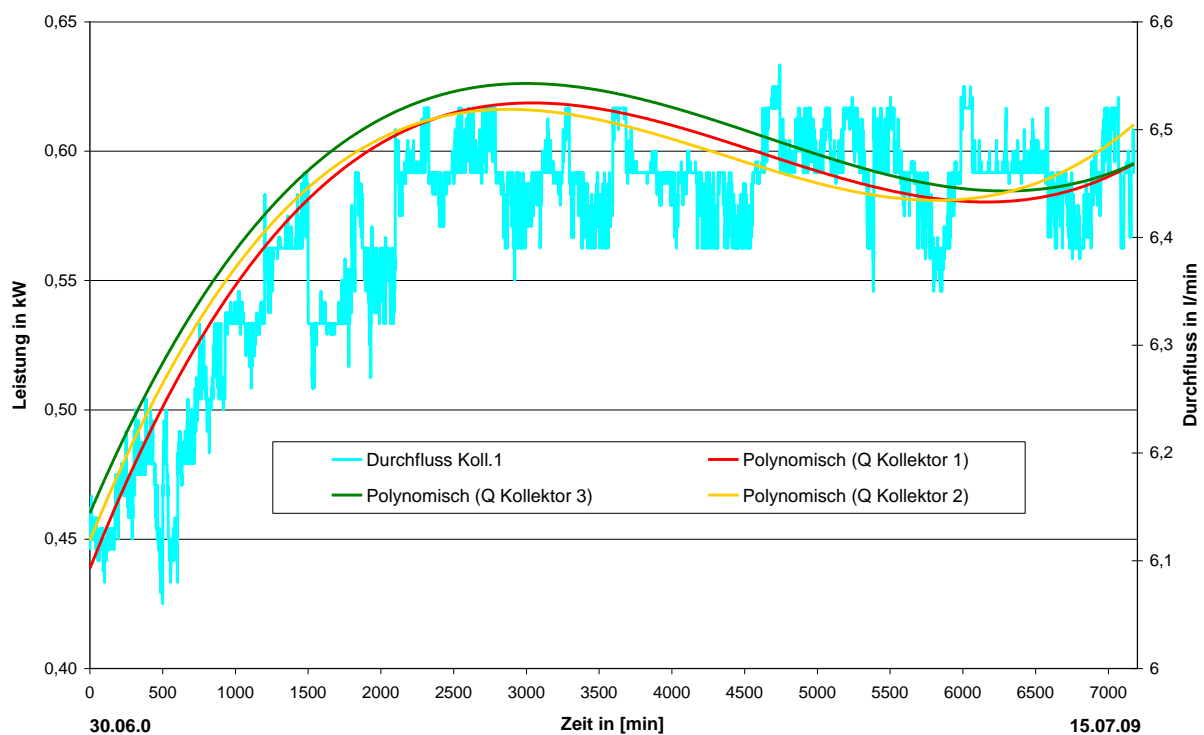


Abbildung 8-6: Leistungen und Durchflussmenge vom 30.06.09 bis zum 15.07.09



## 8.4 Periode 2

Im Folgenden wird der Zeitraum vom 1.09.09 bis zum 15.09.09 betrachtet (Abbildung 8-7), da es in der vorherigen Zeit zu keiner Datenbeschreibung der Speicherkarte kam und die Datenübermittlung mangelhaft war. Dies ist zum einen auf einen Defekt der Karte zurückzuführen. Des Weiteren ist die GPRS-Netzabdeckung am Versuchsstandort starken Schwankungen unterworfen, was zu einer mangelhaften Datenübermittlung führte. Eine Auswertung der übermittelten Daten als auch der Daten auf der SD - Karte war nicht möglich. Bei Betrachtung des folgenden Zeitraumes, ist davon auszugehen, dass es zu einem weiteren Leistungsanstieg aller Kollektoren kam. Entgegen der Erwartung fielen die Leistungen sehr gering aus, da die Umschaltung des Wärmeüberträgers auf den Winterbetrieb nicht am 25.08.09 erfolgte. Die Konsequenz ist eine Vorlauftemperatur ( $\vartheta_2$ ) von 7 °C, statt den geplanten 3 °C. Somit ist der Temperaturunterschied zwischen Boden und Sole sehr gering, 4 °C geringer als geplant. Damit ist das  $\Delta\vartheta$  (Rücklauftemperatur minus Vorlauftemperatur), die Temperaturerhöhung und folgend die Leistung wesentlich geringer.

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \quad (5.1)$$

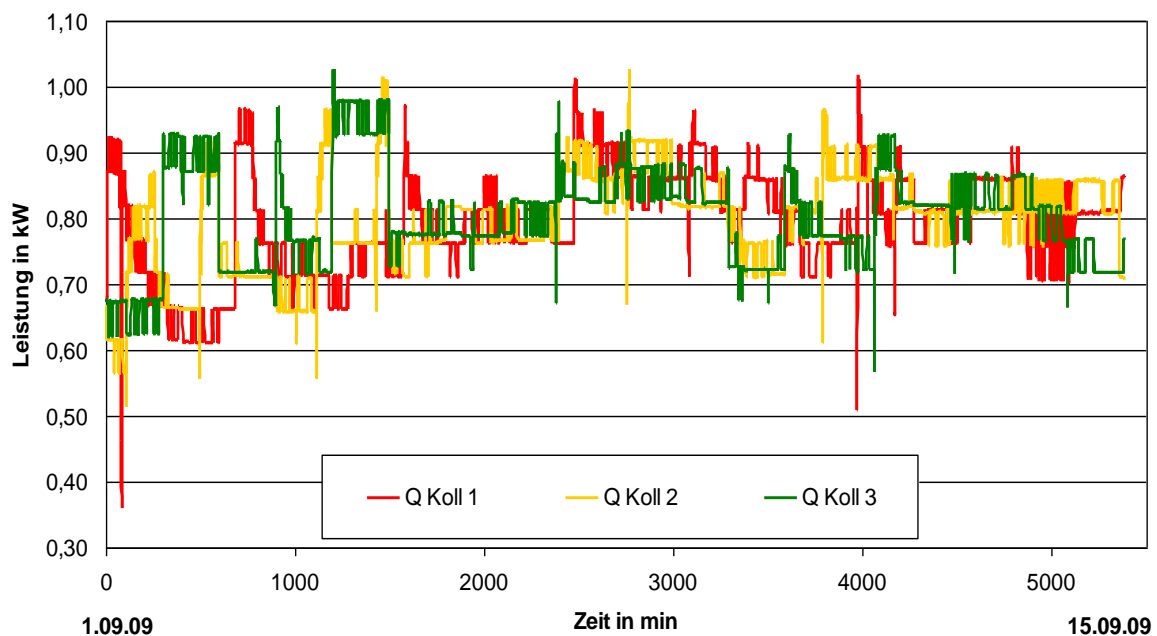


Abbildung 8-7: Kollektorleistungen vom 1.09.09 bis zum 15.09.09

### 8.5 Periode 3

Nachfolgend werden die Daten ab dem 17.10.09 betrachtet. Die Gründe liegen bei den zuvor genannten Problemen, ausgehend von der defekten SD-Karte sowie der mangelhaften GPRS-Netzabdeckung am Versuchsstandort. Erwartungsgemäß ist es in der Zwischenzeit zur Reduktion der Leistungen gekommen - von ca. 0,8 kW auf 0,4 kW. Ursache ist das kleiner werdende  $\Delta\vartheta$ . Die Leistungen vom 17.10.09 bis zum 31.10.09 sind im Verlauf ähnlich. Durchschnittlich liegen die Leistungen alle im Bereich zwischen 0,35 bis 0,46 kW.

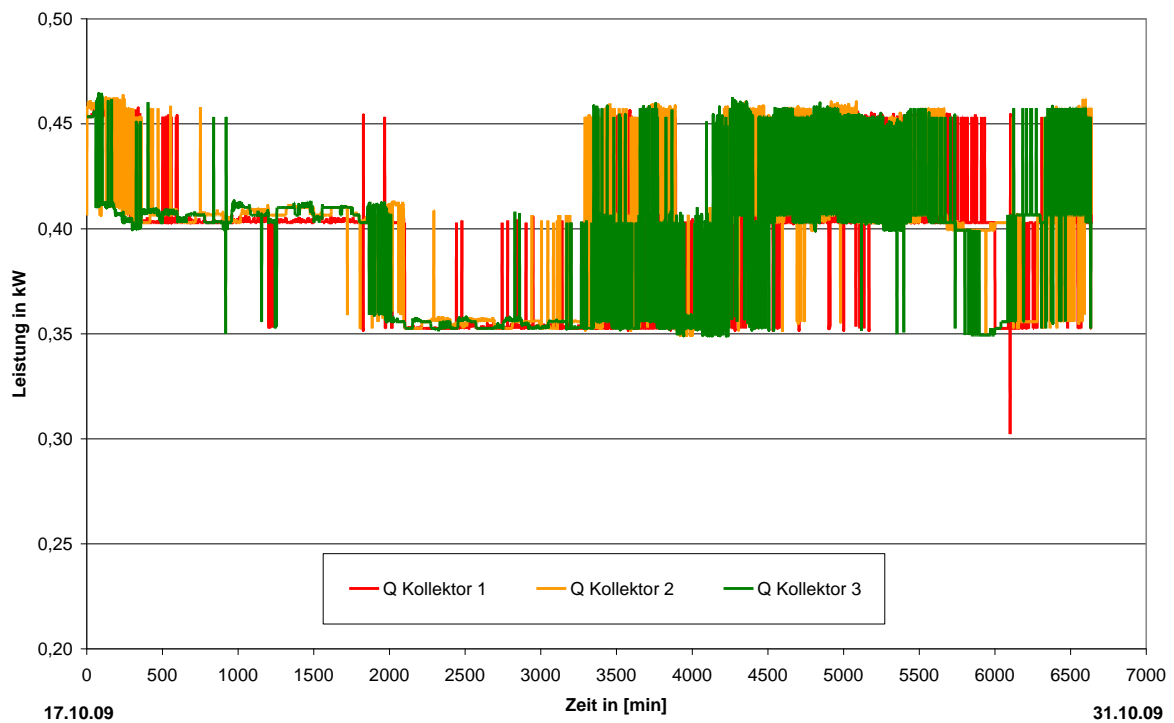


Abbildung 8-8: Kollektorleistungen vom 17.10.09 bis zum 31.10.09

## 8.6 Periode 4

Im Betrachtungszeitraum November ist ein deutliches Absinken der Leistungen mit einer nachfolgenden Einregulierung zu erkennen. Analog verhalten sich die in der Abbildung 8-10 dargestellten Temperaturen. Ein langfristiger Anstieg der Außentemperatur bewirkt eine geringe Anhebung der Bodentemperaturen.

In Abbildung 8-9 ist auf der X-Achse die effektive Laufzeit der Kollektoren aufgetragen, in Abbildung 8-10 die reale Laufzeit. Eine Umstellung des Steuerungszyklus auf Winterbetrieb ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt.

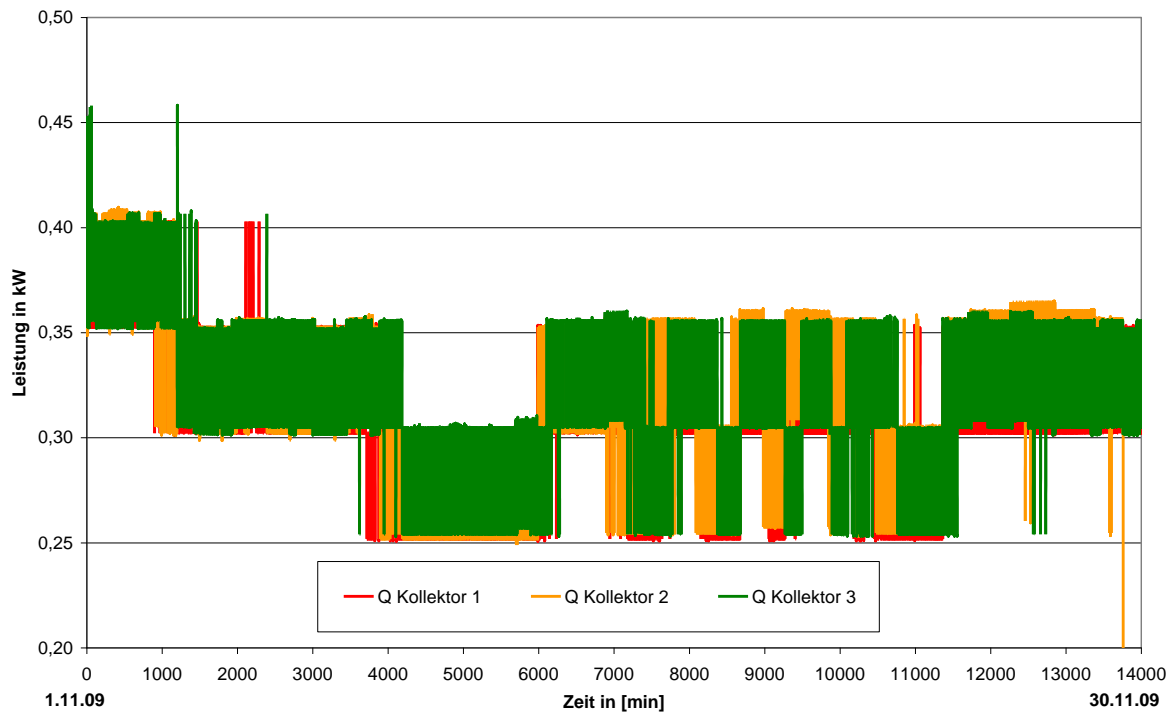
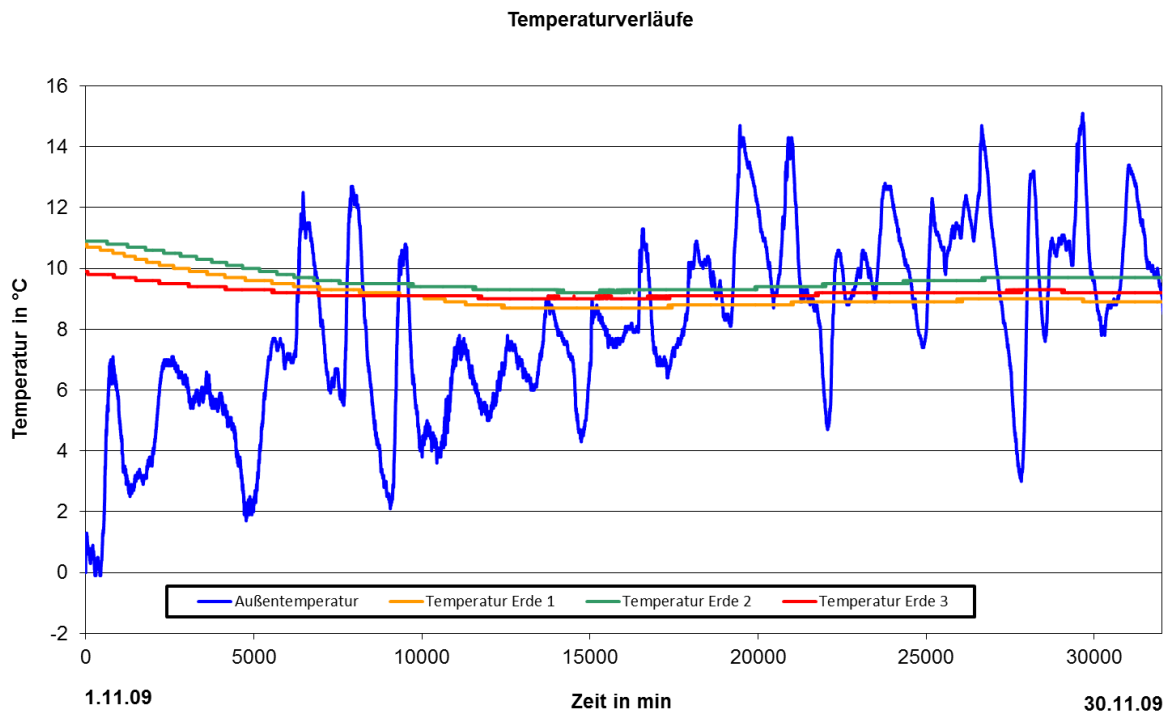


Abbildung 8-9: Kollektorleistungen vom 1.11.09 bis zum 30.11.09



**Abbildung 8-10: Temperaturen vom 1.11.09 bis zum 30.11.09**

## 8.7 Periode 5

Aufgrund eines Fehlers in der Programmierung fiel Kollektor 3 aus. Vorgesehen war ein wöchentlicher Wechsel zwischen den Kollektoren im Winterbetrieb. Der Fehler führte dazu, dass Kollektor 1 eine Woche genutzt wurde, anschließend Kollektor 2 für eine Woche, der nachfolgende Kollektor 3 blieb aus, stattdessen blieb Kollektor 2 noch eine weitere Woche geöffnet. Aufgrund der doppelten Laufzeit ist dem Erdreich um Kollektor 2 eine höhere Leistung entzogen worden - die Regenerationszeit hat sich halbiert.

Folglich kommt es zu Leistungsverlusten der Wärmepumpe. Gegen Ende des Monats wird keine Wärmeleistung übertragen, da die Bodentemperatur auf das Niveau der Vorlauftemperatur abfällt. Im Falle der Unterschreitung würde Wärme ins Erdreich eingebracht, welches die weiteren Messungen beeinträchtigen kann. Eine hundertprozentige natürliche Regeneration wird im Frühjahr durch die Sonne, Schmelzwasser etc. nicht vorherrschen.

Trotz der längeren Regenerationszeit fällt die Leistung des Kollektors 1 schneller als die des Kollektors 2. Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Boden um Kollektor 1 stärker von seinen Umgebungstemperaturen geprägt ist, wie auch bei Abbildung 8-3 in den Bodentemperaturen dargestellt ist.

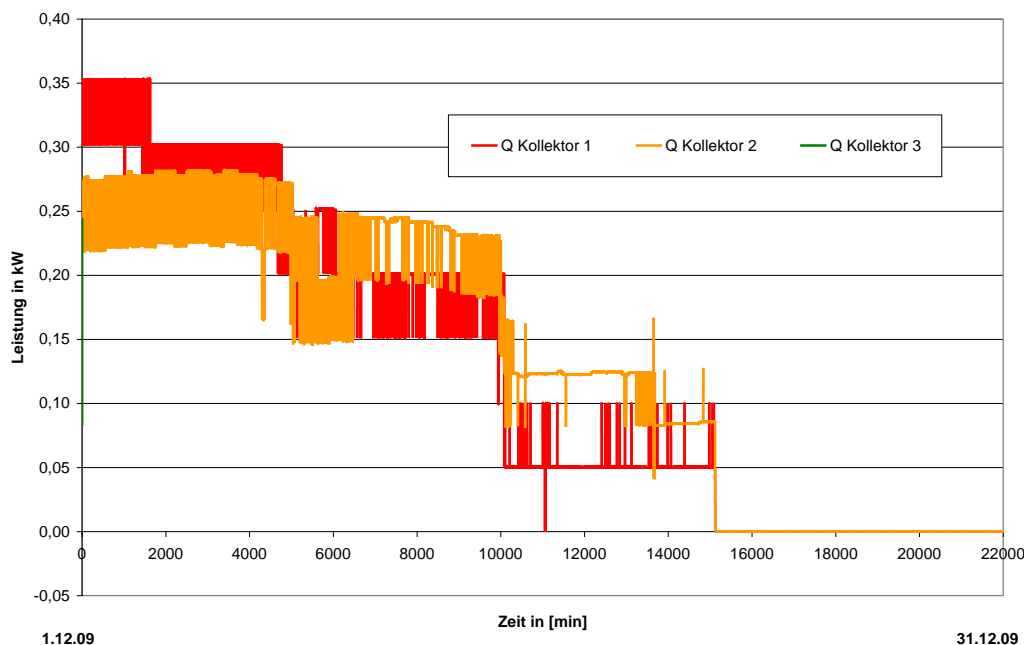


Abbildung 8-11: Kollektorleistungen vom 1.12.09 bis zum 31.12.09

Deutlich in der folgenden Abbildung 8-12 zu erkennen, ist das kleiner werdende  $\Delta\theta$  und analog dazu das Abfallen der Leistung (angenähert durch ein Polynom zur Verdeutlichung).

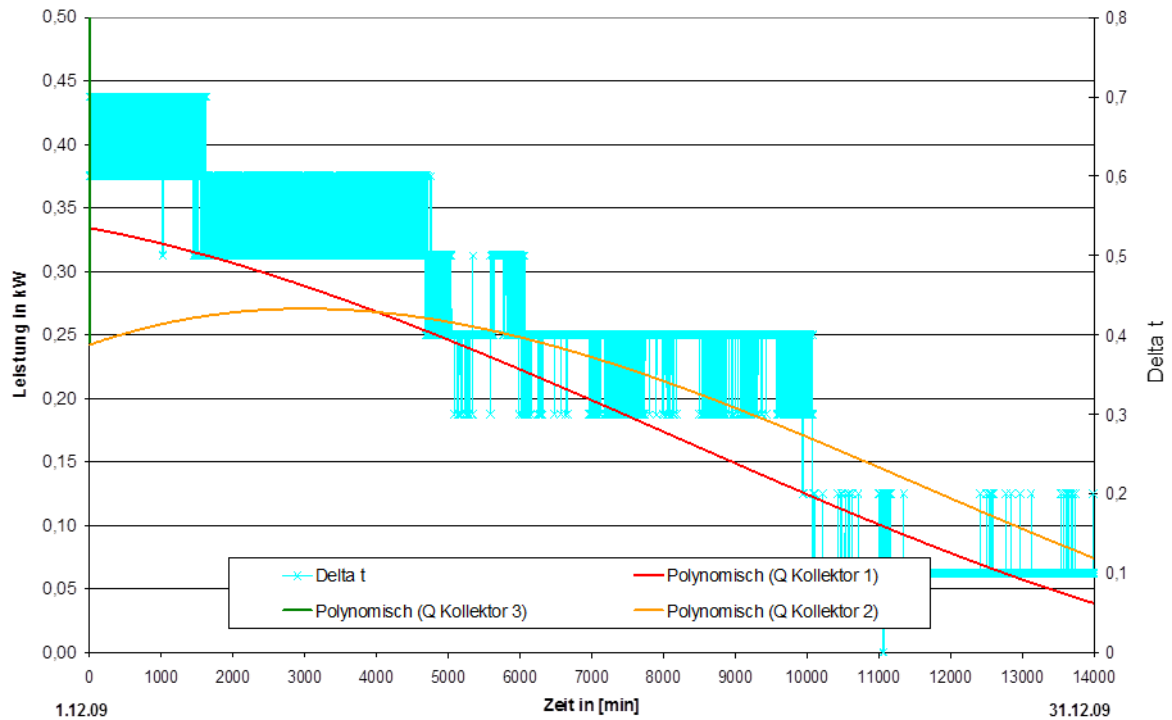


Abbildung 8-12:  $\Delta\theta$  zur Leistung der Kollektoren vom 1.12.09 bis zum 31.12.09

## 8.8 Periode 6

Durch das Umschalten der Vorlauftemperatur kommt es zu einem größerem  $\Delta\vartheta$ , welches einen plötzlichen Leistungssprung zur Folge hat. In Abbildung 8-13 bei Kollektor 2 nach etwa 3.450 Minuten, sowie bei Kollektor 1 nach 5.090 Minuten effektiver Laufzeit im Betrachtungszeitraum. Kollektor 3 ist nur in den Überschneidungszeiten geöffnet, somit effektiv 4 min geöffnet. Kollektor 1 ist aufgrund der längeren Regenerationszeiten von den Leistungen höher angesiedelt.

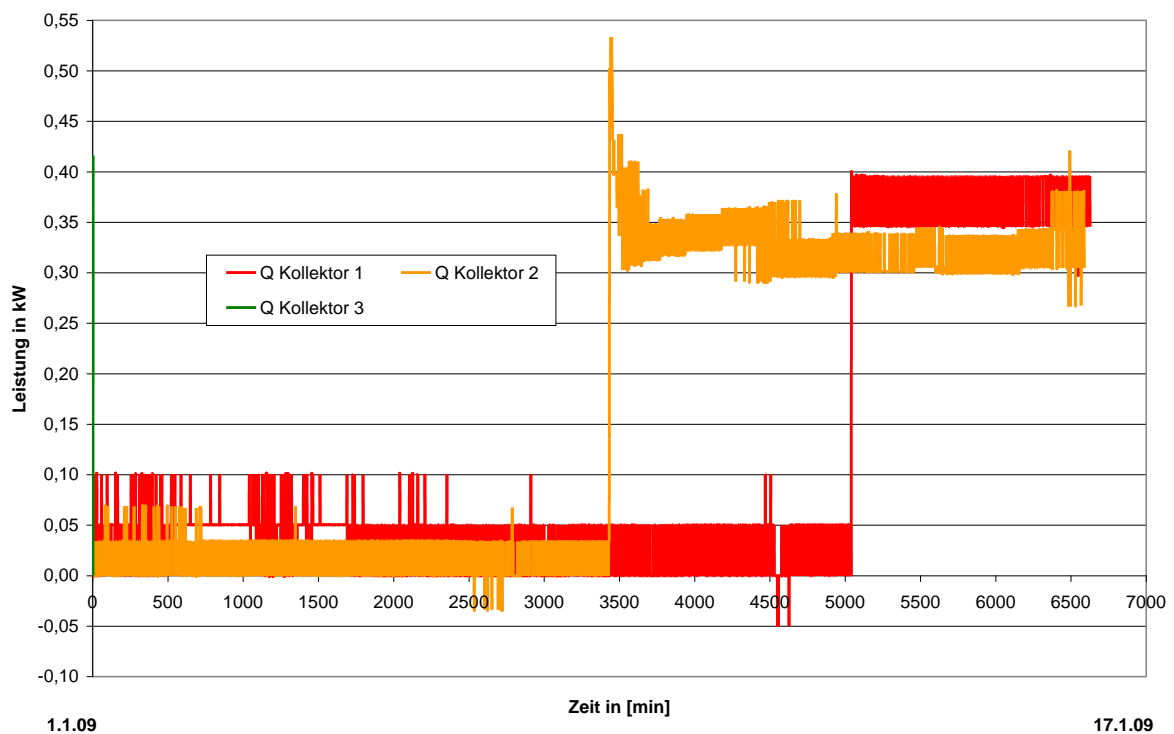


Abbildung 8-13: Kollektorleistungen vom 1.01.10 bis zum 14.01.10

## 8.9 Periode 7

Nachfolgend sind in der Abbildung 8-14 die genauen Kollektorentnahmelleistungen des Zeitraumes vom 05.02.2010 bis zum 28.02.2010 dargestellt. Über den betrachteten Zeitraum stabilisiert sich die Leistung der Kollektoren auf die maximal mögliche Entzugsleistung des Wärmeübertragers.

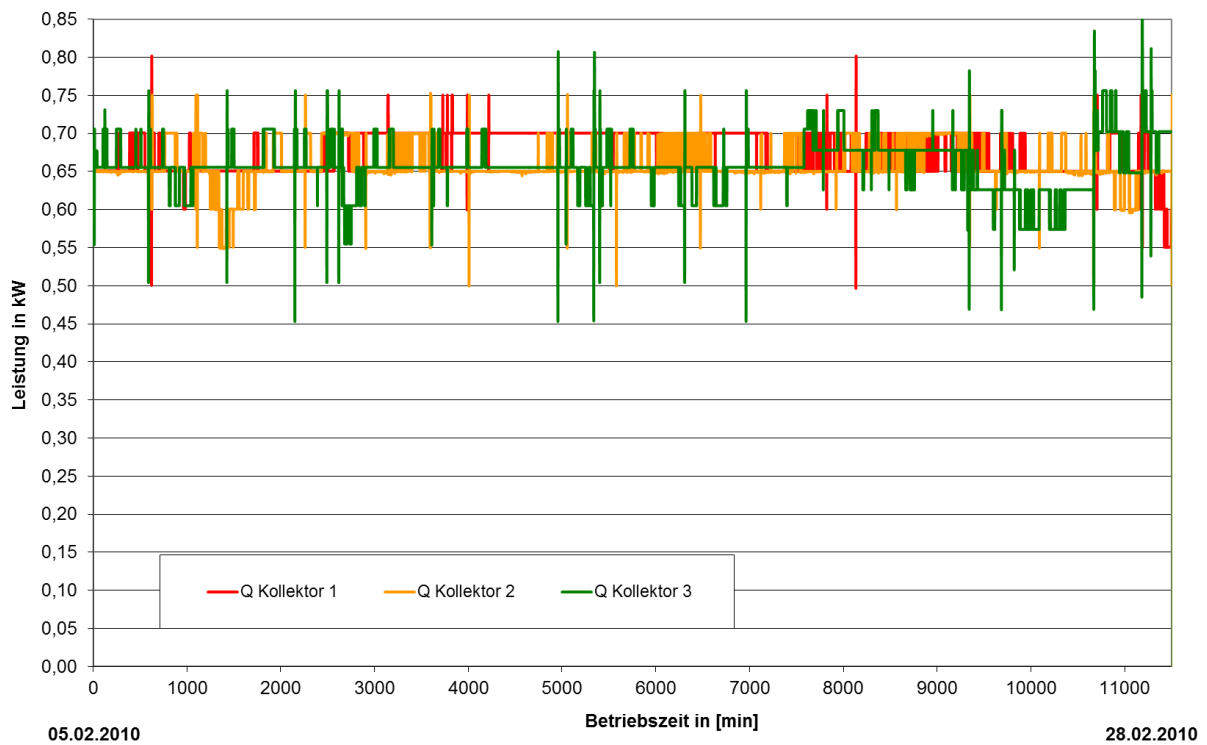


Abbildung 8-14: Kollektorleistung vom 05.02.2010 bis 28.02.2010



Die Abbildung 8-15 zeigt die Bodentemperaturen sowie die Umgebungstemperaturen im betrachteten Zeitraum.

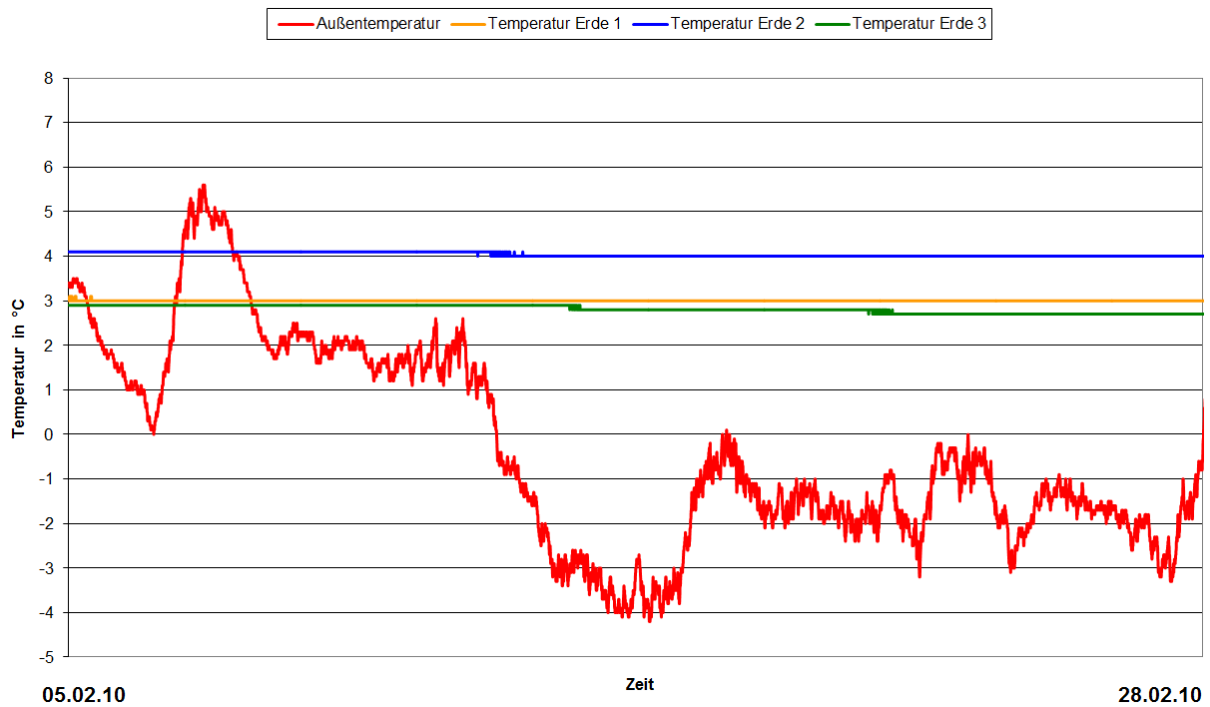


Abbildung 8-15: Temperaturen vom 01.02.2010 bis zum 28.02.2010

## 8.10 Periode 8

Nachfolgend ist in der Abbildung 8-16 der Zeitraum des 01.03.2010 bis zum 31.03.2010 dargestellt.



**Abbildung 8-16: Kollektorleistung vom 01.03.10 bis 31.03.2010**

Im Laufe dieser Periode kam es am Kollektor 2 zu Schwankungen im Leistungsentzug des angeschlossenen Laubabades, da die Raumwärme temporär nicht abgeführt werden konnte. Die Raumtemperatur erreichte zwischenzeitlich über 35 °C so dass keine Wärmeabgabe möglich war. Kurzfristiges Lüften (ab Mitte März) bei sehr niedrigen Außentemperaturen ließ die Raumtemperatur auf 15 °C absinken, so dass eine Wärmeanforderung vorhanden war.

Die Abbildung 8-17 zeigt die Bodentemperaturen sowie die Außentemperaturen im betrachteten Zeitraum.

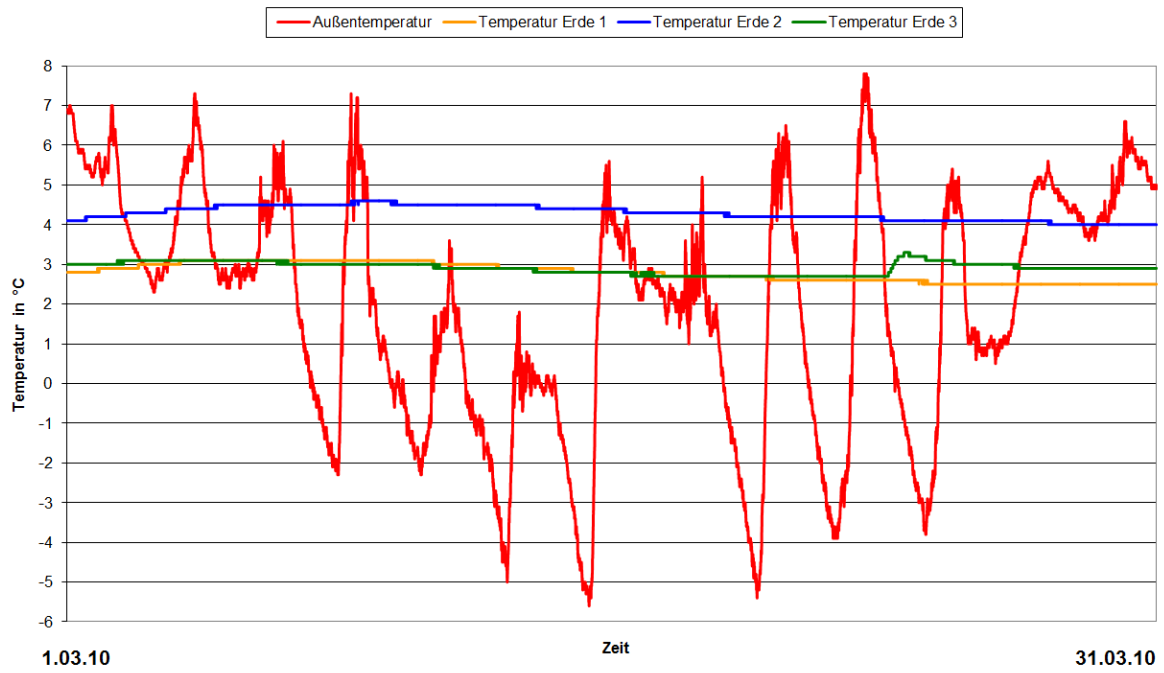


Abbildung 8-17: Temperaturen vom 01.03.2010 bis zum 31.03.2010

## 9 Auswertung der Messdaten, Standort Essen

### 9.1 Standortspezifikationen Essen

Um möglichst aussagekräftige Daten zu erhalten, sieht das Projekt den Aufbau mehrerer Feldtestanlagen vor. Eine weitere Anlage wurde in Essen (NRW) auf dem Betriebsgelände des Gaswärme-Institutes errichtet.

Der prinzipielle Aufbau ähnelt der Anlage in Berlin, aufgrund der regionalen Umgebungsbedingungen sind allerdings einige Änderungen vorgenommen worden.

Die Abbildung 9-1 zeigt die Anordnung der drei Kollektoren.

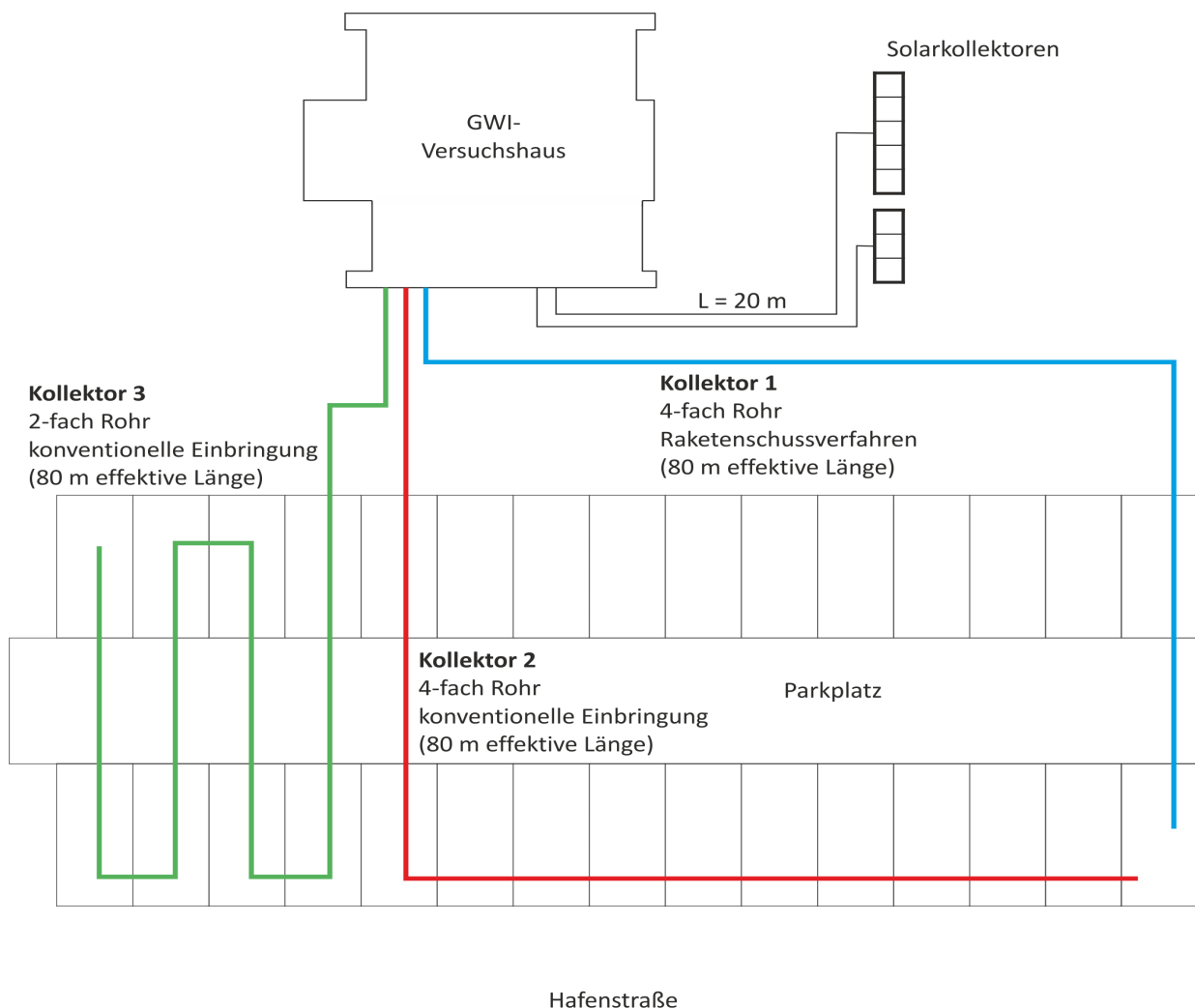


Abbildung 9-1: Verlegung der drei Kollektoren in Essen

Die Rohrlänge wird aufgrund der größeren Platzverfügbarkeit in doppelter Länge (im Vergleich zum Berliner Standort) ausgeführt. Ebenso wie in Berlin wurden die gleichen Kollektortypen sowie die gleichen Einbringarten genutzt:

- Kollektor 1: 4-fach Rohr, Raketenverfahren, 40 m
- Kollektor 2: 4-fach Rohr, Normalverfahren, 40 m
- Kollektor 3: 2-fach Rohr, Normalverfahren, 80 m

Die Durchführung der Verlegung wurde von der Firma BEGA.tec GmbH übernommen.

Die Wärmeanforderung wird durch eine Gas-Wärmepumpe der Firma Bosch-Buderus<sup>3</sup> gewährleistet, die in einem Versuchshaus auf dem Gelände des Gaswärme-Institutes installiert wurde. Die Gaswärmepumpe wird während der gesamten Versuchsdauer auf eine konstante Vor- sowie Rücklauftemperatur eingestellt. Nicht genutzte Wärmemengen werden über einen Trockenkühler abgefahren. Die Abbildung 9-2 zeigt das Versuchshaus, die Abbildung 9-3 die Installationen der Kollektorkreise im Keller des Hauses.



**Abbildung 9-2: Versuchshaus auf dem Gelände des Gaswärme-Institutes in Essen**

<sup>3</sup> Es handelt sich hierbei um eine Prototyp-Anlage, die in dieser Form nicht im Handel verfügbar ist.



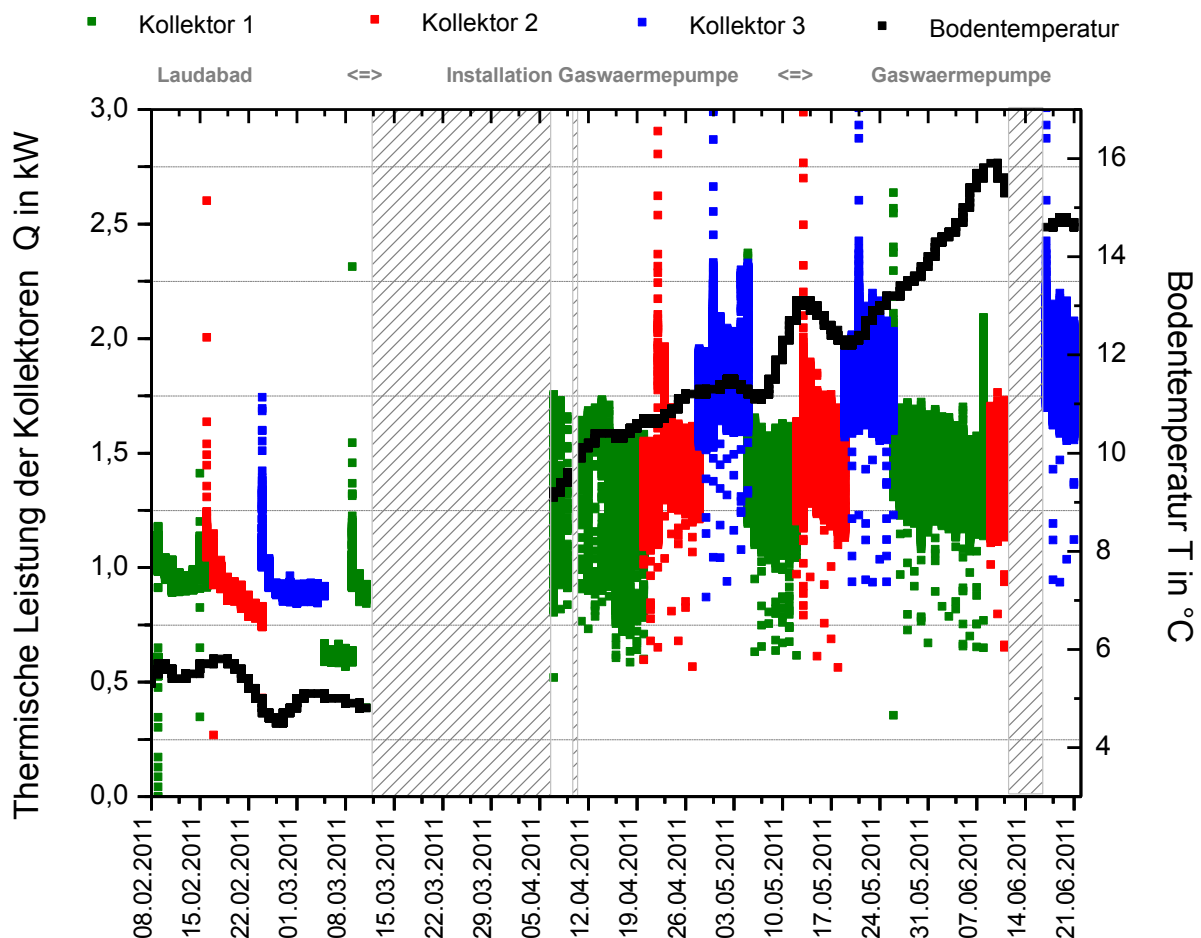
**Abbildung 9-3: Installation zum Umschalten der drei Kollektoren am Gaswärme-Institut Essen**

Die Umschaltung der drei Kollektoren wird wöchentlich und manuell durchgeführt. Die Bodentemperatur wird bei allen drei Kollektoren als gleich angenommen, da Umgebungsbedingungen wie Bodenbeschaffenheit, Sonneneinstrahlung und Regeneinfall auf der gesamten Oberfläche gleich sind. Die Annahme wird durch Stichprobenmessungen in regelmäßigen Abständen bestätigt.

## 9.2 Messergebnisse am Standort Essen

### 9.2.1 Periode 1

Die Anlage lief aufgrund der späten Bauphase und der Verspätung bei der Verfügung der Gaswärmepumpe von Februar bis Juni 2011. Nachfolgend ist in der Abbildung 9-4 die Kollektorentnahmeleistungen im Zeitraum Februar 2011 bis Juni 2011 dargestellt.



**Abbildung 9-4: Kollektorentnahmeleistungen vom Februar bis Juni 2011**

Die Abbildung 9-4 zeigt 3 Unterbrechungen in der Datenaufnahme. Die erste Unterbrechung resultiert aus der Umschaltung vom Laudabad zur Gaswärmepumpe. Die zweite Unterbrechung ist die Folge eines Hardware-Defektes in der Messdatenerfassung, der innerhalb eines Tages behoben wurde. Die dritte Unterbrechung vom 12.06. bis 17.06. 2011 musste wegen notwendigen Umbaumaßen im Versuchshaus erfolgen, aufgrund gravierender Änderungen der Hausinstallationen musste die Gasversorgung mehrere Tage unterbrochen werden.

Mit zunehmender Bodentemperatur steigt die Leistung der Kollektoren bis zum maximal von der Wärmepumpe angeforderten Niveau. Im Vergleich zwischen dem konventionell und innovativ verlegten Kollektor (1 und 2) zeigt sich im Zeitraum Mai bis Juni, dass der innovativ verlegte Kollektor geringfügig niedrigere Entnahmeleistungen aufweist. Der Kollektor 3 (2-fach Rohr, konventionell) zeigt höhere Entnahmeleistungen als der 4-fach-Rohr Kollektor 2 der ebenfalls mit dem konventionell verlegten Verfahren.

Die nachfolgenden Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7 zeigen die Temperaturen des Vor- und Rücklaufes sowie die Bodentemperatur als polynomische Funktion über den betrachteten Zeitraum. Ebenso ist der Volumenstrom der Sole in diesem Zeitraum grafisch abgebildet.

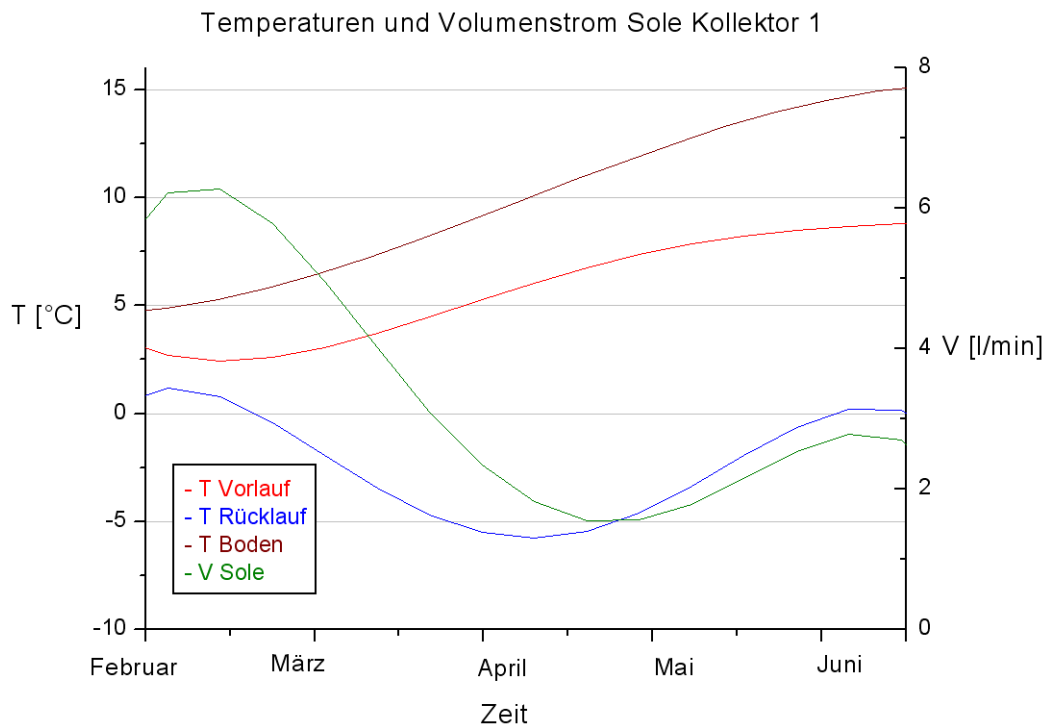


Abbildung 9-5: Temperatur und Volumenstrom Kollektor 1



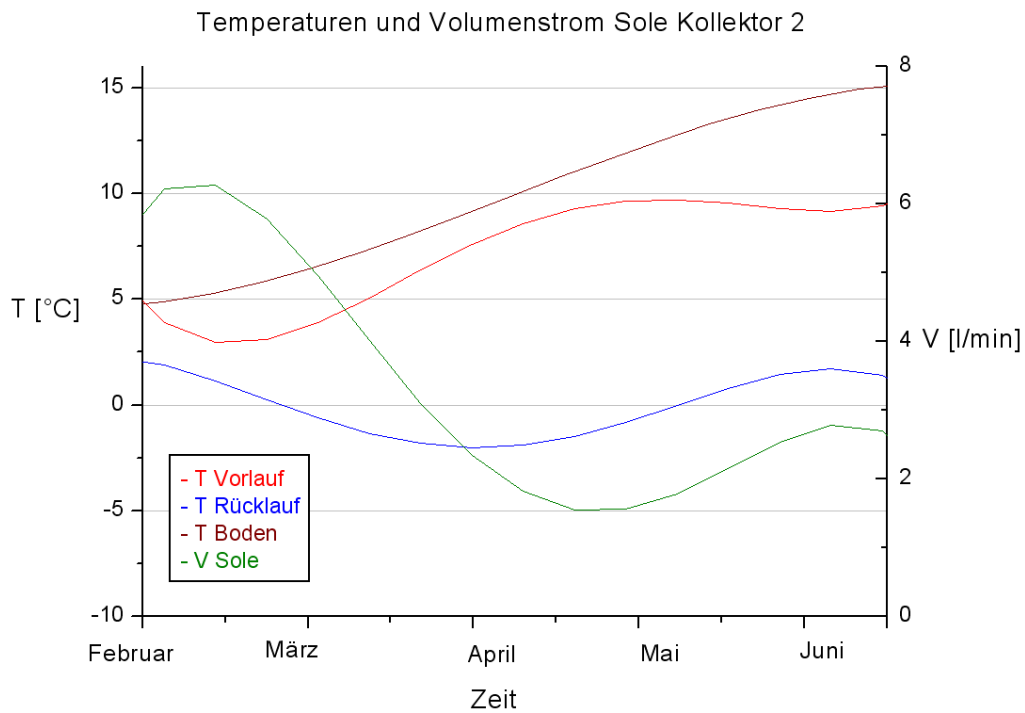


Abbildung 9-6: Temperatur und Volumenstrom Kollektor 2

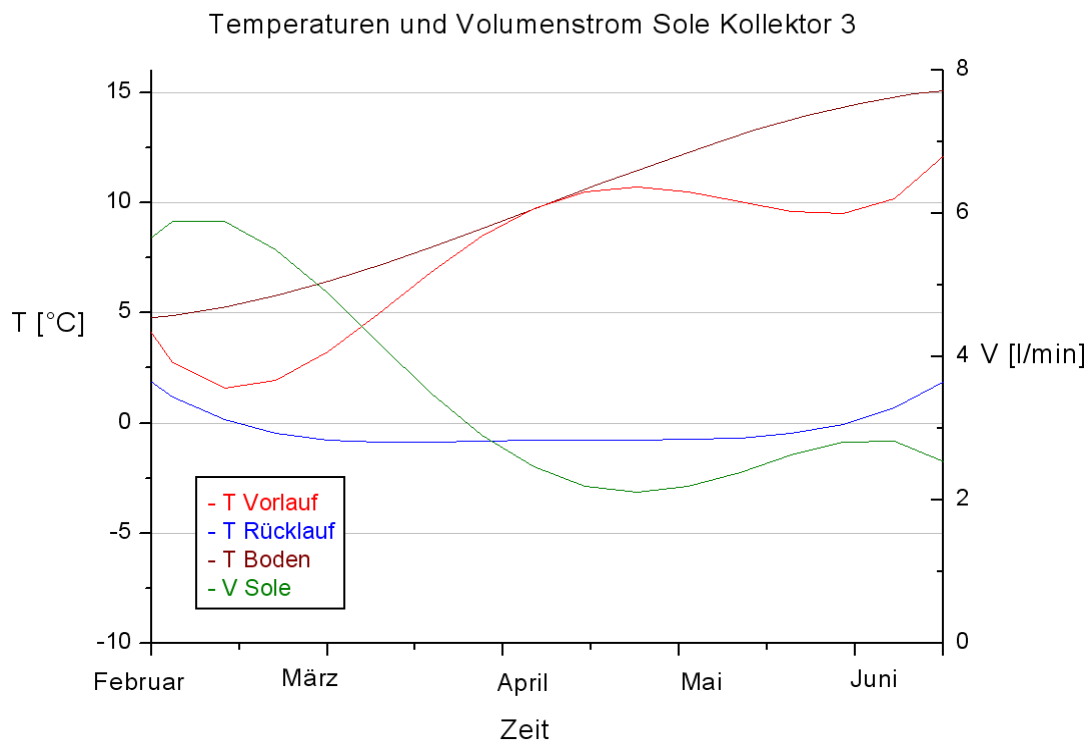


Abbildung 9-7: Temperatur und Volumenstrom Kollektor 3

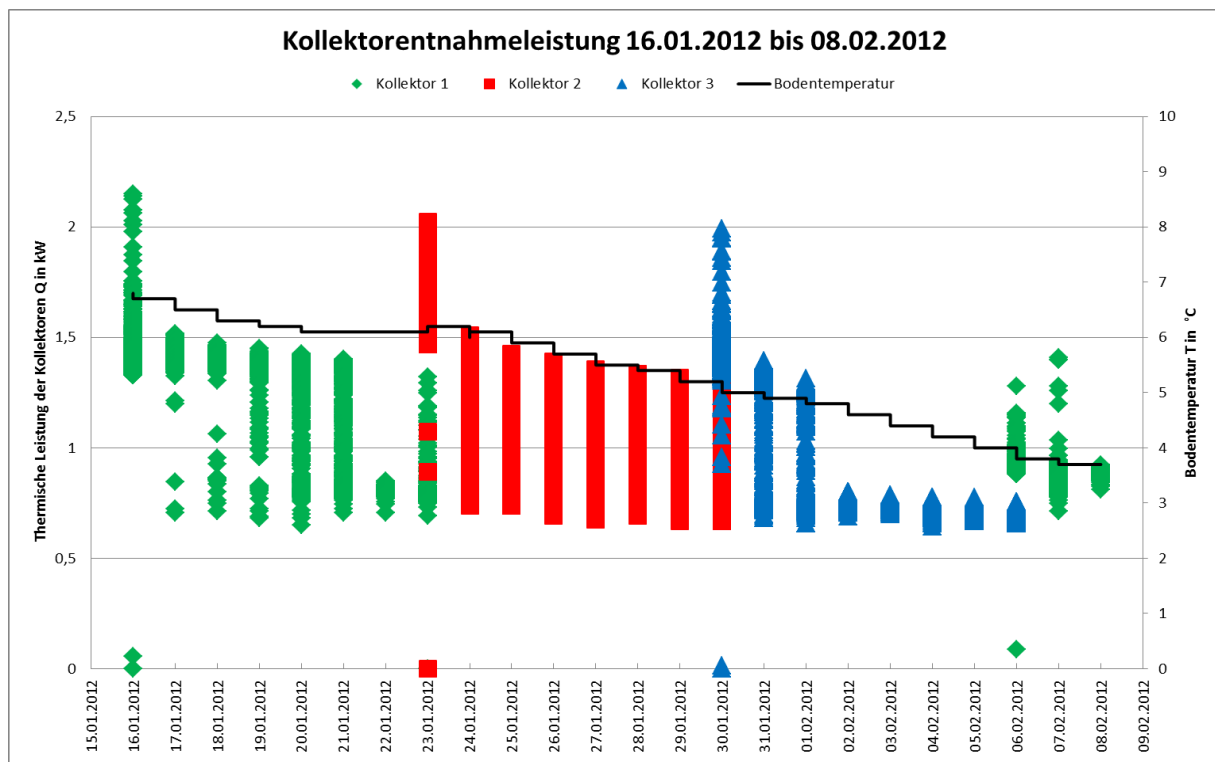
---

Die Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-7 zeigen anfänglich eine geringe Differenz der Vor- und Rücklauftemperaturen, dies liegt an der anfänglichen Nutzung des Laubabades. Die nachfolgend installierte Gaswärmepumpe ist in der Lage höhere Temperaturspreizungen zu realisieren, den Rücklaufstrom auch in Temperaturbereiche unter 0°C zu fahren und so die Kollektoren besser auszulasten. Aufgrund dieser besseren Auslastung steigt die Leistung der Kollektoren in diesem Zeitpunkt deutlich an (siehe Abbildung 9-4).

Durch die zunehmende solare Einstrahlung der Sonne in den Sommermonaten steigt die Bodentemperatur deutlich an, von etwa 5 °C Anfang Februar bis 15°C Ende Juni.

## 9.2.2 Periode 2

Die Anlage wurde im Dezember 2011 wieder installiert und ging Mitte Januar 2012 wieder in Betrieb um weitere Messdaten besonders in Hinblick auf geringe Bodentemperaturen bzw. mögliche Vereisung der Kollektorrohre zu sammeln. Die Abbildung 9-8 zeigt die Kollektorentnahmeleistung im Zeitraum vom 16.01.2012 bis zum 08.02.2012.



**Abbildung 9-8: Kollektorentnahmeleistung vom 16.01.2012 bis 08.02.2012**

Die Anlage zeigte nach dem Wiederanfahren eine konstante Leistungsabgabe. Ab dem 02.02.2012 zeigt sich ein deutlicher Leistungseinbruch. Die Vorlauftemperaturen des Kollektors bewegen sich konstant unter die  $-10^{\circ}\text{C}$  Marke. Am 08.02.2012 schaltet sich die die Pumpe der GWP ab. Die Bodentemperaturen zu diesem Zeitpunkt bei  $3,7^{\circ}\text{C}$ . Die Abschaltung dient der Vermeidung zur weiteren Auskühlung des Bodens. Durch Gefrieren des Bodens um die Kollektorrohre können Hebungen bzw. Setzungen auftreten, wenn die Radien des gefrorenen Bodens zu groß werden. Des Weiteren wird die hydraulische Leitfähigkeit unterbrochen, wenn benachbarte Eisradien zusammenwachsen, was im Frühjahr zu Matsch an der Erdoberfläche führt. Eine natürliche Regeneration wird dadurch erschwert und nachfolgende Leistungseinbrüche sind möglich.

Die Abbildung 9-9 zeigt die in diesem Zeitraum gemessenen Vor- und Rücklaufdaten der Kollektoren sowie die Bodentemperatur.

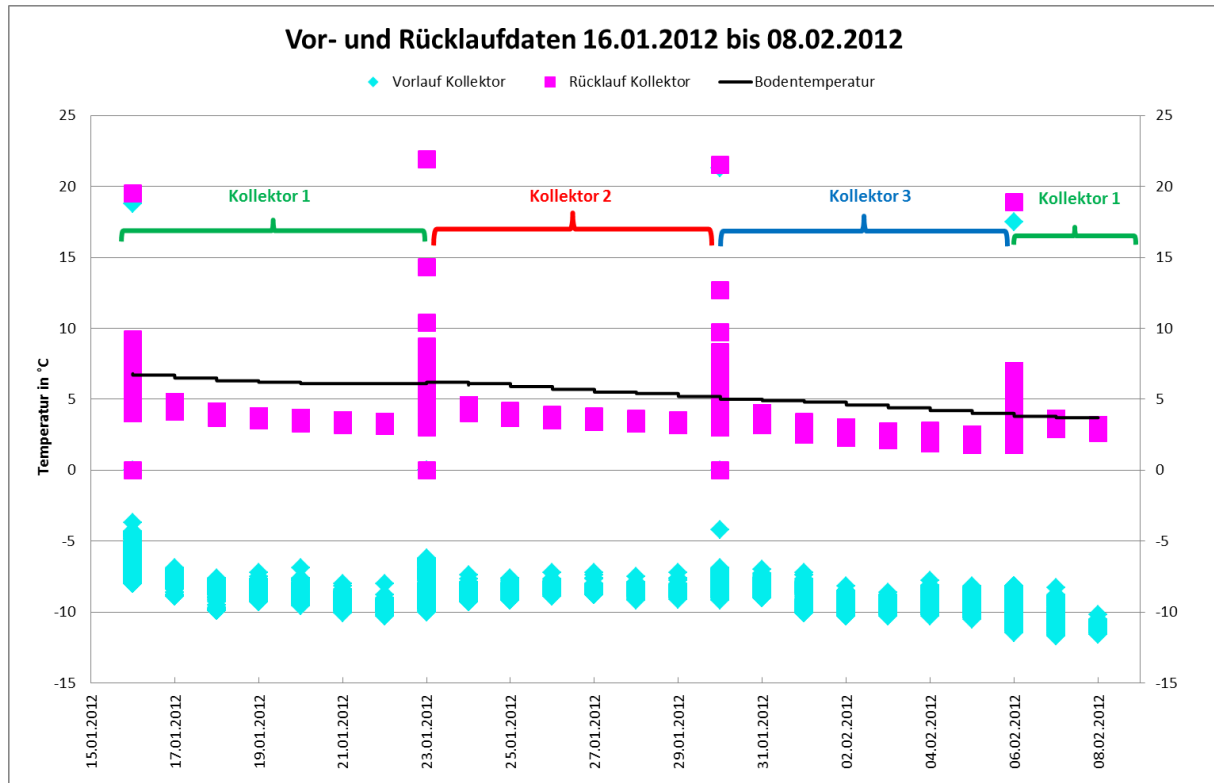


Abbildung 9-9: Vor- und Rücklauftemperaturen der Kollektoren vom 16.01. bis 08.02.2012

Die Abbildung 8-9 und die Abbildung 8-10 zeigen die Entnahmeleistungen der Kollektoren sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen der Sole nach Wiederaufnahme des Betriebes am 02.03.2012.

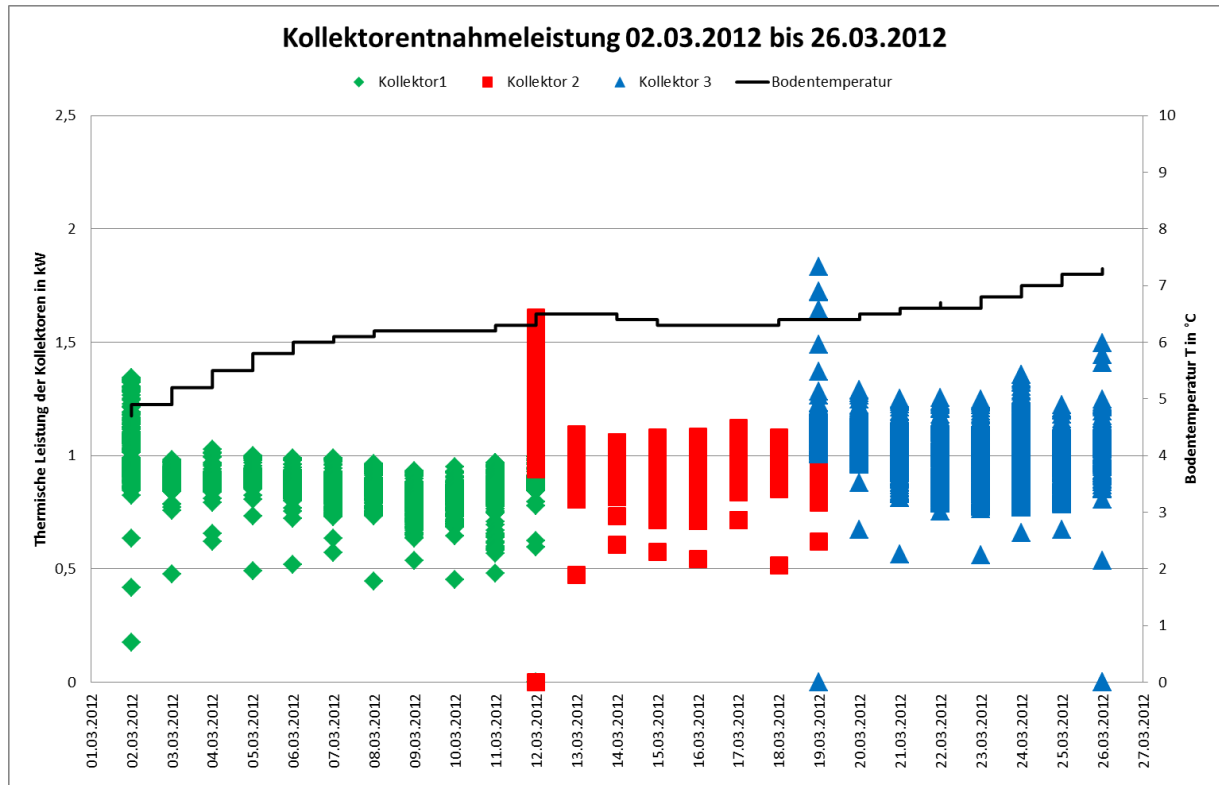
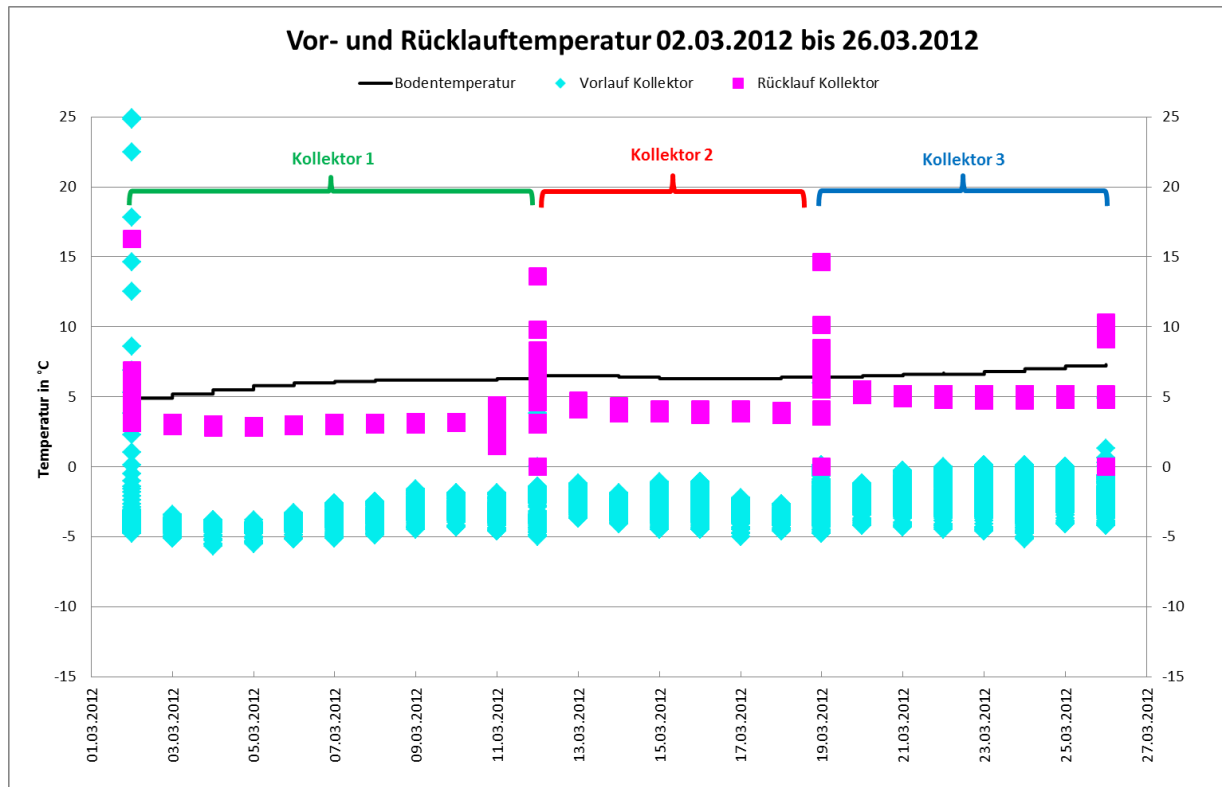


Abbildung 9-10: Kollektorentnahmeleistung vom 02.03. bis 26.03.2012



**Abbildung 9-11: Vor- und Rücklauftemperaturen der Kollektoren vom 02.03. bis 26.03.2012**

Nach Erreichen einer Bodentemperatur von 5°C wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen. Mit dem Anstieg der Bodentemperatur steigt auch die Entnahmeleistung der Kollektoren. Durch die starken Temperatureinflüsse ist im gesamten Zeitraum von Januar bis März kein Unterschied der Kollektorentnahmeleistung zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den Kollektoren können sowohl aus den steigenden Bodentemperaturen als auch durch die unterschiedlichen Bauformen bzw. Verlegeformen resultieren.

Die Abbildung 9-12 und die Abbildung 9-13 zeigen die Entnahmeleistungen der Kollektoren sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen der Sole im Zeitraum 26.03. bis 12.04.2012. Aufgrund des zeitlichen Projektendes wird die Anlage am 12.04. 2012 abgeschaltet. Die Kollektorentnahmeleistung von Kollektor 2 und 3 sind geringfügig größer als die von Kollektor 1, dem innovativ verlegten Kollektor.

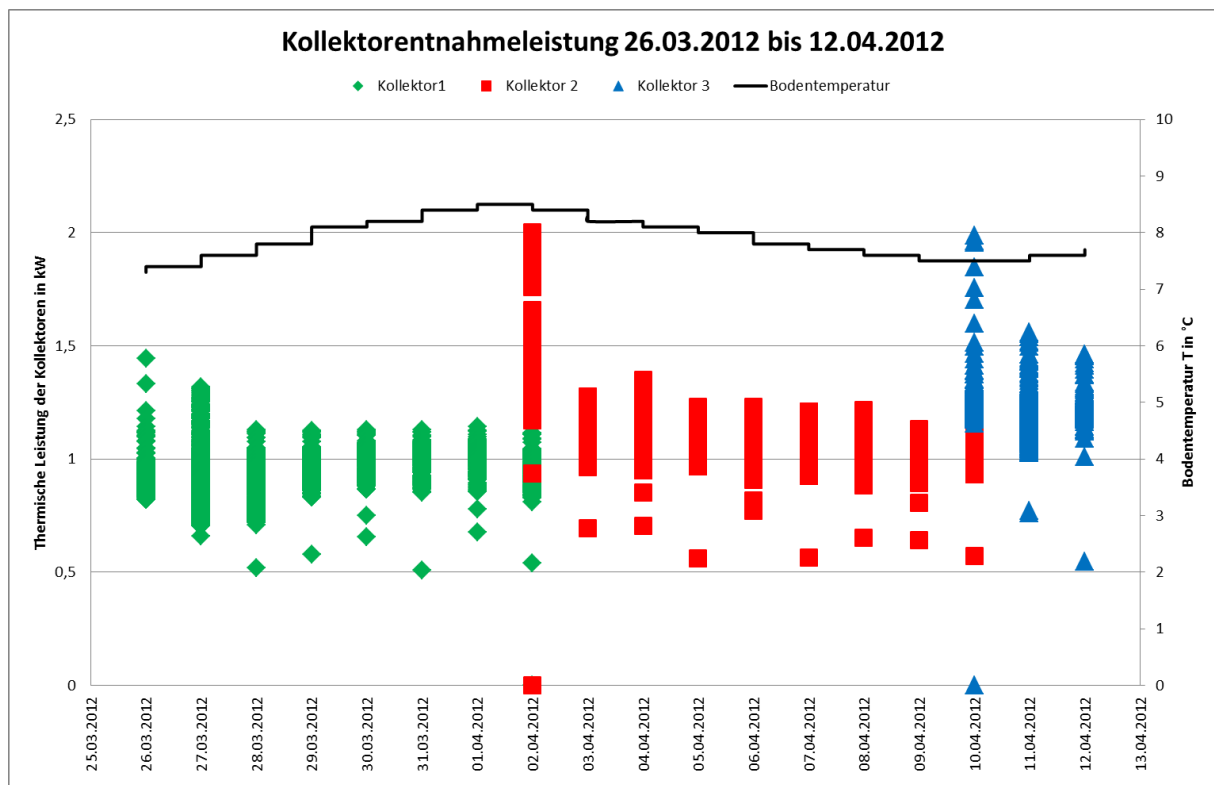


Abbildung 9-12: Kollektorentnahmeleistung vom 26.03. bis 12.04.2012

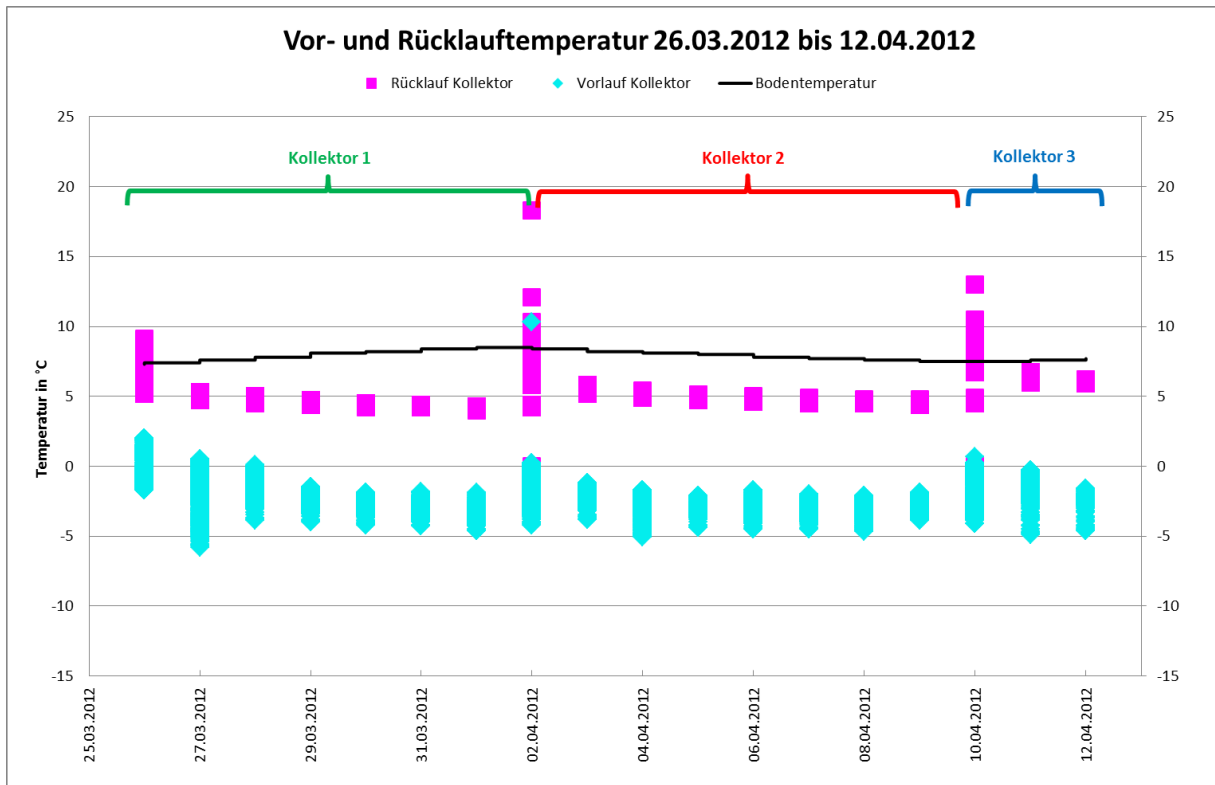


Abbildung 9-13: Vor- und Rücklauftemperaturen der Kollektoren vom 26.03. bis 12.04.2012



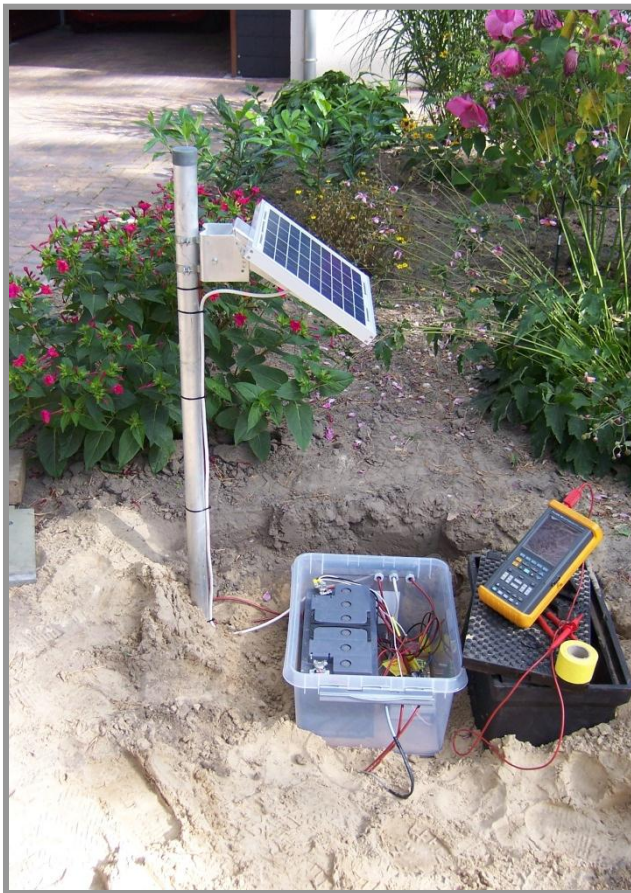
---

## 10 Auswertung der Messdaten, Standort Berlin II

### 10.1 Standort Spezifikationen Berlin II, Nottepfad

Eine weitere Anlage wurde in Berlin errichtet. Die Anlage wurde bei Privatleuten im häuslichen Bereich eingerichtet und besitzt aus Platzgründen nur einen Kollektor, der mit dem innovativen Raketenschussverfahren verbaut wird. Die Gesamtlänge der Kollektorrohre beträgt 80 m.

Die Abbildung 10-1 und Abbildung 10-2 zeigen die Installationen vor Ort.



**Abbildung 10-1: Datenerfassung am Standort Berlin-Nottepfad**



**Abbildung 10-2: Anschluss Erdwärmekollektor am Standort Berlin-Nottepfad**

## 10.2 Messergebnisse am Standort Berlin II, Nottepfad

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die Messergebnisse über den erfassten Zeitraum. Aufgrund einiger technischer Schwierigkeit, wie z.B. Ausfall der Gaswärmepumpe oder der Energieversorgung der Datenerfassung (Solarpanel) sind Lücken bei der Datenerfassung zu verzeichnen. Die Monate Dezember und Februar der Heizperiode fehlen.

### 10.2.1 Periode 1

Die Abbildung 10-3 zeigt ein langsames Ansteigen der Kollektorleistung. Ursache ist die Erhöhung der Durchflussmenge im Kollektor, bedingt durch die Regelung der angeschlossenen Wärmepumpe.

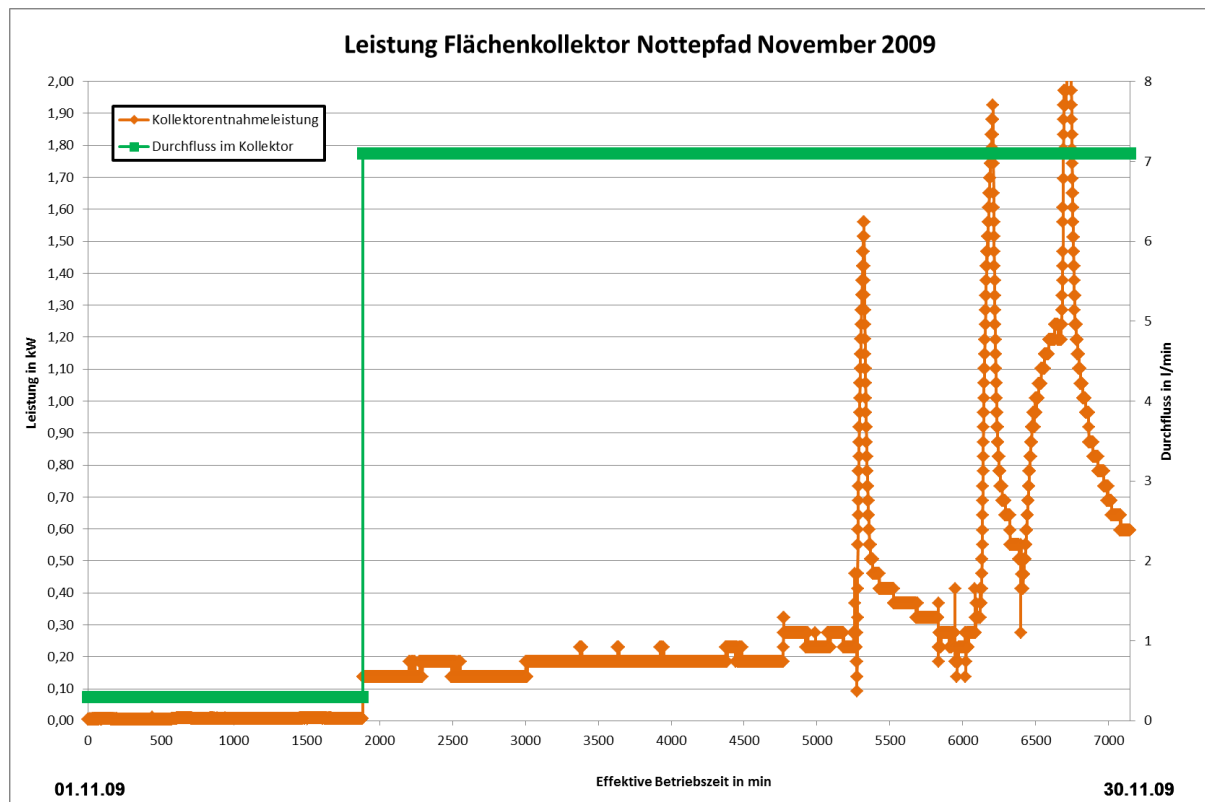
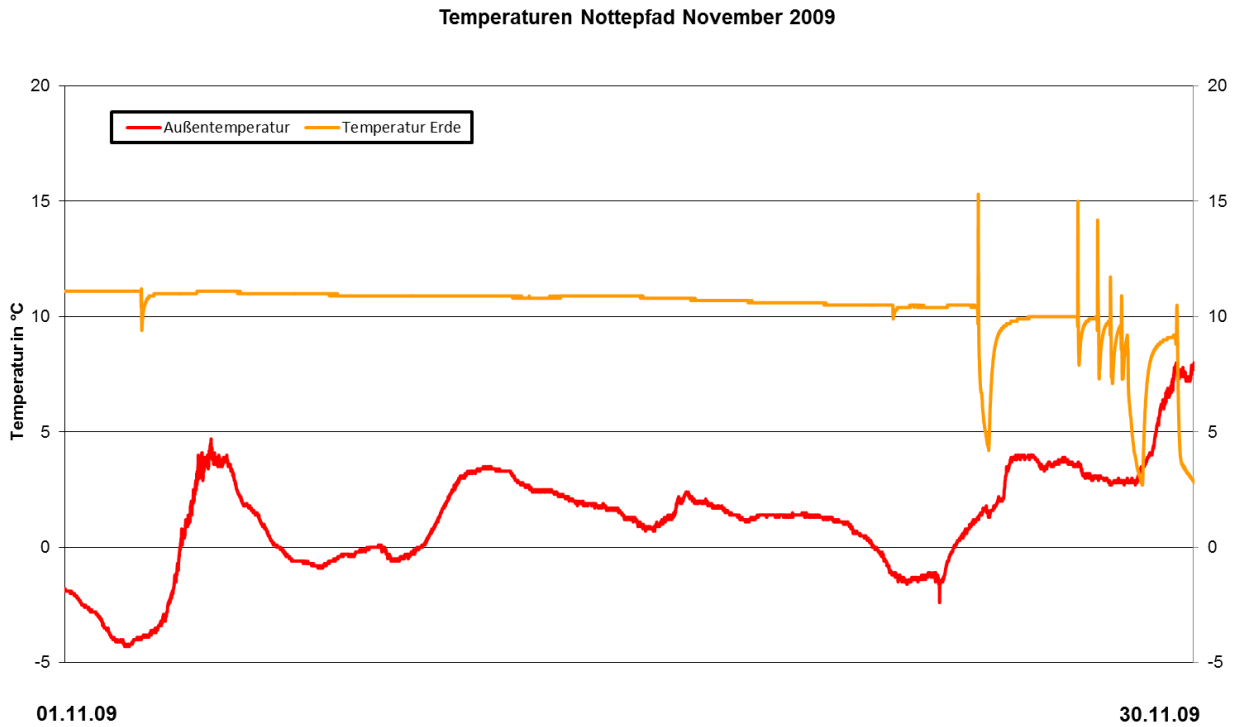


Abbildung 10-3: Kollektor Leistung im Zeitraum November 2009

Die Abbildung 10-4 zeigt die gemessenen Temperaturen in diesem Zeitraum.



**Abbildung 10-4: Temperaturverlauf im Zeitraum November 2009**

### 10.2.2 Periode 2

In dieser Periode erreichte, bedingt durch den angeforderten Leistungszug der Wärmepumpe, auch die abgegebene Leistung des Kollektors ihr Maximum. Der Leistungsabfall am Ende resultiert aus technischen Problemen der Wärmepumpe, sowie aus der in kurzer Zeit abgefallenen Bodentemperatur, verursacht durch äußere klimatische Einflüsse (siehe Außentemperatur in Abbildung 10-6).

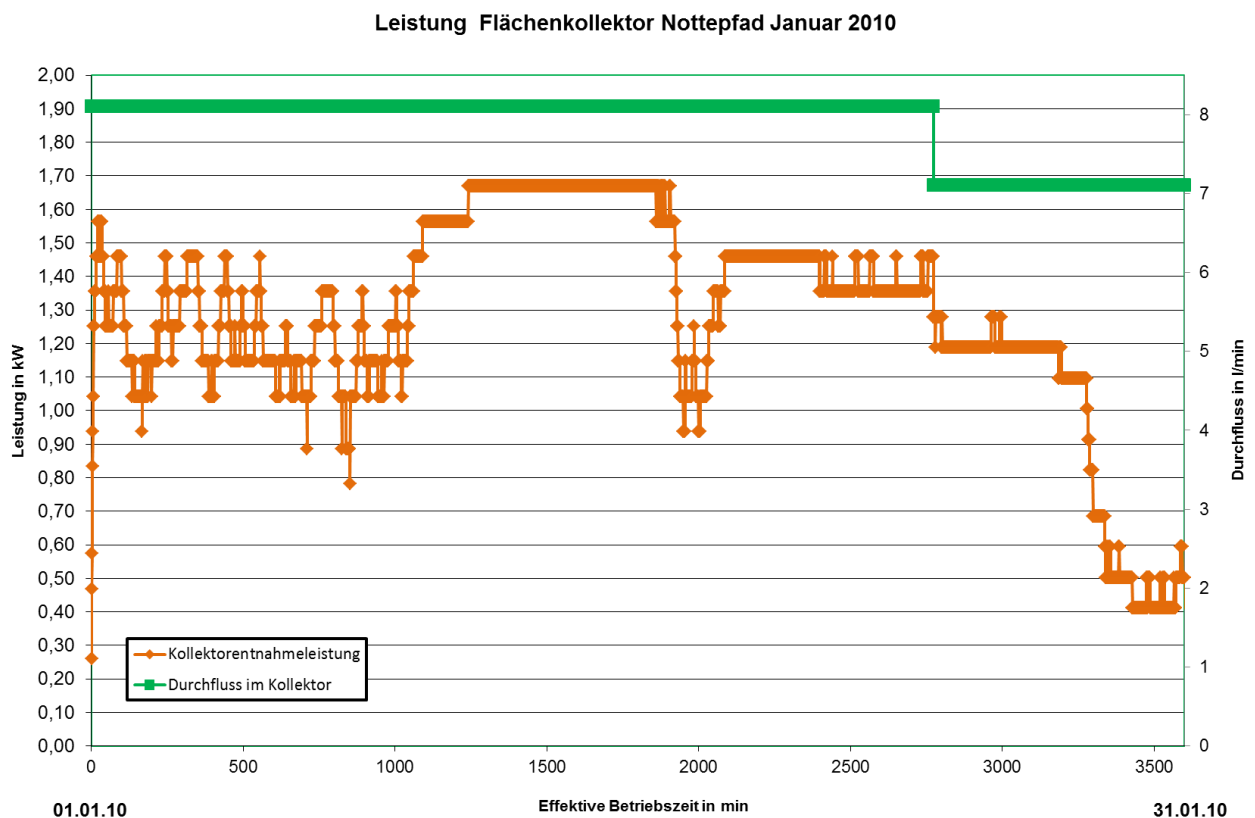


Abbildung 10-5: Kollektor Leistung im Zeitraum Januar 2010

Temperaturen Nottepfad Januar 2010

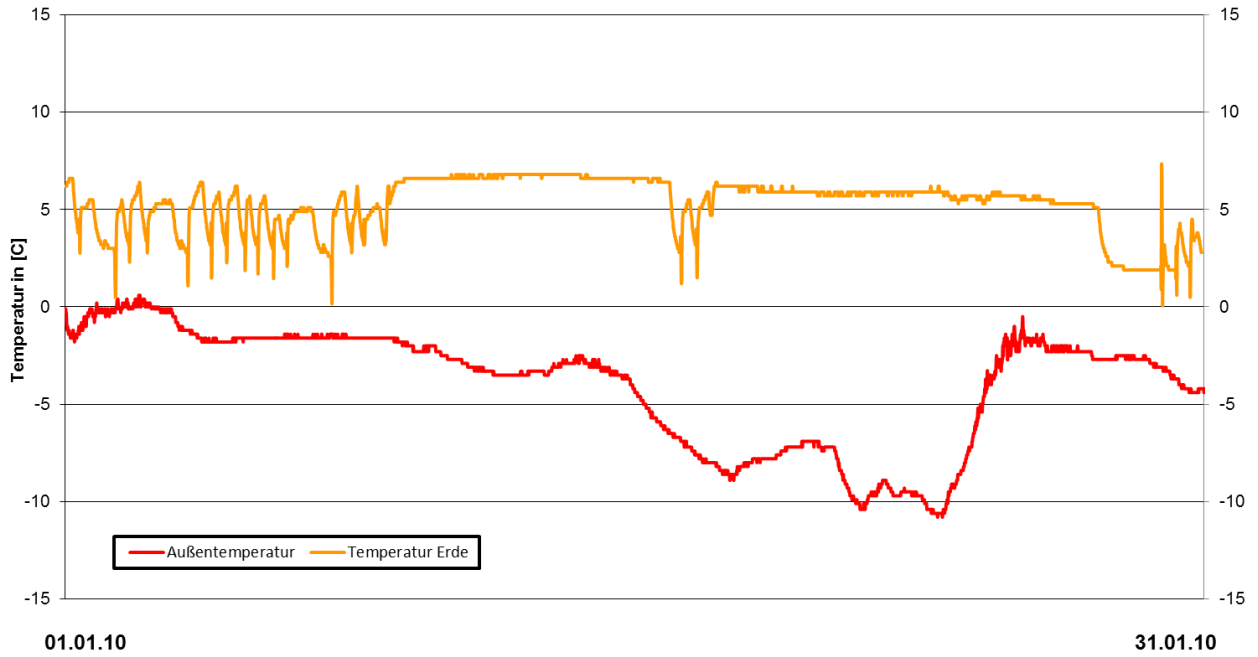
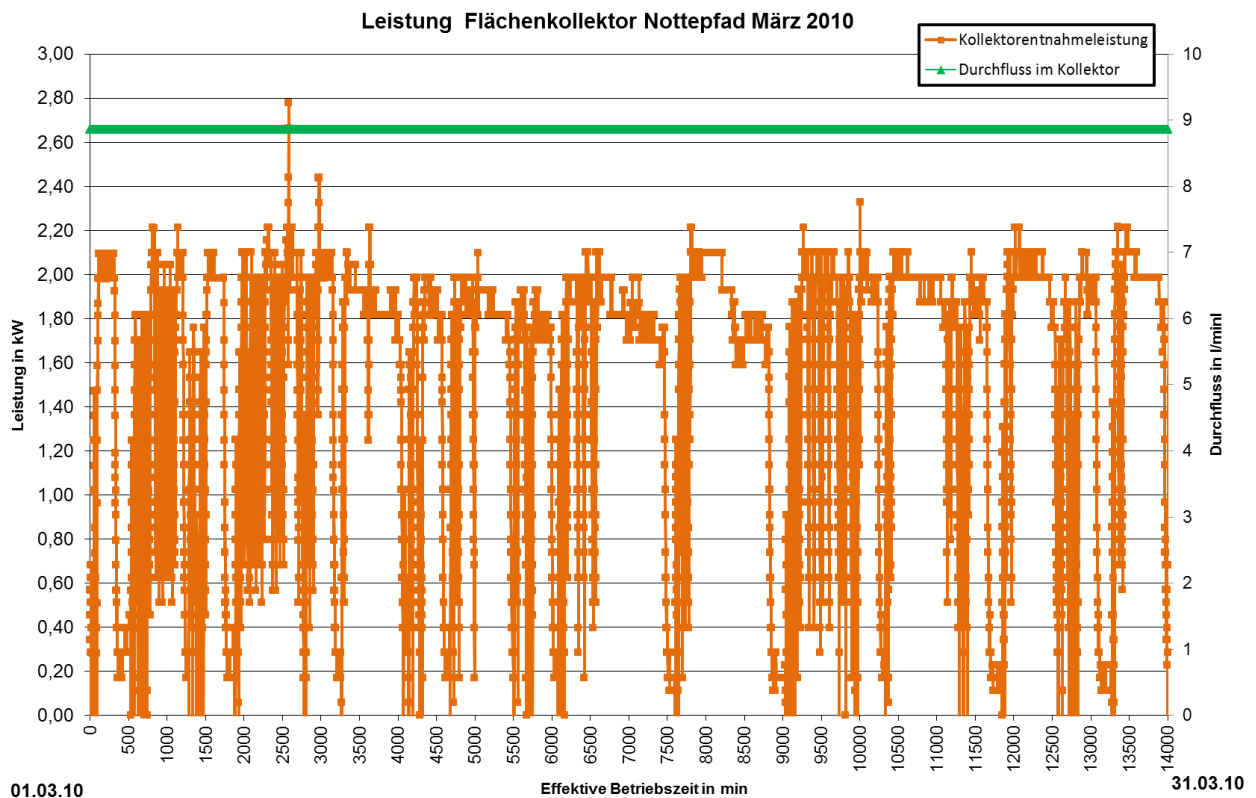


Abbildung 10-6: Temperaturverlauf im Zeitraum Januar 2010

### 10.2.3 Periode 3

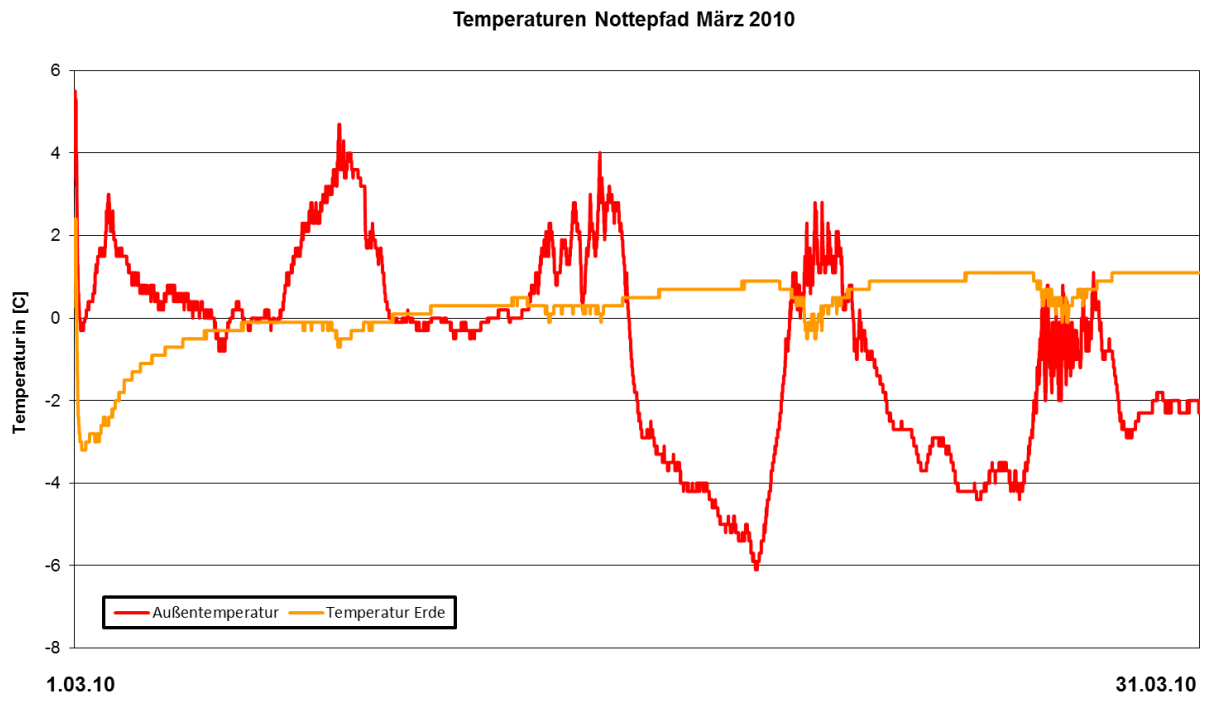
Die Abbildung 10-7 zeigt die Kollektorentnahmeleistung im Zeitraum März 2010.



**Abbildung 10-7: Kollektorentnahmeleistung im Zeitraum März 2010**

Durch den Anlagenausfall im Februar und die dadurch bedingte Regeneration des Bodens, konnte die von der Wärmepumpe angeforderte Entzugsleistung wieder vom Kollektor bereitgestellt und in Abhängigkeit der weiter ansteigend Bodentemperatur auch konstant gehalten werden.

Die Abbildung 10-8 zeigt die gemessenen Temperaturen im betrachteten Zeitraum.



**Abbildung 10-8: Temperaturverlauf im Zeitraum März 2010**



#### 10.2.4 Periode 4

Die Abbildung 10-9 zeigt die Kollektorleistung im Zeitraum April 2010.

In dieser Periode liegt die Leistung der Kollektoren geringer als in der Periode 3. Im Schnitt liegt die Leistung bei ca. 0,23 kW. Bedingt durch milde Außentemperaturen in diesem Zeitraum, war eine Bedarfsanforderung des Heizungssystems an die Wärmepumpe und damit an den Kollektor kaum vorhanden.

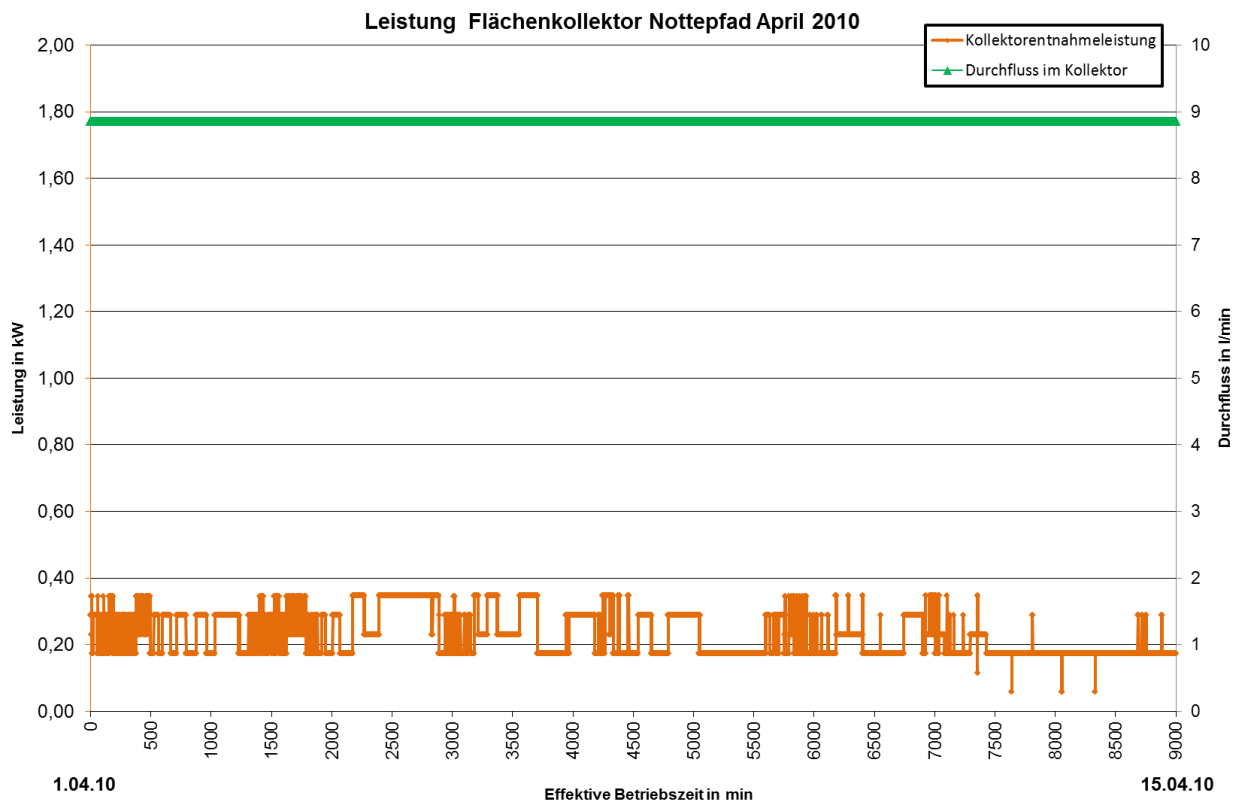


Abbildung 10-9: Kollektor Leistung im Zeitraum April 2010

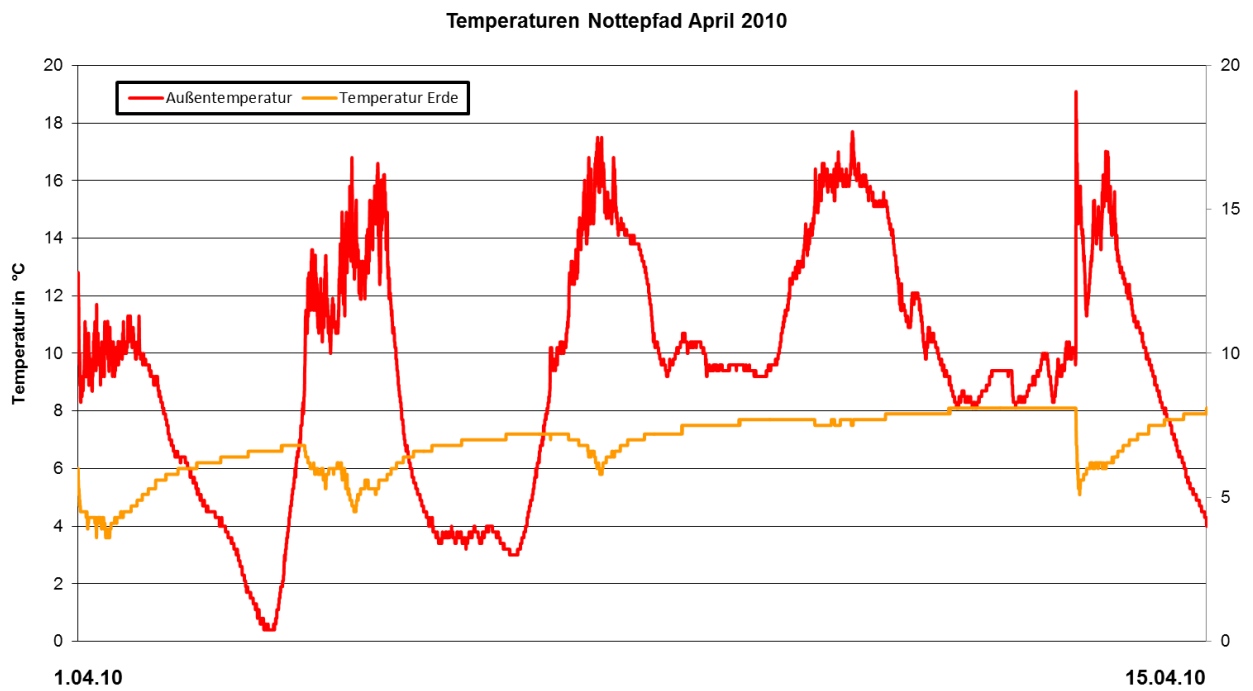


Abbildung 10-10: Temperaturverlauf im Zeitraum April 2010

---

## 11 Zusammenfassung und Fazit

Die Geothermie ist eine erneuerbare Energiequelle mit enormem Potenzial, die in Deutschland zunehmende Verbreitung findet. Mittlerweile ist das technische Know-how zur Erschließung dieses Potenzials vorhanden und auch die Anwendungstechnologien für die Wärmeversorgung von Wohngebäuden in Form von Wärmepumpen stehen zur Verfügung. Dies gilt für Elektrowärmepumpen und für einige Gaswärmepumpentypen. In vielen Fällen erweisen sich jedoch sowohl die Investitionskosten der Umweltwärmeeinkopplung als hinderlich als auch der Installationsaufwand im Falle von Flächenkollektoren insbesondere bei bestehenden Objekten. Einspareffekte und ein reduzierter Aufwand zur Einbringung können die Nutzung dieser Technologien deutlich befördern.

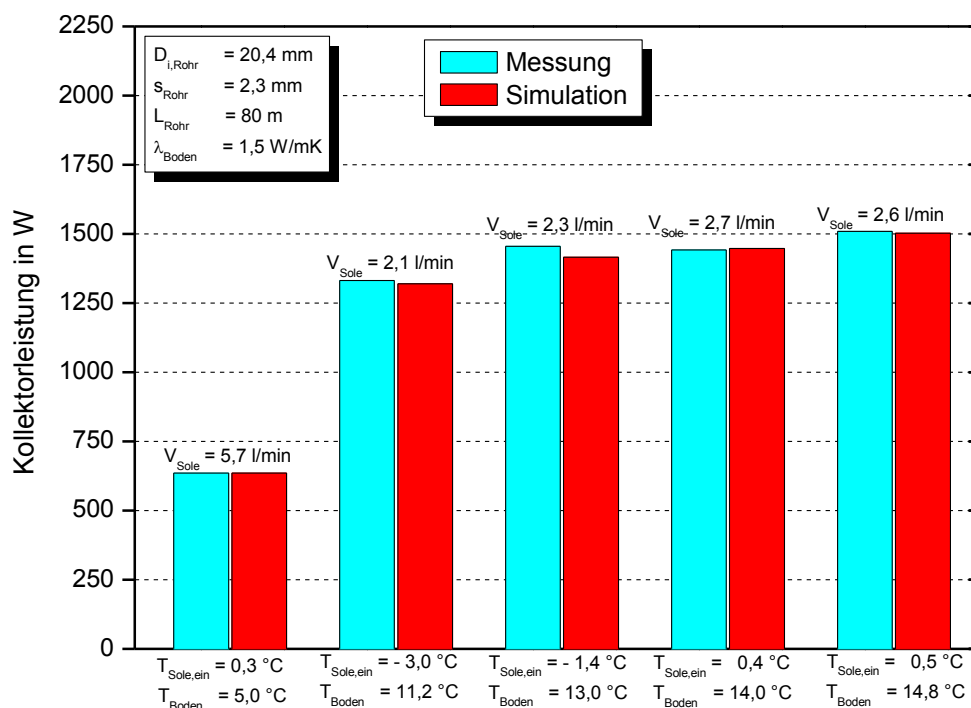
Das Hauptziel dieses Vorhabens bestand im Vergleich von Flächenkollektoren mit und ohne notwendige Erdaushubarbeiten in Bezug auf Funktion, Leistung, Kosten und Aufwand für die Installation. Dazu wurden an mehreren Standorten Kollektoren mit unterschiedlichen Verfahren verlegt und deren Effektivität vermessen. Begleitend wurden numerische Simulationen zur Auslegung durchgeführt und mit den Daten aus der praktischen Umsetzung validiert.

Ein Überblick über die Nutzung oberflächennaher Geothermiequellen bietet die Grundlage zum Verständnis der nachfolgenden Analyse und Bewertung bestehender Einbringverfahren. Sowohl das konventionelle Einbringverfahren von Flächenkollektoren als auch die Möglichkeiten der grabenlosen Verlegung werden ausführlich dokumentiert.

Für die experimentelle Projektphase wurde von dem Projektpartner ein Werkzeug zur Durchführung der innovativen grabenlosen Einbringtechnik ausgewählt und erprobt. Für den direkten Vergleich von konventioneller und innovativer Einbringtechnik bzw. der späteren Nutzungsfunktion wurden Demonstrationsanlagen an verschiedenen Standorten errichtet. Zur Aufnahme der Messdaten wurde im Vorfeld am Gas- und Wärme-Institut in Essen eine Messdatenerfassung konstruiert, die anschließend im Feld mit Datenfernablesung installiert wurde.

Für die Auslegung der Demonstrationsanlagen und für den Vergleich der unterschiedlichen Verfahren wurde die experimentelle Phase durch ausführliche numerische Simulationen begleitet und ergänzt. Wichtige Parameter und Einflussfaktoren, wie Rohrgeometrien und -dimensionierung, Wärmeleitfähigkeit des Bodens und des Rohrmaterials sowie Volumenstromänderungen beim

Soledurchfluss wurden untersucht. Die Abbildung 11-1 zeigt den direkten Vergleich der Ergebnisse einer numerischen Simulation mit gemessenen Werten an Kollektoren am Standort Essen. Die Ergebnisse aus der Simulationsrechnung zeigen eine Abweichung von maximal 2,6 % zu den Messwerten, so dass eine Genauigkeit bei der Übereinstimmung eines realen Betriebsfalls mit der Simulation gewährleistet ist. Im Gegensatz zu den Berechnungen aus Kapitel 5, die zur Parameterstudie und Auslegung durchgeführt wurden, zeigt Abbildung 11-1 den Vergleich von Messwerten mit einer Simulation auf Basis realen Betriebsbedingungen am Standort Essen.



**Abbildung 11-1: Vergleich von Ergebnissen aus Simulation und Messung**

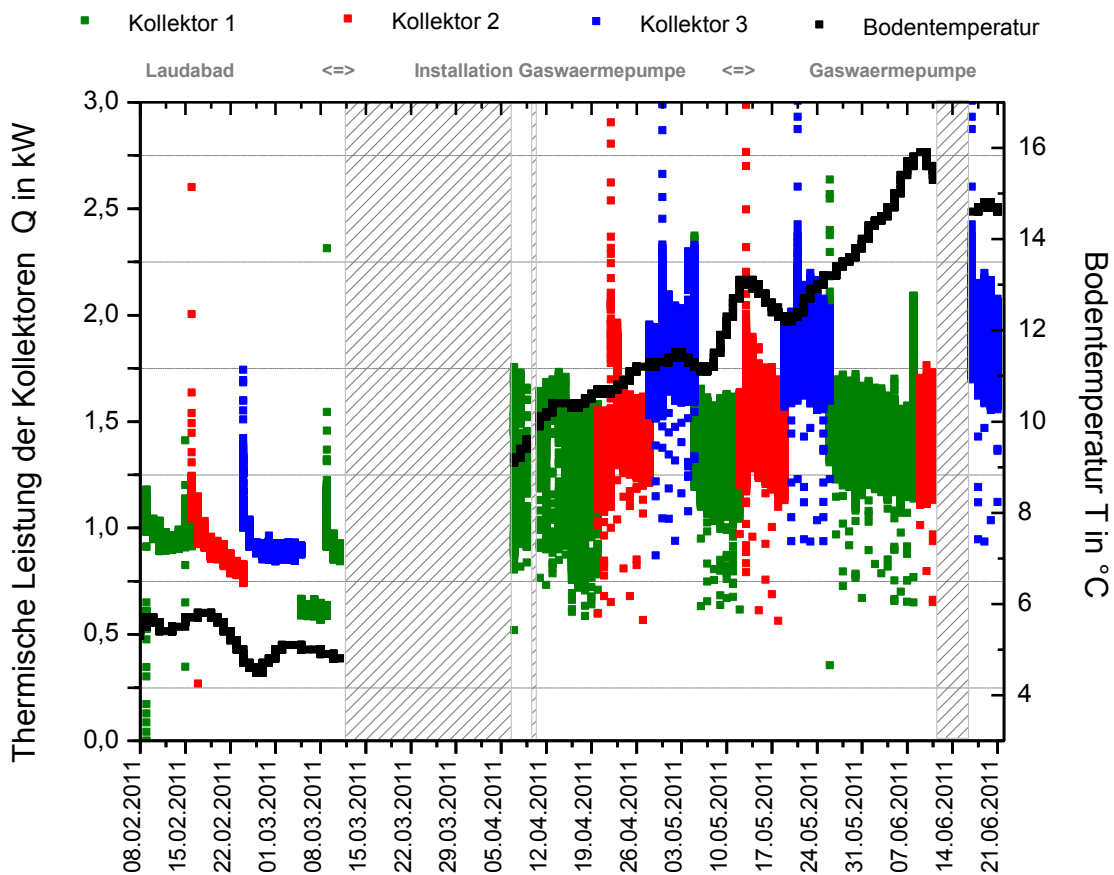
Im Rückblick haben sich bei der Versuchsdurchführung einige Schwierigkeiten gezeigt. Der Versuchsstandort wurde schwerpunktmäßig nach Kriterien der Durchführbarkeit ausgewählt, unabhängig von geologischen und hydrologischen Gegebenheiten. Einflussfaktoren, wie Bodenbeschaffenheit, ein saisonal schwankender Grundwasserspiegel, Schatten bzw. unregelmäßige Sonneneinstrahlung durch partielle Bebauung und Bepflanzung bewirken einen unregelmäßigen Wärmeeintrag und beeinflussen bedingt die Regenerationsfähigkeit des Bodens.

Die Messsysteme wurden komplett fernadministrierbar eingerichtet, eine störanfällige Verbindung zur ersten Anlage wurde durch einen im Januar 2010 installierter Repeater beseitigt.

---

Hauptproblem war die Standortfindung für die Aufstellung von Demonstrationsanlagen bzw. die Beschaffung von Gaswärmepumpen. Als Ersatz für die zum damaligen Zeitpunkt nicht verfügbaren Gaswärmepumpen wurde ein Laudabad am Standort Berlin-Wernsdorf (Berlin I) installiert. Dieses konnte allerdings keine Temperaturen unter 0°C für den Rücklauf gewährleisten, um so dem Boden auch bei niedrigen Temperaturen Wärme zu entziehen. Deshalb entsprechen die gemessenen Leistungen nicht dem technisch Möglichen. Weiterhin ist zu beachten, dass im Winter 2010 die Temperaturen durchschnittlich um 3 °C kleiner waren, als die so genannte Referenztemperatur. Auch die Sonnenscheindauer war um etwa 40 % gegenüber der Referenzzeit kürzer [12]. Diese Ergebnisse entsprechen nicht der Regel, grundsätzlich sind höhere Temperaturen zu erwarten und daraus folgend höhere Leistungen. Ein Vergleich der Kollektoren war dennoch zumindest an 2 Standorten gewährleistet. Am dritten Standort – Berlin II (Berlin-Nottenpfad) – wurde ein Kollektor mittels der Raketenschusstechnik verlegt. Eine Vergleichbarkeit zu konventionell verlegten Kollektoren ist aus oben genannten Gründen also nicht vollständig möglich. Allerdings konnte diese Anlage zur Validierung vorhandener Messdaten beitragen.

Schlussendlich weisen alle vergleichbaren Kollektoren der einzelnen Standorte ähnliche Leistungen auf. Der innovativ eingebrachte Kollektor schneidet im Vergleich geringfügig schlechter ab. Bei der Betrachtung sind auch die Wetterabhängigkeit und der zeitversetzte Betrieb zu berücksichtigen. Die Abbildung 11-2 zeigt einige Messergebnisse am Standort Essen vom Zeitraum Februar bis Juni 2011.



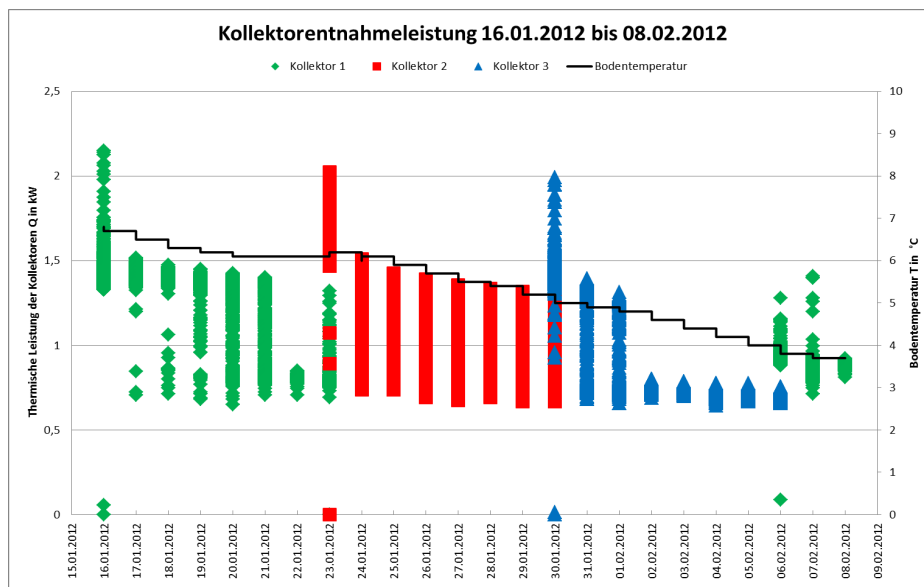
**Abbildung 11-2: Kollektorentnahmeleistung Februar bis Juni 2011 (Essen)**

Individuelle, temporäre Unterschiede bei der Kollektorleistung sind vermutlich Auswirkungen der regionalen Bodenbeschaffenheit (z. B. Feuchtigkeitsgehalt des Bodens). Auch eine ausgeprägte Regeneration zeigt sich durch Leistungsdifferenzen, je länger ein Boden regeneriert, desto höher sind anfangs seine erbrachten Leistungen. Diese sinken jedoch nach einer Weile wieder auf ein konstantes Niveau ab. Eine ausgeprägte Regeneration, wie es nur der Sommer schafft ist für einen stabilen Dauerbetrieb der Kollektoren zwingend notwendig.

Bei allen Kollektoren ist eine Abhängigkeit von den Bodentemperaturen sowie vom resultierenden  $\Delta\vartheta$  gegeben. Je größer die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$ , desto größer sind die erzielten Leistungen. Für hohe Leistungen muss die Vorlauftemperatur wesentlich kleiner als die Bodentemperatur sein. Zu niedrige Vorlauftemperaturen müssen allerdings vermieden werden, um einen übermäßigen Wärmetzug bzw. eine Vereisung zu vermeiden. Durch Gefrieren des Bodens um die Kollektorrohre können Hebungen bzw. Setzungen auftreten, wenn die Radien des gefrorenen Bodens zu groß

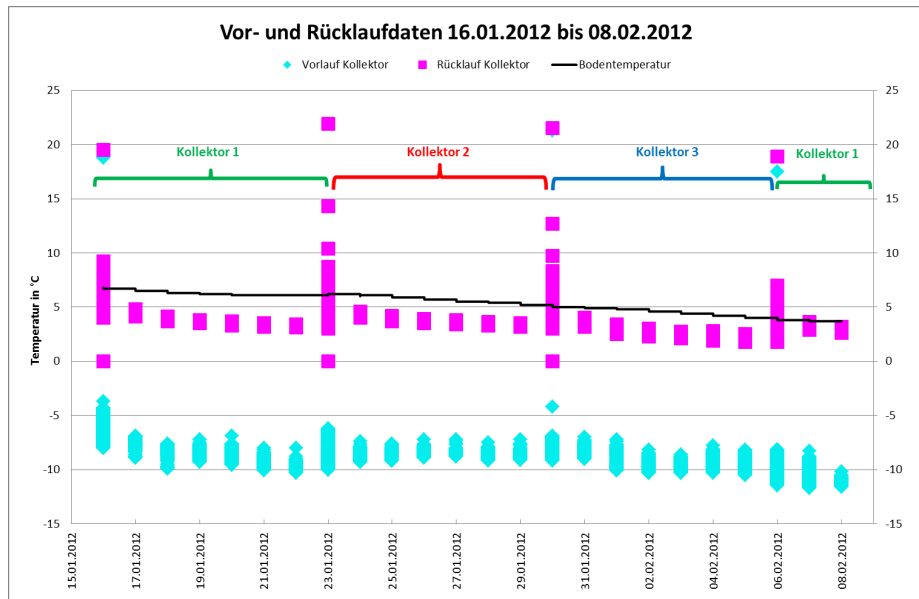
werden. Des Weiteren wird die hydraulische Leitfähigkeit unterbrochen, wenn benachbarte Eistradien zusammenwachsen, was im Frühjahr zu Matsch an der Erdoberfläche führt. Eine natürliche Regeneration wird dadurch erschwert und nachfolgende Leistungseinbrüche sind möglich.

Eine solche Abschaltung trat im Februar 2012 am Standort Essen ein, als die Vorlauftemperaturen in den Kollektor  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreichten und die Bodentemperatur  $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreichte schaltete die Anlage ab. Die Abbildung 11-3 zeigt die Messperiode kurz vor der Abschaltung.



**Abbildung 11-3: Kollektorentnahmeleistung vor der Abschaltung Februar 2012 (Essen)**

Die Abbildung 11-3 zeigt einen deutlichen Leistungsabfall bedingt durch die geringe Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  von Kollektorvor- und rücklauf. Die gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 11-4 abgebildet.



**Abbildung 11-4: Vor- und Rücklaufemperaturdaten vor der Abschaltung Februar 2012 (Essen)**

Die Datenauswertung zeigt, dass die innovative Einbringungsart zu keinen gravierenden Nachteilen in der Wärmeleistung führt. Das System zeigt ein ähnliches Verhalten wie ein konventionell eingebrachter Kollektor. Auch bei den Kollektorenarten ist innerhalb des Projektes kein klarer Unterschied festgestellt worden. Der Vierfachkollektor arbeitet trotz seiner größeren Außenfläche genauso gut wie der einfache Kollektor und erzielt gleiche Leistungen. In der Praxis wird somit letzterer wegen des geringeren Materialpreises Verwendung finden.

Das Ziel war die Bewertung der technischen Möglichkeiten der innovativen Einbringtechnik und die damit verbundenen wirtschaftlichen Aspekte. Da die Leistung der konventionellen Systeme annähernd den innovativem Verlegeverfahren entspricht, bietet das neue Verfahren Vorteile durch den geringeren Aufwand und geringere Kosten.

Nachfolgend sind beispielhaft die Kosten anhand einer für 6–7 kW ausgelegten Anlage ermittelt worden. Dies entspricht der Heizlast eines durchschnittlichen Niedrig-Energie-Einfamilienhauses. Die Kosten dienen lediglich als Anhaltspunkte, da eine Reihe von Faktoren hier einwirken, wie z.B. Entzugsleistung des Bodens, Einbringbarkeit mit den jeweiligen Verfahren, Materialart, individuelle Firmenangebotskosten usw.

Die teuerste Anlagenvariante ist der konventionell eingebrachte Flächenkollektor mit ca. 10.000 €. Horizontal verlegte Flächenkollektoren, verursachen in etwa Kosten von 4.000 € bis 5.000 €, wenn sie



mit einer Erdrakete eingebracht werden. Das neu entwickelte, optimierte Verfahren liegt ca. 2.000 bis 3.000 € unter den Kosten der bisher in der Praxis angewendeten Verfahren. Ein ungefährender Kostenüberblick<sup>4</sup> ist in der Tabelle 11-1 gelistet.

Tabelle 11-1: Kostenübersicht der unterschiedlichen Systeme [3]

Anlagenvariation	Einbringart	geschätzte Kosten in [€]
Flächenkollektor, Horizontal	Konventionelles Aushubverfahren	10.000
Flächenkollektor, Horizontal	Pressverfahren	10.000
Flächenkollektor, Horizontal	Raketenverfahren	4.000 - 5.000
Flächenkollektor, Horizontal	„geschossen“ mit innovativen Verfahren (s. Kapitel 4)	2.000 - 3.000

Die Kosten einer Wärmepumpe sind nicht berücksichtigt (ab ca. 10.000 €).

Anhand der Messergebnisse sind nur geringe Unterschiede bei der Kollektorentnahmeleistung zwischen den konventionellen und innovativen Einbringverfahren fest zu stellen. Das innovative Verfahren ist jedoch um rund ein Drittel günstiger und somit erheblich wirtschaftlicher gegenüber den konventionellen Systemen. Darüber hinaus stellt das innovative Verfahren eine wesentlich einfachere und schnellere Installationsmöglichkeit dar. Als Nachteil ist eine erhöhte Sorgfalt bei der Verlegung mit „Erdraketen“ zu nennen, insbesondere bei steinigem Böden mit größeren Festkörpern. Hier kann es zu Abweichungen beim Durchtrieb kommen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass durch den erweiterten Anwendungsbereich auch Marktsegmente und Kundenkreise mit sanierten Alt- bzw. Bestandbauten von der Nutzung dieser Heizungstechnik in Kombination mit der Verlegeart profitieren können, da aufwendige Erdarbeiten entfallen und die Platzanforderungen geringer sind.

<sup>4</sup> Die Kosten für die grabenlosen Verfahren beruhen auf aktuellen Schätzungen der Firma Bega.Tec. Da es sich momentan noch um Prototyp-Verfahren handelt, sind Kostensenkungen bei einer zukünftigen Marktdurchdringung zu erwarten.

---

## 12 Literaturangaben

- [1] Broschüre der Firma Arcoso, Stand 10.08.09
  
- [2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., URL: <http://asue.de/themen/gaswaermepumpe-kaelte/index.html>, Abfragedatum: 30.08.2009
  
- [3] Information der Firma Bega.Tec, Befragung von Herrn Dr. Bohmann, Geschäftsführer der Bega.tec GmbH, Berlin, Stand: 27.08.2009
  
- [4] Bremicker, Jörg, Vaillant Deutschland GmbH & Co KG, Essen, Vortrag: Erschließung der Erneuerbaren Energien vom 20.01.06
  
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), "Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung", Blatt 5, Stand: Juni 2009
  
- [6] Bundesverband Wärmepumpen e.V., Broschüre Stand 2009
  
- [7] Wirtschaftsministerium BW, Geothermienutzung in Deutschland, Folie 15, Stand: 2008
  
- [8] Christensen, Sven, URL. <http://www.schleswig-holstein.de>, Geothermie in Schleswig-Holstein, Blatt 7 Stand: 2004
  
- [9] Cube, H.L./ Steimle, F., Wärmepumpen, VDI - Verlag, Düsseldorf 1978
  
- [10] DIN, 3 Auflage 2000, Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, 2000
  
- [11] DIN, 10. Auflage 2006, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Erdarbeiten, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, 2006

- 
- [12] Deutscher Wetterdienst, URL: <http://www.dwd.de>, Abfragedatum: 11.02.2010
- [13] Gesellschaft zur Entwicklung und Förderung von Geothermenanlagen mbH, URL: <http://www.gefga.de/frameseite.html>, Abfragedatum: 22.09.2009
- [14] GW 304 DVGW, 12. Auflage 2008, Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches, Hamburg 2008
- [15] Gaswärme-Institut e. V. Essen, URL: <http://www.gwi-essen.de/>, Abfragedatum: 22.09.2009
- [16] Hintermaier, Erhard, Wörterbuch der Bodenkunde, Enke Verlag, Stuttgart 1997
- [17] Hölterhoff, Jens, 2. Norddeutsche Kanalbautage in Schwerin, Grabenlose Verlegung von Abwasserleitungen und Kanälen 1./2.03.2008
- [18] The Information Resource for the Water Industry, URL: <http://www.idswater.com>, Abfragedatum: 3.12.09
- [19] Jager, Lutz / Kessler, Albrecht / Garte, Hans-Jürgen, Langzeitmessungen zum Strahlungs- und Energiehaushalt eines Kiefernwaldes, Symposium Wald und Wasser : vom 2. - 5. September 1984 in Grafenau, Bayerischer Wald
- [20] Kai Florian Scholten, Zahlen entsprechen dem Durchschnitt von eigener Befragung von Unternehmen
- [21] Loose, Peter, Erdwärmenutzung - Versorgungstechnische Planung und Berechnung, 3. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2009

- 
- [22] Broschüre der Firma NIBE Systemtechnik GmbH, Celle, NIBE Kompakt- Absorber, Stand: 2009
- [23] Johannes Reichelt, Wärmepumpen-Stand der Technik, C.F Müller Verlag, Heidelberg 2008
- [24] Scheffer, F./ Schachtschabel, P., Lehrbuch der Bodenkunde - 15. Auflage, Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag 2002
- [25] Schilke, Karl / Hirschfelder, Petra, Agrarökologie, Metzler-Schulbuchverlag, 1992
- [26] Tracto Technik GmbH & Co. KG, URL: <http://www.tracto-technik.de>, Stand April 2009
- [27] Skript der TUM Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau Leistungstunnelbau, Stand April 2009
- [28] Unbekannte Quelle
- [29] VDI, VDI - Richtlinie 4640 Blatt 2, September 2001, Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2001
- [30] VDI, VDI - Richtlinie VDI 4650 Blatt 2, März 2009, Berechnungen von Wärmepumpen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2009
- [31] Rinne, Frank, 1. Nürnberger Branchentreff Internationales Wärmepumpen-Symposium 18./19.9.2007
- [32] REHAU AG + Co., Rheniumhaus in 95111 Rehau, Handelsregister beim Amtsgericht Hof, HRA 2232, Umsatzsteueridentifikationsnummer: DE 132 944 654

- 
- [33] Website KantonSchwyz, Abrufdatum 19.10.2011  
[http://www.sz.ch/xml\\_1/internet/de/application/d65/d23403/f71.cfm](http://www.sz.ch/xml_1/internet/de/application/d65/d23403/f71.cfm)
- [34] FLUENT 6.3: Users Guide, 2009
- [35] Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; Hemisphere Publishing Coop.,  
Washington, 1980.
- [36] Noll, B: Numerische Strömungsmechanik, Grundlagen;
- [37] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.
- [38] Launder, B.E.; Spalding, D.B.: The Numerical Computation of Turbulent Flows;  
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, pp. 269-289.
- [39] Al-Halbouni, A.: Entwicklung NO<sub>x</sub>-emissionsminimierter Heizkesselfeuerungen;  
Shaker Verlag Aachen 2001; ISBN 3-8265-8535-6
- [40] Launder, B.E.; Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence; London;  
Academic Press 1972
- [41] Görner K.: Technische Verbrennung. Grundlagen, Modellierung, Simulation.  
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1991
- [42] Launder, B.E.; Spalding, D.B.: The Numerical Computation of Turbulent Flows;  
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, pp. 269-289.
- [43] Yakhot, V.; Orszag, S.A.: Renormalization Group Analysis of Turbulence: 1. Basic  
Theory; Journal of Scientific Computing, 1, 1986, pp 1-51.
- [44] Skih, T.H. et al.: A New k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number  
Turbulent Flows - Model Development and Validation; Computer Fluids, 24, 1995, pp  
227-238.

- 
- [45] Gibson, H.M.; Launder, B.E.: Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer; *J. Fluid Mech.*, 86, 1978, p 491.
- [46] Naot, D.; Shavit, A.; Wolfshtein, M.: Numerical Calculation of Reynolds Stresses in a Square Duct with Secondary Flow; *Wärme- und Stoffübertragung*, 7, 1974, S.151-161.
- [47] Gibson, M.M.; Rodi, W.: A Reynolds-Stress Closure Model of Turbulence Applied to the Calculation of a Highly Curved Mixing Layer; *J. Fluid Mech.*, 103, 1981, pp 161-182.
- [48] Launder, B.E.; Reece, G.J.; Rodi, W.: progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure; *J. Fluid Mech.*, 68, 1974, pp 537-566.
- [49] Donaldson, C.; Varma, A.K.: Remarks on the Construction of a Second-Order, Closure Description of Turbulent Reacting Flows; *Comb. Sci. Tech.*, 13, 1976, pp 55-78.
- [50] Daly, B.J.; Harlow, F.H.: Transport Equation of Turbulence; *Physics of Fluids*, 13, 1970, pp 2634-2649.
- [51] Janika, J.: Reynolds Stress Model of Turbulence and its Application to Thin Shear Flows; *J. Fluid Mech.*, 52, 1972, pp 609-638.
- [52] Rodi, W.: The Prediction of Free Turbulence Boundary Layers by Use of a Two-Equation Model of Turbulence; Ph.D. Thesis, University of London, 1972.
- [53] Moin, P.; Kim, J.: Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow; *J. Fluid Mech.*, 118, 1982, pp 341-377.
- [54] Acton, E.: The Modelling of Large Eddies in a Two-Dimensional Shear Layer; *J. Fluid Mech.*, 76, 1976, Part 3, pp 561-592.
- [55] Antonopoulos-Domis, M.: Large-Eddy Simulation of a Passive Scalar in Isotropic Turbulence; *J. Fluid Mech.*, 104, 1981, pp 55-79.

- 
- [56] Leslie, D.C.; Quarini, G.L.: The Application of Turbulence Theory to the Formulation of Subgrid Modelling Procedures; J. Fluid Mech., 91, 1979, Part 1, pp 65-91.
- [57] Voke, P.R.; Collins, M.W.: Large-Eddy Simulations of Turbulent Flow in Plain and Distorted Channels; HTFS Harwell Research Symp., Univ. of Warwick, U.K., 1984.137
- [58] Moin, P.: Numerical Simulation of Wall-Bounded Turbulent Shear Flows; 8th ICNMF, Aachen, 1982.
- [59] Moffatt, H.K.: Viscous and Resistive Eddies Near a Sharp Corner; Journal of Fluid Mechanics, 1964.
- [60] D. C. Wilcox.: Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- [61] FLUENT 13.0 Documentation
- [62] Umweltjournal.de | Artikel Nr.: 738: Geothermie - Nutzung der Erdwärme,  
[http://www.umweltjournal.de/KAT-nachrichten/kat33geothermie\\_2.php](http://www.umweltjournal.de/KAT-nachrichten/kat33geothermie_2.php), Stand  
04.10.2012
- [63] Hintermaier, Erhard, Wörterbuch der Bodenkunde, Enke Verlag, Stuttgart 1997
- [64] Loose, Peter, Erdwärmennutzung - Versorgungstechnische Planung und Berechnung, 3. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2009
- [65]