

BLZ Geotechnik Service GmbH  
Gommern

Herstellung und Anwendung einer  
Erdwärmesonde mit hohem Wärmeübertragungsvermögen als Ringrohr-  
sonde

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 32284 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

## ***Abschlussbericht***

von

Dr. Rolf Wagner

und

Marcus Müller

Gommern, April 2019



**Projektkennblatt**  
DER  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>32284/01</b>	Referat	<b>24/2</b>	Fördersumme	<b>469.148,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Herstellung und Anwendung einer Erdwärmesonde mit hohem Wärmeübertragungsvermögen als Ringraumsonde</b>			
<b>Stichworte</b>		Energie, Sonde			
Laufzeit		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>3 Jahre und 10 Monate</b>		<b>01.08.2015</b>	<b>30.04.2019</b>	<b>1</b>	
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		BLZ Geotechnik Service GmbH Gommern		Tel	(039200) 7020
				Fax	(039200) 70243
				Projektleitung	
				Dr. Rolf Wagner	
				Bearbeiter	
				Marcus Müller	

<b>Kooperationspartner</b>	keine
----------------------------	-------

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Das Projekt befasst sich mit der technischen Entwicklung, Herstellung und Anwendung einer neuen Sondenform für die Gewinnung von Erdwärme. Die Sonde soll einen wesentlich besseren Wärmeübergang sicherstellen. Die Sonde soll als PE-Sonde hergestellt werden und als praxistaugliche und effiziente Ausrüstung für die Erdwärmehohrungen zum Einsatz kommen. Zum Erreichen der Zielstellung wurde die Grundkonzeption der Sonde mit mehreren Außenrohren und einem Zentralrohr konsequent umgesetzt. Die angestrebten Eigenschaften wurden in einer umfangreichen Entwicklungsarbeit in die praktische Herstellung überführt. Mit zahlreichen Ergänzungen, Anpassungen und Änderungen wurde von dem ursprünglichen Bau- und Herstellungsgedanken eine für den praktischen Einsatz geeignete Ringrohrerdwärmesonde entwickelt. Die RR-EWS setzt die notwendigen geplanten Eigenschaften für die Wärmeübertragung zwischen Sonde und Erdreich um.

Der Anlass für die effizientere Energiegewinnung ergibt sich aus der höheren Nutzung des regenerativen Anteils bei der Wärmeversorgung und Klimatisierung von Gebäuden. Die Erdwärme steht als regenerative Energie zur Verfügung, die mit Wärmepumpen von dem geringen Temperaturniveau im Erdreich auf das Temperaturniveau im Heizkreis gehoben werden muss. Dabei übernimmt die Erdwärmesonde eine entscheidende Aufgabe. Je effizienter die Wärmeübertragung aus dem Erdreich gestaltet werden kann, umso weniger Fremdenergie muss aufgebracht werden. Effizientere Erdwärmesonden können deutlich zur Schonung der Ressourcen beitragen. Es wird weiter das Ziel verfolgt, eine energetisch bessere Sonde herzustellen, die ohne zusätzlichen Aufwand für die Bohrarbeiten und von den handelsüblichen Wärmepumpen genutzt werden kann.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Bei der Entwicklung der Herstellungsverfahren für die Ringrohrsonden hat sich im Projektablauf eine Vielzahl von geplanten Prozessen leider nicht wie gewünscht realisieren lassen. Die Arbeitsschritte mussten immer wieder an die sich eingestellten Bedingungen angepasst werden. Das war notwendig, um die angestrebten Ziele, wie kleiner Durchmesser (ca. 90mm), Anordnung der Außenrohre an der Bohrlochwand, geringe Systemdurchlässigkeit und vor allem wiederholbare qualitätsgerechte Fertigung der Verbindung der Rohre mit dem Sondenfuß und -kopf ohne Zugeständnisse umzusetzen.

Von den geplanten Arbeitsschritten musste deshalb mit anderen Methoden die gewünschte Konstruktionsform realisiert werden. Um das zu verdeutlichen, sollen hier nur die auffälligsten Änderungen erwähnt werden:

- Optimierung des Durchmessers

In der ursprünglichen Konstruktion wurden 12 Außenrohre auf zwei Ebenen vorgesehen. Die fertiggestellten Komponenten erwiesen sich aber für eine künftige Fertigung als nicht brauchbar. Das Schweißen von jeweils 6 Rohren auf zwei Etagen kann nur mit extrem hohem Aufwand realisiert werden. Der minimale Durchmesser lag mit 96 mm auch über den angestrebten 90 mm.

Vor einer Neukonstruktion wurde die optimale Sondenanzahl für die Energieeffizienz in Bezug zu dem Fertigungsaufwand mit Simulationsrechnungen bestimmt. Mit 10 Außenrohren kann man bei einem Wunschkreismesser von 90mm alle Rohre auf eine Ebene bringen. Diese Variante wurde auch umgesetzt.

- Schweißtechnologie für die Einbindung von 10 Rohren

Die PE-Schweißung von einzelnen Rohren (10 Stück außen und 1 Stück zentral) kann nicht manuell gefertigt werden. Ebenso ist das Schweißen von kleinen dünnwandigen Rohren kompliziert. Aus diesen Gründen musste eine halbautomatisch programmgesteuerte Schweißvorrichtung entwickelt und hergestellt werden. Da es für diese Apparate keine Vorbilder gibt, wurde es auch ein Prozess mit einigen Umwegen, der nun aber die gewünschten Eigenschaften der Sonde umsetzt.

- Anordnung der Außenrohre an der Bohrlochwand

Die Außenrohre werden mit Hilfe eines Schutzschlauches in ihre Position gebracht. Hierzu sind die Rohre von innen mit dem Schlauch zu verbinden. Das geplante Verfahren, die Rohre mit Haken oder Schlingen in kurzen Abständen zu befestigen, ließ sich nicht umsetzen. Es wurde deshalb als Alternative auf ein Verkleben der Rohre von innen an den Schlauch orientiert. Auch hier gab es kein Vorbild. Die Auswahl des Klebers, das Beschichten der Rohre mit Kleber, die verdrehfreie Führung der Rohre über große Längen und das Verkleben selbst waren zu entwickeln. Auch dieser Arbeitsschritt musste programmgesteuert ausgeführt werden.

Mit den einzelnen Verfahrensschritten zur Herstellung sind die Grundlagen geschaffen, die Sonde zu komplettieren und für einen Versuch bereitzustellen. Für die Erprobung der Sonde wurde eine 38 m tiefe Testbohrung hergestellt. Diese Bohrung hat den Vorteil, dass die Sonde nach dem Einsatz wieder ausgebaut und auf Unregelmäßigkeiten untersucht werden kann. Das Bohrloch besitzt einen Durchmesser von 240 mm und kann so noch eine Innenrohrtour von 150 mm aufnehmen, in die die Sonde eingebaut wird. Für die Kontrolle kann die gesamte Innenrohrtour inklusive Ringrohrsonde ausgebaut und übertragen mit der Sonde visuell kontrolliert werden. Die Testbohrung ist nicht ausgelegt um die wärmetechnischen Eigenschaften der Sonde zu untersuchen. Hier sind Versuche in Bochum im Oktober/November 2019 auf einem Testfeld geplant, um Vergleiche mit bereits vorhandenen konventionellen Sonden ziehen zu können. Die Ergebnisse sind nach der Heizperiode 2019-2020 zu erwarten und werden nachgereicht.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Mit Beginn des Projektes waren die Ergebnisse für die Effizienzverbesserung der neuen Ringrohrsonde aus theoretischen Untersuchungen bekannt. Mit Simulationsrechnungen wurde eine deutliche Effizienzsteigerung ausgewiesen. Im Rahmen dieser Projektbearbeitung wurde die Software immer wieder an neue Aufgabenstellungen angepasst, so dass die verschiedenen Einsatzbedingungen und Konstruktionen vor der Fertigung auf ihre Wirksamkeit überprüft werden konnten. Mit diesen Kenntnissen erfolgte die Planung und Auslegung der Ringrohrsonde. Als Material wird das für die Rohre der Erdwärmesonden übliche Polyethylen (PE 100 - RC) ausgewählt. Der Sondenfuß und -kopf wird aus PE 100 hergestellt. Bezüglich der Druckstabilität wird SDR 11 eingesetzt, um in Analogie zu den bisher vorhandenen Standardsonden den gleichen Teufenbereich abdecken zu können. Aus dem Wandstärkenverhältnis wurde die Dimensionierung der Außenrohre mit DN16 und dem Zentralrohr mit DN40 so ausgelegt, dass der Sondenaußendurchmesser von 100 mm nicht überschritten wird. Für diese Rohrkombination wurden zwei Konstruktionsvarianten bearbeitet. Sowohl für 12 Außenrohre als auch für 10 Außenrohre wurden die Sondenfüße konstruiert und gebaut. Die 12-Rohr-Variante ist für den üblichen Bohrungsdurchmesser von 150 + 20 mm die konstruktive Grenze. In dem Fall ist es notwendig, die Außenrohre in zwei Etagen im Sondenfuß einzubauen. Da aber mit einer 10-Rohr-Variante keine deutliche Verschlechterung der Wärmeübertragung aus den Simulationsrechnungen hervorgeht und die 10 Rohre auf einer Ebene angeordnet werden können, wurde die 12-Rohr-Variante nicht mehr weiter verfolgt. Beide Varianten erfüllen die Anforderungen der hydraulischen Auslegung der handelsüblichen Wärmepumpen und sind mit den Zirkulationspumpen zu betreiben. Unter diesen Gegebenheiten erfordert die Ringrohrsonde bei effizienterer Wärmeübertragung aus dem Erdreich keine wesentlichen Änderungen an den Schnittstellen zur Wärmepumpe und zur Bohrtechnik.

Der Sondenfuß unterscheidet sich wesentlich von den bekannten Typen. Während bei Einfach- oder Doppel-U-Rohr-Sonden im Vor- und Rücklauf die gleiche Rohrdimension verwendet wird, müssen bei der Ringrohrsonde auf dem kleinen Raum im Bohrloch die hydraulische und mechanische Verbindung von mindestens 10 kleinen Rohren und einem großen Rohr hergestellt werden. Die Konstruktion erfordert eine komplizierte Fertigung. Nach umfangreichen manuellen Testschweißungen, sowohl mit 12 als auch mit 10 Rohren, konnte der einfache Bearbeitungsschritt nicht umgesetzt werden. Eine zufriedenstellende Herstellung von Mustern war nicht möglich. Um das Projekt nicht zu gefährden, wurde die maschinelle Schweißung ein wichtiger Bestandteil des Vorhabens. Da es keine Vorbilder für die Fertigung gab, wurde schrittweise eine programmgesteuerte Schweißvorrichtung entwickelt und erprobt.

Nach Auswertung und Bemusterung der Schweißverbindungen wurde die Konzentration auf den Nachweis einer reproduzierbaren Fertigungsmöglichkeit gelegt. Zum gegenwärtigen Stand kann geschlussfolgert werden, dass die Fertigung des Sondenfußes aus einem PE-Gussmaterial und extrudierten Rohren durch Schweißen hergestellt werden kann. Für eine Herstellung im Spritzguss- oder Pressverfahren oder auch im 3-D-Druck sind die Kosten für Kleinserien wesentlich zu hoch und werden deshalb nicht weiter verfolgt.

Der neue Sondenfuß kann mit den gebräuchlichen Qualitätstests für Geothermiesonden ebenfalls bewertet werden, so dass eine Freigabe für die praktische Anwendung erwartet werden kann. Bei der Erarbeitung des Projektes wurden die Konstruktion des Sondenfußes und die Rohrdimension für die Erdwärmesonden bis 150 m ausgelegt. Diese maximale Länge kann mit den entwickelten Vorrichtungen und Anlagen hergestellt werden.

Die 11 Rohre inklusive ein Verfüllrohr sind bei der Ringrohrsonde in einem gemeinsamen Verfüllschlauch einzubinden. Dieser Schlauch soll die Rohre beim Einbau schützen und nach dem Einbau den Verfüllbaustoff aufnehmen. Die Außenrohre werden mit dem Verfüllschlauch verbunden, so dass sie mit dem Aufblähen des Schlauches mitgeführt und an der Bohrlochwand angelagert werden. Dieser Verfüllschlauch sorgt für die sichere Abdichtung in den Stauerbereichen zwischen den Grundwasserleitern und verhindert Verluste des Verfüllmaterials ins Gebirge. Die Anlagerung der Sondenrohre an der Bohrlochwand überträgt die Wärme aus dem Erdreich besonders gut und bietet mit der großen Oberfläche einen guten Wärmeübergang auf die zirkulierende Sole.

Bei der Herstellung der Verbindung zwischen Außenrohren und Verfüllschlauch wurden Schlingen und Haken nach Versuchen als nicht praktikabel eingeschätzt. Für die Umsetzung der Verbindung wurde eine programmgesteuerte Klebetechnologie entwickelt. Das fertig konfektionierte Rohrbündel wird auf eine Wechseltrommel gewickelt. Für den Feldeinsatz werden Trommeln mit einem Biegeradius > 70 cm eingesetzt. Der maximale Trommeldurchmesser von 2,30 m kann eine 150 m lange Ringrohrsonde aufnehmen.

Mit der Ringrohrsonde wird der Effizienzvorteil der erdgekoppelten Systeme gegenüber den Luftwärmepumpen ausgebaut. Auch an Standorten mit Teufenbeschränkung, bei geringem Flächenangebot in dicht bebautem Gebiet

und bei Heiz-Kühl-Anwendungen ist die Effizienz des Wärmeübertragers (Erdwärmesonde) besonders nützlich. Die relativ aufwendig hergestellten Bohrungen werden mit der Ringrohrsonde über den vollen Durchmesser energetisch genutzt.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

In Simulationsberechnungen wurden die energetischen Vorteile für den Wärmeentzug mit Erdwärmesonden, die aus mehreren kleinen Außenrohren und einem großen zentralen Innenrohr aufgebaut sind, dargestellt. Das Simulationsprogramm ist in

- Häfner, F.; Wagner, R. und Meusel, L. "Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen" Springer-Verlag 2015 beschrieben.

Die theoretischen Voraussetzungen und Simulationsergebnisse sind in einer Veröffentlichung in der

- Wagner, R.; Häfner, F.; Heinemann, D. *bbr 12-2013*

zusammengefasst und versprechen ein großes Potential im Energiegewinn.

Das Schlauch-Rohr-System wurde 2017 von Wagner, R. als Patent angemeldet - Az.: 10 2017 008 566.8

Auf folgenden Fachtagungen

- Deutscher Geothermischer Kongress Essen 2013 Vortrag Wagner, R. u.a. "Ringrohrsonde";
- Geotherm Offenburg 2017 Vortrag Häfner, F. Vergleich der Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden verschiedener Bauart
- Geotherm Offenburg 2017 Vortrag Wagner, R. Verfüllung von Erdwärmesonden
- Deutscher Geothermischer Kongress München 2017 Vortrag Wagner, R. u.a. Sondentypen - Funktion und Praxiseinsatz
- Deutscher Geothermischer Kongress Essen 2018 Vortrag Wagner, R. u.a. Sondentypen für mitteltiefe Erdwärmegewinnung
- Cleantech - Magdeburg 2017 Vortrag Wagner Innovationen in der oberflächennahen Geothermie

wurde u.a. die Ringrohrsonde unter verschiedenen Aspekten dargestellt.

### **Fazit**

Mit der Herstellungsmethode steht ein Verfahren zur Verfügung, Prototypen der Ringrohrsonde herzustellen, die in Erdwärmebohrungen eingebaut und verwendet werden können. Ebenso sind Grundlagen geschaffen worden, Fertigungsvorrichtungen für die Serienfertigung nach dem Muster der Kleinserien-Vorrichtungen ohne große Neuentwicklung zu konstruieren und zu bauen. Programme für die Auslegung dieser Sonden sind ebenfalls einsatzbereit und anwendbar. Die auf dem Markt verfügbare Software ist nicht darauf eingerichtet. In der praktischen Erprobung und in Vergleichstests ist die Ringrohrsonde im Zusammenhang mit Standardwärmepumpen und der Standardbohrtechnik einsetzbar.

# INHALT

Projektkennblatt.....	3
I. Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....	9
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	11
II. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	12
1. Zusammenfassung.....	15
2. Einleitung.....	17
3. Projektbeschreibung.....	19
3.1 Zielstellung.....	19
3.2 Vorplanung der Arbeitsschritte .....	20
3.2.1 Baukonzept der Ringrohrsonde .....	20
3.2.2 Konstruktion des Sondenfußes .....	21
3.2.3 Entwicklung einer Messvorrichtung und Technikumsversuche für die Systemdurchlässigkeit .....	23
3.2.4 Durchführung der Technikumsversuche .....	29
3.2.4.1 Beschichtung der PE-rohre zur Verbesserung der Anhaftung der Zementsuspension und Versuche mit handelsüblichen Klebstoffen .....	32
3.2.5 Verbinden der Außenrohre mit dem Gewebes Schlauch .....	33
3.2.6 Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Sonde .....	36
3.2.7 Bohrtechnische Bedingungen für den Sondeneinbau.....	36
3.3 Technologische Voraussetzungen für den Bau der Ringrohrsonde .....	41
3.3.1 Technologie für das PE-Schweißen von Mehrfachrohren.....	41
3.3.2 Klebeverbindung von Polyethylen und Polypropylen .....	42
3.4. Physikalische Bedingungen für die Auslegung der Ringrohrsonde .....	42
3.4.1 Simulation zur Beurteilung verschiedener Auslegungsvarianten .....	42
3.4.2 Optimierung der Außenrohranzahl .....	43
3.4.3 Hydraulischer Einfluss durch Zirkulation .....	44
3.5 Entwicklung und Technologie der Fertigung.....	45
3.5.1 Herstellen des Sondenfußes .....	46
3.5.1.1 Schweißverbindung .....	47
3.5.1.2 Schweißvorrichtung .....	47
3.5.2 Klebstoffauswahl und Kleberbeschichtung.....	50
3.5.2.1 Vorrichtungsbau für Beschichtungseinheit .....	52
3.5.2.2 Vorrichtungsbau für Außenrohtrommeln mit verdrillungsfreiem Ablauf.....	52
3.5.2.3 Technologischer Ablauf für die Verklebung.....	54
3.5.2.4 Programmierung des Klebeauftrages und des –vorganges .....	56
3.5.3 Herstellung der Anbindung von Außenrohr und Schlauch .....	56

3.5.3.1	Vorrichtungsbau der Wickeleinheit mit hydraulischem Antrieb.....	58
3.6	Sondenzubehör (Schwerstück, Rückschlagventil, ...)	59
3.7.	Bohrtechnische Bedingungen der Ringrohrsonde .....	60
3.7.1	Hydraulische Beanspruchungen der Sonde im Bohrloch .....	60
3.7.2	Konzept für die Einbautechnologie in das Bohrloch .....	62
3.7.3	Logistikkonzept für den Sondenvertrieb .....	64
3.8	Energetische Nutzung der Ringrohrsonde.....	65
3.8.1	Einbindung in den Heizkreis über Wärmepumpen .....	65
3.8.2	Messtechnische Erfassung des Wärmeentzugs.....	65
3.8.3	Wirtschaftliche Einschätzung der Sonde .....	65
3.9	Beitrag zum Klimaschutz .....	66
3.9.1	CO <sub>2</sub> Reduzierung im Vergleich zur Standardsonde .....	67
3.9.2	Einsatzmöglichkeiten (Heizen und Kühlen, Speichern, Anwendung in Sondenfelder usw.).....	69
3.10	Weiterentwicklung und Ausblick .....	70
4.	Fazit.....	71
	Literaturverzeichnis .....	73

# I. VERZEICHNIS VON BILDERN UND TABELLEN

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung von typischen Sonden .....	17
Abbildung 2: Schnitt durch ein Probestück einer verfüllten Ringrohrsonde ca. 80 cm oberhalb des Sondenfußes.....	18
Abbildung 3: Sondenfuß mit 10 Außenrohren.....	22
Abbildung 4: Schweissvorrichtung.....	23
Abbildung 5: Eigenschaften der Verfüllbaustoffe pro Liter Suspension .....	24
Abbildung 6: Schema der Messanordnung für die Systemdurchlässigkeit.....	25
Abbildung 7: Probekörper im Versuchsstand.....	25
Abbildung 8: Niveauregulierung für die Wassersäule .....	26
Abbildung 9: Auffanggefäße mit Verdunstungsschutz für die Erfassung des Volumenstromes .....	26
Abbildung 10: Umhüllungsrohr für die Proben mit Innenbesandung .....	27
Abbildung 11: Eingebaute Probe ohne Gewebeschlauch und Ringrohre mit Wandabstand.....	27
Abbildung 12: Eingebaute Probe mit Gewebeschlauch und Ringrohre mit geringem Wandabstand ...	28
Abbildung 13: Gemessene Systemdurchlässigkeiten verschiedener Verfüllbaustoffe bei unterschiedlichen Sondenkonfigurationen.....	29
Abbildung 14: Einbau von PE-Vollstäben zur Simulation der Sondengeometrie / Probekörper vor Einbringen der Zementsuspension (rechter Kunststoffzylinder) .....	30
Abbildung 15: Herstellen des simulierten Gewebeschlauches durch mechanisches Klammern .....	30
Abbildung 16: Einbringen der PE-Vollstäbe (beschichtet) / Zustand nach Einfüllen der Zementsuspension (linker Kunststoffzylinder) .....	30
Abbildung 17: Ober- und Unterteil des Probekörpers nach Schnitt / fertiger Probekörper mit freigelegter Schnittkante.....	31
Abbildung 18: Lagerung der Probekörper im Wasserbad .....	31
Abbildung 19: Durchlässigkeitswerte von verschiedenen Zementproben im zeitlichen Verlauf .....	32
Abbildung 20: Rohre mit Betonkontakt (links) und Kunststofffarbe (rechts) behandelt .....	32
Abbildung 21: Besandete Rohre (links) und Klebeversuche zur Fixierung des Gewebeschlauchs .....	33
Abbildung 22: Verwendeter Klebstoff für Kunststoffe .....	33
Abbildung 23: Vorrichtung zum Positionieren der Außenrohre für die Befestigung an dem Gewebeschlauch.....	34
Abbildung 24: Einführen der Vorrichtung in den Gewebeschlauch .....	34
Abbildung 25: Manuelle Befestigung der Außenrohre an dem Gewebeschlauch .....	34

Abbildung 26: Am Gewebes Schlauch befestigte Außenrohre .....	35
Abbildung 27: Schematische Darstellung - Einbau der Ringrohrsonde von der Schlauchtrommel .....	37
Abbildung 28: Schematische Darstellung - Absetzen der Ringrohrsonde auf der Bohrlochsohle .....	37
Abbildung 29: Schematische Darstellung - Beginn des Einbringens von Verfüllbaustoffe in den Gewebes Schlauch .....	38
Abbildung 30: Schematische Darstellung - Situation während des Einbringens von Verfüllbaustoff - rechts: Grundwasserstauer; links: Zone mit Spülungsverlust.....	38
Abbildung 31: Schematische Darstellung - Situation während des Einbringens von Verfüllbaustoff - rechts: Verfüllen eines Grundwasserstauers; links: Abdecken eine Verlustzone.....	39
Abbildung 32: Schematische Darstellung - vollständig verfülltes Bohrloch - Verfüllrohr (weiß) vor dem Ausbau - größerer Bohrlochdurchmesser im Bereich der Standrohrtour wird im gesamten Querschnitt ausgefüllt - Ringrohre werden dabei bis an die Bohrlochwand mit dem größeren Durchmesser angeordnet .....	40
Abbildung 33: Schematische Darstellung - vollständig verfülltes Bohrloch - Endzustand mit ausgebautem Verfüllrohr .....	40
Abbildung 34: Gitterstruktur der Software ModTherm am Beispiel der Ringrohrsonde (hier nur das ebene Netz).....	43
Abbildung 35: SPS-System Sabo PLM 700 .....	45
Abbildung 36: Modularer Aufbau des SPS-Systems mit Erweiterungsmöglichkeiten .....	46
Abbildung 37: Sondenfuß mit 10 Außenrohren .....	47
Abbildung 38: Schweißvorrichtung (erste Version); rechts: Detailaufnahme .....	48
Abbildung 39: Detailaufnahme der Spannvorrichtung / Zentrierstifte zur Überprüfung bzw. Ausrichtung der Rohre zum Kunststoffblock .....	48
Abbildung 40: Schweißvorrichtung (Finalversion); rechts: Detailaufnahme .....	49
Abbildung 41: Klebstoffauftragseinheit / Manueller Auftragsversuch .....	51
Abbildung 42: Rohrmuster mit Kleberauftrag / Manuelles Verkleben durch Wiederverflüssigung des Klebers mittels Wärmeeintrag .....	51
Abbildung 43: Begutachtung der Klebestelle / Versuch des Manuellen Lösens der Verklebung .....	51
Abbildung 44: Filmauftrag (Vorgang) / fertiger Klebstoffauftrag .....	52
Abbildung 45: sternförmige Anordnung der Trommeln.....	53
Abbildung 46: parallele Anordnung der Trommeln.....	53
Abbildung 47: Beschichtungseinheit mit fester Einstellung.....	54
Abbildung 48: Beschichtungseinheit mit 10 einstellbaren Winkeln von jeweils 36° über den Umfang der Außenrohre .....	54
Abbildung 49: Kleberauftrag (links: Raupenauftrag ; rechts: Filmauftrag).....	55
Abbildung 50: Koaxialrohr mit durchgeführten 16 mm PE-Rohren / auf das Außenrohr aufgefädelter PP-Schlauch .....	56

Abbildung 51: Mechanische Andruckvorrichtung mit Heizelementen zum Wiederaufheizen und Verkleben von Außenrohren und Gewebesack .....	57
Abbildung 52: Aufheizvorrichtung (Detailaufnahme / Heizelemente mit Führungsnuten .....	57
Abbildung 53: Während des Klebevorgangs / Qualitätskontrolle an einem aufgeschnittenen Probestück.....	58
Abbildung 54: Aufwickel- und Transportvorrichtung (hydraulisch).....	59
Abbildung 55: Versuchsanordnung für die Bruchlastbestimmung des Gewebes Schlauches gegen Innendruck.....	61
Abbildung 56: Überlagerungsdruckmessung für den Eignungstest des Gewebes Schlauches .....	61
Abbildung 57: Maximale Innendruckbelastung während des Versuches auf den Gewebes Schlauches	61
Abbildung 58: Ausbau des geborstenen Gewebes Schlauches nach dem Versuch.....	62
Abbildung 59: Wickelvorrichtung während des Sondeneinbaus an einer Testbohrung .....	63
Abbildung 60: Detailaufnahme Sondeneinbau.....	64
Abbildung 61: Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wärmezwecke 2015.....	67
Abbildung 62: Vergleich von Sondentypen anhand der mittleren Entzugsleistung je Sondenmeter.....	69

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Die Gegenüberstellung verschiedener Sondenformen (100 m Länge).....	43
Tabelle 2: Vergleich der Entzugsleistung bei variiertem Außenrohranzahl (100 m Länge).....	44
Tabelle 3: Druckverlust der Zirkulation für verschiedene Sondenformen (100 m Länge).....	45
Tabelle 4: geschätzter Kostenvergleich verschiedener Sondentypen .....	66
Tabelle 5: Kostenschätzung für eine Einfamilienhaus-Heizung mit 2000 Jahresbetriebsstunden, (* 15 Jahre Standzeit der Wärmepumpenanlage, 30 Jahre Standzeit der Sonde, mit KfW-Förderung 4500 €) .....	66
Tabelle 6: Emissionsabschätzung der Wärmeversorgung nach verschiedenen Erzeugertypen.....	68
Tabelle 7: CO <sub>2</sub> -Vermeidung bei Nutzung von Erdreichwärmepumpen (mit verschiedenen Sondentypen Doppel-U-Rohr und Ringrohr) und von Luftwärmepumpe aus Feldtestangeben.....	68
Tabelle 8: CO <sub>2</sub> -Vermeidung bei Nutzung von Erdreichwärmepumpen (mit verschiedenen Sondentypen Doppel-U-Rohr und Ringrohr) aus verschiedenen Teufen.....	70

## II. VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN UND DEFINITIONEN

### Erdwärme oder Geothermie:

Erdwärme ist die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärme (thermische Energie). Sie umfasst die in der Erde gespeicherte Energie, soweit sie entzogen und genutzt werden kann, und zählt zu den regenerativen Energien. Sie kann sowohl direkt genutzt werden, etwa zum Heizen und Kühlen im Wärmemarkt (Wärmepumpenheizung), als auch zur Erzeugung von elektrischem Strom oder in einer Kraft-Wärme-Kopplung.  
(Wikipedia Stand Juli 2019)

### Oberflächennahe Geothermie

Bei der oberflächennahen Geothermie wird die geothermische Energie dem oberflächennahen Bereich der Erde (meistens bis 150 m, max. bis 400 m Tiefe) entzogen, z. B. mit Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfählen (vgl. VDI-Richtlinie 4640). Eine energetische Nutzung ist hier meist nur mit Wärmepumpen möglich, d. h. die Wärme wird unter Aufwendung von technischer Arbeit von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Direktheizungen im Niedrigtemperaturbereich (z. B. Heizung von Weichen, Brücken, Straßen, Bahnsteigen) über Heat-Pipes bspw. mit CO<sub>2</sub> als Wärmeträgermedium sind in der Entwicklung.

Die bei der Oberflächennahen Geothermie gewonnene Erdwärme stammt nicht nur aus dem terrestrischen Wärmestrom, sondern z. B. auch

- aus der Atmosphäre (also von oben)
- aus erwärmten erdekoppelten Gebäudeteilen
- aus erwärmten Teilen der Erdoberfläche (Straßen, Plätze)
- durch künstliche Einlagerung (Speicherung)
- mit dem Grundwasserstrom (durch Konvektion)
- durch Wärmeerzeugung in situ (Radioaktivität, chemische exogene Reaktionen wie Verwesung).

(<https://www.geothermie.de> - Internetseite des Bundesverbandes Geothermie)

### Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind zwischen 10 und 400 Meter tiefe Erdbohrungen mit Rohrleitungen, die zur Aufnahme von Erdwärme in der Regel mit einer Wärmeträgerflüssigkeit (Sole oder Wasser mit Frostschutzmittel) gefüllt sind. Heute meist als Doppel-U-Rohr ausgeführt.

Bei Sondenlängen > 400 m spricht man von mitteltiefen bei > 1000 m von tiefen Erdwärmesonden.

(<https://www.geothermie.de> - Internetseite des Bundesverbandes Geothermie)

### Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist eine Maschine, die unter Aufwendung von technischer Arbeit thermische Energie aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur (z.B. der oberflächennahe Untergrund) aufnimmt und – zusammen mit der Antriebsenergie – als Nutzwärme auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur (Raumheizung) überträgt.

(<https://www.geothermie.de> - Internetseite des Bundesverbandes Geothermie)

### Geothermal Response Test

Ein Geothermal Response Test (kurz TRT) ist ein in situ Test zur Bestimmung thermodynamischer Parameter des Untergrunds in der Oberflächennahen Geothermie.

Der TRT wird an einer Erdwärmesonde durchgeführt. Angeschlossen wird eine Umwälzpumpe und ein Heizelement sowie Sensoren zur Aufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperatur. Das Fluid, i.d.R. Wasser, wird bis zum Erreichen der ungestörten Untergrundtempera-

tur im Kreis gepumpt. Danach wird das Heizelement zugeschaltet um das Wasser zu erwärmen. Das so erwärmte Wasser strömt durch die Erdwärmesonde und kühlt sich dabei ab. Die Austrittstemperatur des Wassers aus der Sonde wird gemessen, das Wasser läuft wieder durch das Heizelement und der Kreislauf wiederholt sich.

(<https://www.geothermie.de> - Internetseite des Bundesverbandes Geothermie)

Aus den Messwerten kann man die thermischen Parameter des Erdreiches für die Auslegung der Erdwärmesonde ermitteln.

### Polyethylen (Kurzzeichen: PE)

PE-HD (HDPE):

PE-HD sind schwach verzweigte Polymerketten, mit hoher Dichte zwischen  $0,94 \text{ g/cm}^3$  und  $0,97 \text{ g/cm}^3$ , („HD“ steht für „high density“).

Polyethylen ist ein durch Kettenpolymerisation von Ethen ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) hergestellter thermoplastischer Kunststoff. Polyethylen gehört zur Gruppe der Polyolefine und ist teilkristallin und unpolar.

(Wikipedia Stand Juli 2019)

### Polypropylen (Kurzzeichen: PP)

Polypropylen ist ein durch Kettenpolymerisation von Propen hergestellter thermoplastischer Kunststoff. Es gehört zur Gruppe der Polyolefine und ist teilkristallin und unpolar. Seine Eigenschaften ähneln Polyethylen, er ist jedoch etwas härter und wärmebeständiger.

(Wikipedia Stand Juli 2019)

### Heizelementschweißen

Das Heizelementschweißen wird nach Regelwerk DVS 2207 Teil 1 angewandt. Es dient zur Verbindung von Kunststoffrohren aus teilkristallinem Thermoplast (z. B. Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylidenfluorid). Die Rohrenden werden auf Schmelztemperatur erhitzt.

Das Heizelementmuffenschweißen wird vor allem bei kleineren Rohrdimensionen angewandt. Im Gegensatz zum Heizelementstumpfschweißen werden hierbei Muffen zum Verbinden der Rohrenden verwendet, die vor dem Zusammenfügen gemeinsam mit dem Rohrende erhitzt werden.

(Wikipedia Stand Juli 2019)

### Heißkleber

Schmelzklebstoffe, auch Heißklebestoffe, Heißkleber, Hotmelt oder (in der Schweiz) Heißleim genannt, sind lösungsmittelfreie und bei Raumtemperatur mehr oder weniger feste Produkte, die im heißen Zustand auf die Klebefläche aufgetragen werden und beim Abkühlen eine feste Verbindung herstellen. Diese Gruppe von Klebstoffen basiert auf verschiedenen chemischen Rohstoffen.

(Wikipedia Stand Juli 2019)

### Durchlässigkeitsbeiwert

Der Durchlässigkeitsbeiwert (bzw. die hydraulische Leitfähigkeit) quantifiziert die Durchlässigkeit von Boden oder Fels, hier gehen die Dichte und die Viskosität des durchströmenden Fluids ein:

$$k_f = K \cdot \rho \cdot g / \eta = Q \cdot l \cdot \rho \cdot g / A \cdot \Delta p$$

Hierbei bedeuten:

- $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
- $\rho$ : Dichte des Fluids, bei Wasser  $1000 \text{ kg/m}^3$
- $g$ : Erdbeschleunigung =  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $\eta$ : Dynamische Viskosität des Fluids, bei Wasser  $10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ .

Der Durchlässigkeitsbeiwert wird meist für strömende Flüssigkeiten (Wasser) verwendet, also in den Bereichen Wasserwirtschaft und Wasserbau. Da bei (inkompressiblen) Flüssigkeiten

$\rho \cdot s = \text{konst.}$

vorausgesetzt werden kann, lässt sich der Durchlässigkeitsbeiwert auch vereinfacht schreiben als:

$$k_f = Q \cdot l / A \cdot \Delta h$$

mit der Höhendifferenz  $\Delta h$ , über die die Strömung erfolgt.

Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die in der Literatur angegebenen Werte für  $k_f$  üblicherweise auf Wasser. Ist der Durchlässigkeitsbeiwert für ein mit Wasser durchströmtes Medium bekannt, dann lässt sich die Durchlässigkeit dieses Mediums für andere Stoffe berechnen.

(Wikipedia Stand Juli 2019)

# 1. ZUSAMMENFASSUNG

Die Verbreitung der oberflächennahen Geothermie hat in Deutschland noch Reserven, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Gegenwärtig werden nur ca. 1,1 % der Wärme aus oberflächennaher Geothermie genutzt. Diese Technologie besitzt deutliche Vorteile bei der CO<sub>2</sub>-Vermeidung, die noch prognostisch durch die Steigerung des regenerativen Anteils im Strommix verbessert wird. Aber auch diese Technologie muss weiterentwickelt und effizienter werden. Mit der Effizienzverbesserung der neuen Ringrohrsonde lassen sich gegenüber der Standardsonde ca. 0,4 t/a CO<sub>2</sub> pro Sonde sparen. Gegenüber einer Luftwärmepumpe sind sogar ca. 0,7 t/a CO<sub>2</sub> pro Sonde zu erwarten. Mit dem Projekt soll erreicht werden, dass die Akzeptanz dieser Technologie aus ihrem Nischendasein treten kann und die Anzahl der ca. 20.000 Erdwärmesonden pro Jahr deutlich gesteigert und effizienter wird. Mit der Ringrohrsonde werden die Voraussetzungen geschaffen Erdwärme wesentlich effizienter zu gewinnen. In dem Projekt wurden die bekannten theoretischen Merkmale über die Ausführung eines geeigneten Wärmeübertragers in die Praxis umgesetzt. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Nachweis der Fertigung und Einsatzfähigkeit einer solchen Konstruktion. Die Bauform für die Ringrohrsonde besteht aus zehn Außenrohren mit einem kleinen Durchmesser und einem größeren Zentralrohr in dem das erwärmte Zirkulationsmedium wieder nach oben gefördert wird. Die besondere Eigenschaft des Ringrohrwärmeübertragers besteht darin, dass die Außenrohre direkt oder möglichst nahe an der Bohrlochwand platziert werden. Um dieses Konstruktionsmerkmal in der praktischen Anwendung zu realisieren, werden die Außenrohre mit einem Gewebes Schlauch verbunden, der sich beim Verfüllen bis an die Bohrlochwand aufbläht und die Rohre mitnimmt. Diese Sonde hat mit der ringförmigen Anordnung der wärmeaufnehmenden Außenrohre eine koaxiale Form, die für den Einsatz in Bohrungen wärmetechnisch sehr effizient ist.

Es ergeben sich dadurch folgende Vorteile:

- a) kein thermischer Kurzschluss zwischen den wärmeaufnehmenden äußeren Ringrohren und dem zentralen Rohr
- b) mit dem Verfüllbaustoff kann man die isolierende Wirkung unterstützen,
- c) die geringe Entfernung der Außenrohre zur Bohrlochwand erzielt eine gute Wärmeübertragung. Der gebohrte Bohrlochquerschnitt wird optimal genutzt,
- d) die Wärmeübertragungsflächen sind ca. 1/3 größer als bei anderen Sonden,
- e) die geringe Wanddicke der Ringrohre trägt zu einem geringeren Wärmewiderstand bei,
- f) die Qualität der Verfüllung wird durch die Anwendung eines Gewebes Schlauches besonders für den Schutz der Grundwasservorräte gesichert. Die geringe Systemdurchlässigkeit wurde erfolgreich in einem zusätzlichen Untersuchungsprogramm nachgewiesen.

Um diese Vorteile zu nutzen wurden neue Herstellungstechnologien notwendig. Die Umlenkung der abwärtsfließenden Flüssigkeit in den Außenrohren in das Zentralrohr wurde über einen neu entwickelten Sondenfuß umgesetzt.

Hierzu sind komplizierte PE-Schweißungen erforderlich, die mit einer programmgesteuerten Vorrichtung ausgeführt werden. In analoger Weise wird diese Schweißvorrichtung auch für den Sammler am Kopf der Sonde eingesetzt.

Der neue Sondenfuß kann mit den gebräuchlichen Qualitätstests für Geothermiesonden bewertet werden, so dass eine Freigabe für die praktische Anwendung erwartet werden kann. Bei der Erarbeitung des Projektes wurde die Konstruktion des Sondenfußes für die Erdwärmesonden bis 150 m ausgelegt.

Die bohrtechnische Eignung der Ringrohrsonde wurde an die vorhandenen technischen Möglichkeiten angepasst und in einer Testbohrung ausprobiert. Die Sonde benötigt keinen größeren Durchmesser und kann mit dem maximalen Außendurchmesser von 101 mm in Bohrungen bis zu einem Bohrdurchmesser von 190 mm eingebaut werden.

Die Einbindung in den Wärmepumpenkreis wird mit den üblichen PE HD Leitungen DN 40 realisiert und benötigt keine besonderen Ausrüstungen. Die erdgekoppelten Systeme mit der Ringrohrsonde sind deutlich energieeffizienter. Bei der Anwendung von Heizen/Kühlen ist die Effizienz dieses Wärmeübertragers (Ringrohr-Erdwärmesonde) besonders nützlich.

Bei einer breiten Anwendung der Ringrohrsonde in der Routineanwendung werden noch Fortschritte besonders bei der Herstellung erwartet, die dann sich auch wirtschaftlich auswirken sollten.

## 2. EINLEITUNG

Die Erdwärme steht als Grundlastenergie kontinuierlich zur Verfügung und wird besonders für die Wärmeversorgung und Klimatisierung eingesetzt. Aus den oberen 400 m der Erdkruste kann die oberflächennahe Geothermie einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen liefern. Die Sonneneinstrahlung regeneriert in unserer Region die Wärmequelle "Erdreich" und speichert im saisonalen Wechsel die Wärme des Sommers zur Wärmeversorgung bis in den Winter hinein. Die verfügbaren Temperaturen aus dieser Zone des Erdreichs werden mit Wärmepumpen auf das notwendige Niveau zum Heizen gebracht. Diese Anlagentechnik ist weit entwickelt und bietet eine gut handhabbare Bedienung für den Endverbraucher an. Bei der Wärmepumpe hat es in den letzten Jahren eine ständige Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung gegeben, während bei den Sondenkonstruktionen deutliche Fortschritte mit energetischem und wirtschaftlichem Nutzen kaum zu verzeichnen waren. Um die Wärme aus dem Erdreich zu gewinnen, werden Erdwärmesonden als Wärmetauscher in Bohrungen eingebaut. Die Effektivität ihrer Funktion entscheidet wesentlich über die Gesamteffizienz der Anlage. Unter den zahlreichen Sondenkonstruktionen haben sich in den zurückliegenden Jahren die Einfach-, Doppel-U- und Koaxialrohrsonden am Markt durchgesetzt [5]. Bei einer Lebensdauer zwischen 30 und 50 Jahren sind die Entscheidungen über die Effizienz jedoch von immenser Bedeutung. Bei einer Planung und dem Bau von Erdwärmanlagen ist die Wahl der Sondenkonstruktion eine weitreichende Entscheidung für den klimaverträglichen und wirtschaftlichen Betrieb der gesamten Anlage. Eine energieoptimierte Konstruktion und eine richtige Auslegung wirken sich Jahr für Jahr auf die Wirtschaftlichkeit aus. Der Bodenschatz "Erdwärme" ist im oberflächennahen Bereich regenerativ und kann im ausgewogenen Verhältnis von Wärmeeintrag und -entzug abgebaut werden.

Für die oberflächennahe Geothermie ist in diesem Projekt mit der optimierten Ringrohrsonde eine Bauform entwickelt worden, die einen höheren Wärmeentzug aus dem Erdreich zulässt. In der Abbildung 1 ist der Vergleich mit den herkömmlichen Einfach- und Doppel-U-Rohr- sowie den Koaxial-Rohr-Installationen dargestellt. Die neue Ringrohrsonde besteht aus einem PE-Zentralrohr (40 mm) und aus bis zu 12 konzentrisch angeordneten Ringrohren (Außenrohre - PE 16 mm), die in der Abbildung 2 80 cm oberhalb des Sondenfußes im Schnitt dargestellt werden. Mit Hilfe eines Gewebeschauches werden die Außenrohre nach dem Einbau an der Bohrlochwand angeordnet. Diese besondere Konstruktion und Anordnung der Sonde trägt wesentlich zur Verbesserung der Wärmeübertragung vom Erdreich auf den Sondenkreislauf bei.

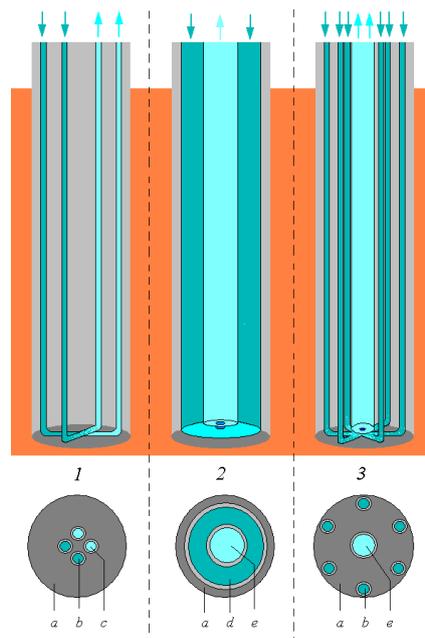


Abbildung 1: Schematische Darstellung von typischen Sonden

- (1 – Doppel-U-Rohr-Sonde;  
2 – Koaxialrohrsonde;  
3 – Ringrohrsonde a – Verfüllbaustoff; b – abwärtsströmende Flüssigkeit;  
c – aufwärtsströmende Flüssigkeit)

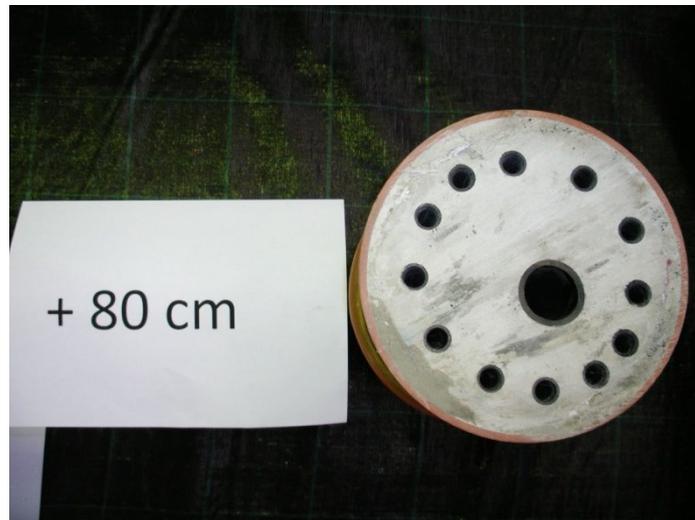


Abbildung 2: Schnitt durch ein Probestück einer verfüllten Ringrohrsonde ca. 80 cm oberhalb des Sondenfußes

## 3. PROJEKTBE SCHREIBUNG

### 3.1 ZIELSTELLUNG

Mit Beginn der Projektbearbeitung waren die Eigenschaften der Ringrohrsonde bekannt und ihre prinzipielle Ausführung festgelegt. Für die Anwendung von Erdwärmesonden bestehen bei dem Projektbearbeiter umfangreiche und langjährige Erfahrungen. Die Herstellung einer neuen Sondenkonstruktion hat sich als ein sehr komplexer Prozess erst während der Projektbearbeitung herausgestellt. Dabei wurden einige Arbeitsschritte unterschätzt und mussten mit aufwendigen Versuchen erprobt und im ungünstigen Fall verworfen werden. Bei der praktischen Bearbeitung bedeutete dies, dass Neukonstruktionen von Vorrichtungen immer wieder erforderlich waren, um die nächste Etappe zu beginnen. Obwohl es einige Male mit relativ unbefriedigenden Ergebnissen zu Problemen bei der Projektbearbeitung kam, war es eine sehr kreative Arbeit im gesamten Team. Es gab immer wieder einen Anstoß von verschiedenen Mitarbeitern, die nicht vorhergesehenen Klippen zu beseitigen. Es war sehr hilfreich, dass ein mit der Entwicklungstätigkeit erfahrenes Team an dem Projekt tätig war, das sich nicht durch Rückschläge entmutigen ließ. Die Motivation, eine Erdwärmesonde mit einem hohen energetischen Vorteil zu schaffen, wurde als sinnvolle und für die Klimawende nützliche Aufgabe erkannt und umgesetzt. Auch wenn in dem Bericht nicht alle Details des komplizierten Weges dargestellt werden können, so wird doch versucht, die Schritte ansatzweise zu erklären. An einigen technologischen Abläufen mussten neue Verfahren angewandt werden, um das Ziel, eine einsatzfähige Ringrohrsonde herzustellen, zu erreichen. Verfahren oder manchmal auch nur kleine Kniffe aus den Tests, die vorher weder im Team, noch bei Herstellern im Wettbewerb zum Anwendungsrepertoire gehören, haben die Prozesse der Fertigung ermöglicht. Zum gegenwärtigen Stand ist eine Herstellungsvariante gefunden, die es zulässt, diese komplizierte Sonde so zu konfektionieren, dass sie ohne größere Adaptionsprobleme mit der üblichen Bohr- und Wärmepumpentechnik angewendet werden kann. Die Erdwärmesonden haben die wichtige Grundaufgabe, die Wärme dem relativ schlechten Wärmeleiter "Erdreich" möglichst effektiv zu entziehen und verlustfrei nach oben zu transportieren. Mit den Eigenschaften der Ringrohrsonde wurde mit Simulationsrechnungen nachgewiesen, dass diese Aufgaben deutlich verbessert werden können. Diese Sonde stellt ein effektives Glied in der technisch-technologischen Kette für die Erdwärmegewinnung, dem eigentlichen Abbau des Bodenschatzes Wärme, dar.

Die Vorteile bestehen besonders darin, dass

- a) der größere Abstand zwischen den wärmeaufnehmenden äußeren Ringrohren und dem zentralen Rohr den thermischen Kurzschluss zwischen Fall- und Steigleitung verhindert. Mit der isolierenden Verfüllmasse wird der Effekt noch zusätzlich unterstützt,
- b) die gute Wärmeübertragung aus dem Erdreich auf den Wärmeträger durch die geringe Entfernung der Außenrohre zur Bohrlochwand erzielt wird und damit der mit großem Aufwand gebohrte Bohrlochquerschnitt optimal genutzt wird,
- c) die Wärmeübertragungsflächen (Umfang der Rohre x Länge) ca.  $\frac{1}{3}$  größer sind als bei den üblichen Doppel-U-Rohren,
- d) die geringe Wanddicke der Ringrohre zu einem geringeren Verlust beim Wärmeübergang führt, da sich die isolierende Wirkung des PE-Materials nicht so stark auf den Wärmewiderstand auswirken kann,
- e) bei der Verfüllung der Sonde mit einer Verfüllsuspension durch die Anwendung eines Schutzschlauches kein Abfließen des Materials ins Erdreich auftreten kann und mit dieser ordnungsgemäßen und vollständig ausgebildeten Verfüllung der Erdwärmesonde eine geringe Systemdurchlässigkeit zum Schutz der Grundwasservorräte erzielt wird,
- f) keine Vermischung des Verfüllmaterials mit dem Bohrlochinhalt auftreten kann, so dass die gewünschte Materialqualität im Bohrloch gewährleistet ist und das obertägig qualitätsgerecht angemischte Verfüllmaterial seine Eigenschaften nicht verändert und

- g) die geophysikalische Kontrollmöglichkeit durch die zentrale geometrische Anordnung der Rohre im Bohrloch klarer interpretiert werden kann und für die Messung ein relativ großes PE-DN 40 x 3,7 mm-Rohr im Zentrum zur Verfügung steht.

Diese Eigenschaften werden bei der Anwendung der Ringrohrsonde im Rahmen der technischen Ausführung notwendigerweise umgesetzt.

Mit dem Projekt sollen die Voraussetzungen für die Anwendung und den Einsatz der Ringrohrsonde geschaffen und nachgewiesen werden, dass es möglich ist, die physikalisch möglichen Eigenschaften des verbesserten Wärmeentzugs in die Praxis umzusetzen. Hierzu sind das Fertigungskonzept für die Herstellung der einzelnen Komponenten zu planen, die Bauteile und Vorrichtungen zu konstruieren, eine Musterfertigung auszuführen und die Ringrohrsonde im Bohrloch zu erproben.

## 3.2 VORPLANUNG DER ARBEITSSCHRITTE

Mit dem Projekt wurde bei vielen Teilaufgaben Neuland betreten. Die Herstellung einer Ringrohrsonde war gedanklich gut vorstellbar. Auf der Basis dieser Überlegungen wurde der Arbeitsplan erarbeitet. In diesen Plan sind alle Aufgaben berücksichtigt worden, die für den Herstellungsprozess während der Planungsphase zu erkennen waren. Es stellte sich aber heraus, dass viele Details nicht so vorhersehbar waren und es großer Anstrengungen bedurfte die Herstellung in einen realisierbaren technisch-technologischen Prozess umzusetzen. Durch diese Einflüsse hat sich der Zeitplan auch verschoben und es bleiben noch Aufgaben für die Routineanwendung offen.

### 3.2.1 BAUKONZEPT DER RINGROHRSONDE

Aus den Simulationsergebnissen war die Idee für den Wärmetauscher als sinnvolle energetische Ausführung belegt. Die weit verbreiteten U-Rohr-Sonden sind nicht in der Lage, einen konstruktiv geordneten Wärmeübertrager im Bohrloch anzuordnen. Auch Abstandshalter und Zentralisatoren in kurzen Abständen verbessern das nicht und sind wenig praktikabel.

Die Koaxialsonden sind dagegen konstruktionsbedingt eine geordnete Bauform, die für geringere Teufen im oberflächennahen Bereich der Geothermie eingesetzt werden. Mit Abstandshaltern kann auch das Zentralrohr im Zentrum stabilisiert werden, um die Strömungsverhältnisse zu optimieren. Der notwendige Abstand des Außenrohres zur Bohrlochwand stellt ähnlich wie bei der U-Rohr-Sonde einen Wärmewiderstand dar.

Mit der Ringrohrsonde wird der Ringraum der koaxialen Sonde durch mehrere Außenrohre gebildet. Diese Außenrohre sollen dazu noch an der Bohrlochwand angeordnet werden, um dort die Wärme im Vorlauf zu übernehmen und über das Zentralrohr (Rücklauf) nach oben transportieren. Der Verfüllbaustoff und der Abstand zwischen Außenrohren und Zentralrohr sorgen dafür, dass der Verlust aus dem Wärmetausch zwischen der Vor- und Rücklaufleitung begrenzt bleibt. Um das Konzept umzusetzen, sind folgende Baugruppen herzustellen:

- a) Sondenfuß zur Umlenkung der Strömung aus den Außenrohren in das Zentralrohr, mit integriertem Schwerstück und Abdichtung für den Gewebeschlauch.
- b) PE-Schweißverbindung zwischen Sondenfuß, den 10 Außenrohren und dem Zentralrohr
- c) Vorrichtung für die Schweißverbindung
- d) PE-Schweißverbindung zwischen 10 Außenrohren und dem Sammler am Kopf
- e) Muster für die Schweißversuche
- f) Vorrichtung zum Beschichten der Außenrohre mit Klebstoff
- g) Vorrichtung zur Verbindung der Außenrohre von innen mit dem Gewebeschlauch
- h) Vorrichtung speziell zum Verkleben der Außenrohre von innen an den Gewebeschlauch
- i) Vorrichtung zur Zuführung der Außenrohre zur Klebeeinheit

- j) Herstellung einer verdrillfreien Trommelführung für die Außenrohe zur lagegerechten Zuführung an die Klebevorrichtung
- k) Wickeleinheit zum Konfektionieren der Sonden und zum Transportprozess während der Fertigung

Bei der Entwicklung und Herstellung dieser notwendigen Baugruppen sind die Konstruktionen und technologischen Abläufe nicht von Anfang an erfolgreich verlaufen, so dass umfangreiche Versuche und Veränderungen erforderlich wurden, um die geeignete Ausrüstung für die Fertigung herzustellen. Auf die Entwicklungsschritte wird in den jeweiligen Kapiteln eingegangen.

### 3.2.2 KONSTRUKTION DES SONDENFUßES

Der Sondenfuß stellt einen wichtigen Baustein dar und wurde mit folgenden Parametern konzipiert:

- a) Außendurchmesser < 100 mm
- b) 1 Zentralrohr DN40
- c) 12 Außenrohre DN16
- d) Material Polyethylen

Aus Kostengründen wurden die Körper für den Sondenfuß durch mechanische Bearbeitung hergestellt. Unter diesen Rahmenbedingungen wurde eine Konstruktion angefertigt, die davon ausgeht, dass die Rohre für die vorgesehenen Muster manuell verschweißt werden können. Für diese Rohrdimensionen ist als Schweißtechnologie die Muffe-Dorn-Variante anzuwenden. Unter Verwendung handelsüblicher Schweißgeräte ist der Platzbedarf beim Aufheizen und Zusammenfügen der PE-Komponenten sehr stark beschränkt. Aus diesem Grunde ist eine Anordnung von zwölf Rohren auf einer Ebene nicht zu realisieren. Es wurden deshalb die Rohre auf jeweils sechs pro Ebene aufgeteilt. Damit erhält man einen geringfügig größeren Arbeitsabstand zwischen den Rohren, der es ermöglichen sollte, Handschweißgeräte anzuwenden.

In der praktischen Umsetzung war die gewünschte Qualität nicht einzuhalten. Es wurde deshalb eine Schweißvorrichtung konstruiert und gebaut, die den Schweißvorgang verbessern und automatisieren sollte. Mit diesem Schritt hat sich der Aufwand für das Verbinden der Rohre mit dem Körper des Sondenfußes stark erhöht. Diese Vorrichtung war so ausgelegt, dass die Außenrohre und das Zentralrohr in einem Schweißgang verbunden werden.

Nach verschiedenen Versuchen musste festgestellt werden, dass sich die Aufheizzeiten von den unterschiedlichen Rohrdimensionen nicht so beeinflussen lassen, dass ein gleichzeitiges Verschweißen qualitätsgerecht erfolgen kann. Aus diesem Grund und weiteren Erfahrungen, die bei den Versuchen gesammelt wurden, wurde eine getrennte Verschweißung von dem Zentralrohr und den Außenrohren festgelegt. Im diesem Zusammenhang wurde auch die Rohranzahl auf 10 Außenrohre reduziert. Die Reduzierung konnte nach Simulationsrechnungen mit verschiedenen Rohranzahlen ohne große energetische Auswirkungen erfolgen. Nachteilig wirken sich diese Maßnahmen auf den Druckverlust bei der Zirkulation der Arbeitsflüssigkeit aus. Es können aber auch mit dieser 10-Rohr-Konstruktion Erdwärmesonden bis 100 m Länge betrieben werden.

Mit den gesammelten Kenntnissen wurden die gesamte Konstruktion des Sondenfußes und die zur Herstellung notwendigen Vorrichtungen vollständig überarbeitet. Der Sondenfuß wurde nun auf nur eine Schweißebene und für 10 Außenrohre ausgelegt (s. Anlage 4).



Abbildung 3: Sondenfuß mit 10 Außenrohren

Weiter wurde in dieser Konstruktion die Aufhängung für das Schwerstück und die Befestigung für den Gewebeschlauch verbessert bzw. mit berücksichtigt. Die Variante vereinfacht den technologischen Schweißprozess bei dem Verbinden der Rohre mit dem Körper des Sondenfußes auf einen Arbeitsschritt. Der komplizierte Vorgang erfordert eine hohe Präzision bei dem gleichzeitigen Verschweißen der 10 Rohre in die vorbereiteten Bohrungen. Um das zu beherrschen, wird die Schweißvorrichtung über eine Programmsteuerung bedient, die in der Lage ist, die Aufwärm- und Fügezeiten reproduzierbar einzuhalten und die Position der präzise zu gewährleisten.



Abbildung 4: Schweißvorrichtung

Die programmgesteuerte Schweißvorrichtung (Abbildung 4) ist in der Lage gleichzeitig 10 dünnwandige DN16-Rohre wird den Sondenfuß zu verbinden. Ein 100 mm langes Zentralrohrstück DN 40 wird vorher manuell in den Fuß eingeschweißt. Dieses Rohrstück dient als Aufnahme für eine Elektroschweißmuffe mit der das lange Zentralrohr angebunden wird.

### 3.2.3 ENTWICKLUNG EINER MESSVORRICHTUNG UND TECHNIKUMSVERSUCHE FÜR DIE SYSTEMDURCHLÄSSIGKEIT

Im Zusammenhang mit der aktuellen Risikoeinschätzung für die Anwendung von Erdwärmesonden wird der Untersuchung der PE-Rohr-Sonden bei der Beurteilung der Systemdurchlässigkeit in diesem Projekt eine große Aufmerksamkeit geschenkt. Besonders nach verschiedentlichen Schadensfällen wird deutlich, dass es nicht ausreicht, nur diese unter 3.1 in der Zielstellung erwähnte Grundaufgabe zu lösen. Es sind umfassende Vorkehrungen zu treffen, dass Schäden und Gefahren während der Herstellung und im anschließenden Betrieb von Erdwärmesonden nicht auftreten können. Mit ausführlichen Stellungnahmen hat sich der Personenkreis Geologie der ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie mit den Themen 2011 beschäftigt. Für den Einsatz des Materials PE wurden bis auf den Hinweis der geringen Gasdiffusion keine Einschränkungen für die Anwendung gesehen. Erdwärmesonden befinden sich in der Regel in den Bodenschichten, in denen sich auch die Grundwasservorräte befinden. Insbesondere in den Bohrungsabschnitten mit grundwasserstauenden Schichten (Ton, Mergel, Schluff o. ä.) ist eine sichere Abdichtung erforderlich, um eine Vermischung des Grundwassers aus unterschiedlichen Schichten zu verhindern. Infolge der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung (Düngung), der Bebauung und der industriellen Nutzung sind die oberen Grundwasservorräte häufig so stark kontaminiert, dass sie für eine Trinkwassergewinnung ausscheiden. Die tieferen Grundwasserleiter müssen deshalb auf Dauer sicher von den oberen Schichten hydraulisch getrennt bleiben. Das gilt natürlich auch in analoger Weise für die Vermeidung der Vermischung von Trinkwasserressourcen mit salzigen Wässern aus dem Liegenden.

Ebenso sind die Erdwärmesonden bis zur Geländeoberkante vollständig zu verfüllen und dauerhaft abzudichten, um schädliche Einträge über die Oberfläche zu verhindern. Mit jeder Bohrung wird die natürliche geologische Barriere für potentielle Wegsamkeiten geöffnet. Es ist deshalb auch die Aufgabe, nach Abschluss der Arbeiten im Bereich einer Bohrung, einen gleichwertigen Schutz gegen das Eindringen von Schadstoffen von der Oberfläche herzustellen. Das gilt in analoger Weise für die Aufrechterhaltung einer Trennung von hydraulisch und chemisch unterschiedlich beschaffenen Grundwasserleitern.

Für die Abdichtung der Bohrungen stehen umfangreiche Erfahrungen aus dem Brunnen- und Messstellenbau, aus den Baugrunduntersuchungen und natürlich auch aus dem Bau von Erdwärmesonden zur Verfügung. Die Kenntnis über die geologischen Verhältnisse, wie Schichtenfolge, Wasserführung, ist eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung der unterschiedlichen Bohrungsarten. Der Unterschied ergibt sich aber durch die Zielstellung der Bohrtätigkeit. Brunnen- und Grundwassermessstellen werden hergestellt, um Wasser zu gewinnen oder Informationen über die Wasserqualität, das Grundwasserniveau oder die Eigenschaften der Grundwasserleiter zu sammeln. Für diese Aufgabenstellung sind eingebaute Rohre notwendigerweise abzudichten, da sonst der Brunnen bzw. die Grundwassermessstelle unbrauchbar wäre und ihrer Aufgabe nicht gerecht wird. Die tagesnahen Baugrundbohrungen dienen den Informationen über die geotechnischen Eigenschaften des Bodens im beeinflussten Bauuntergrund. Häufig werden diese Bohrungen durch Baumaßnahmen überbaut und verlieren dadurch ihre Störwirkung. Die Unsicherheiten dieser Bohrungen können auch nicht vorhersehbare Auswirkungen auf die Herstellung von Erdwärmesonden haben.

Bei Erdwärmesonden ergibt sich diese Deckungsgleichheit von technischer Funktionsfähigkeit und Gefahrenprophylaxe für die Grundwasserressourcen nicht ohne weiteres. Eine Geothermieanlage mit einer zufriedenstellenden energetischen Funktion und Nutzbarkeit kann auch ohne die wichtige Abdichtung der Grundwasserstockwerke betrieben werden. Neben einer Reihe von Maßnahmen, die für das System Erdwärmesonde empfohlen werden, wird als Maß für die Qualität der Abdichtung die Systemdurchlässigkeit der Erdwärmehohlung inklusive der eingebauten Sondenrohre vorgeschlagen. Gegenwärtig besteht keine Norm oder Richtlinie für eine Versuchsanordnung, um diese Vergleichbarkeit herzustellen. Es ist davon auszugehen, dass die gründliche Empfehlung der ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie von 2015 eine Fortsetzung erfahren wird.

Bei dem Bau der Versuchsanlage zur Messung der Systemdurchlässigkeit wurde besonders Wert auf eine praxisnahe Messmethode gelegt, um eine verlässliche und messtechnisch vergleichbare Aussagen zu geben. Angeregt von dem Untersuchungsprogramm auf dem Großversuchsstand von Kuckelhorn, Blank, Reuß wurde der Probedurchmesser durch PVC DN 150 in gleicher Weise gewählt. Die Randläufigkeit der Messanordnung wurde ebenfalls durch eine Besandung der Innenwand auf einen für die Systemdurchlässigkeitsbewertung vernachlässigbaren Anteil reduziert. Die Länge der Proben wurde dagegen deutlich verkürzt. Ebenso wurde auf eine Frost-Tau-Untersuchung verzichtet.

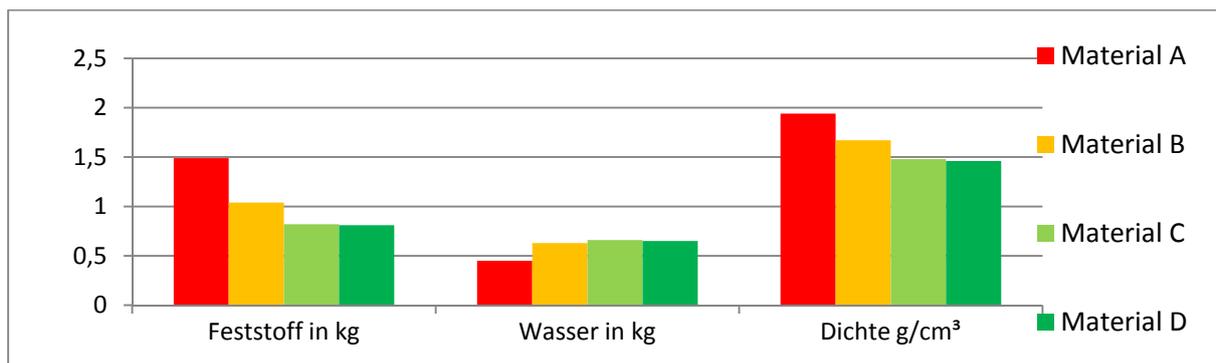


Abbildung 5: Eigenschaften der Verfüllbaustoffe pro Liter Suspension

Die Durchlässigkeit des Verfüllbaustoffes wurde mit Referenzmessungen an Probekörpern ohne PE-Rohre ermittelt, die die Werte aus den Datenblättern der Füllbaustoffhersteller bestätigten oder noch unterbieten.

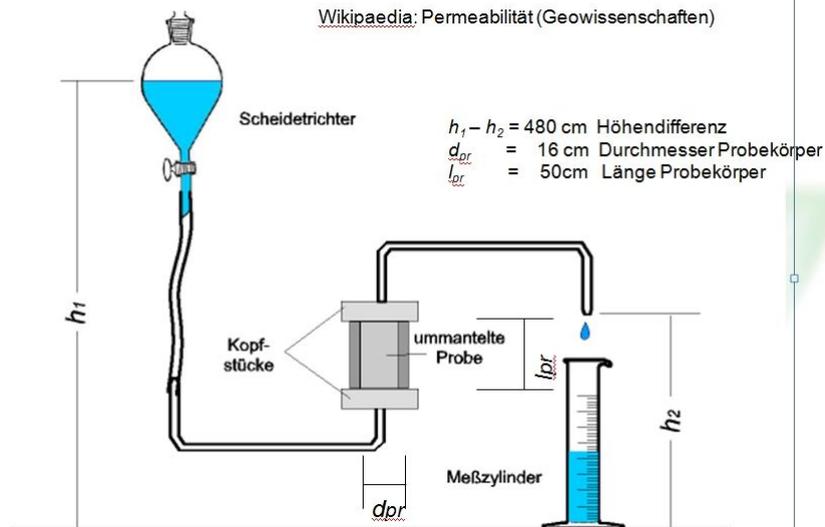


Abbildung 6: Schema der Messanordnung für die Systemdurchlässigkeit

Die Probelänge wurde auf 50 cm festgelegt. Um Endeffekte der Probenpräparierung zu eliminieren wurden die Probekörper aus 100 cm langen Rohren hergestellt. Der untere Abschnitt im Einlauf und der obere Abschnitt zum Überlauf wurden nach einer Abbindezeit von 28 Tagen abgetrennt und auf das festgelegte Maß gekürzt. Nach dem Abtrennen erfolgt eine Sichtprüfung zur Homogenität des Verfüllbaustoffes. Es wurden bei keiner der Proben Fehlstellen festgestellt, die zum Verwerfen aus dem Versuchsprogramm führten. Zur Simulation der realen Bedingung wurden die Proben während der Abbindezeit unter Wasser gelagert, so dass mit Beginn der Durchlässigkeitsuntersuchung eine wassergesättigte Probe zum Einsatz kommt.



Abbildung 7: Probekörper im Versuchsstand



Abbildung 8: Niveauregulierung für die Wassersäule

Nach diesen Vorbereitungen wurden die Proben in der Messapparatur zur Systemdurchlässigkeitsermittlung mit dem Wasserdruck beaufschlagt. Die Länge der Proben wurde auf 50 cm begrenzt, um besonders bei geringen Durchlässigkeiten Messwerte in vertretbaren Zeiten zu erhalten. Bei einer Durchlässigkeit von  $k_f = 1 \times 10^{-11}$  m/s werden unter den Versuchsbedingungen 7 Tage benötigt, um die Probe mit  $1 \text{ cm}^3$  zu durchströmen. Aus diesem Grund wurden die Auffanggefäße mit Verdunstungshauben ausgestattet. Trotzdem mussten bei den Untersuchungen des reinen Verfüllbaustoffes Messungen aus Zeitgründen abgebrochen werden. Die aufgefangene Wassermenge war so gering, dass Durchlässigkeitsbeiwerte von  $< 10^{-11}$  m/s festgestellt wurden.



Abbildung 9: Auffanggefäße mit Verdunstungsschutz für die Erfassung des Volumenstromes

Die Versuche wurden konzipiert, um Aussagen speziell für die Ringrohrsonde zu bekommen. Die Ringrohrsonde besitzt folgende Rohranordnung:

1 Zentralrohr DN 40 und  
 12 Außenrohre DN 16. (Die Systemdurchlässigkeit wurde in der Projektphase noch mit 12 Rohren bearbeitet. Die Verringerung auf 10 Rohr liegt auf der sicheren Seite)

Das gesamte Rohrbündel wird in einem über die gesamte Sonde reichenden "Gewebepacker" eingebaut. Dabei werden die Außenrohre mit dem Gewebeschlauch verbunden. Diese Anordnung ist so konzipiert, dass sie vergleichbare Werte für die Systemdurchlässigkeiten von Ringrohrsonden liefert und Vorarbeiten, die sich ausschließlich mit der Doppel-U-Rohr-Sonde DN 32 beschäftigt haben, in dem Untersuchungsprogramm nutzt. Erwartungsgemäß treten auch bei der Ringrohrsonde Randläufigkeiten an den PE-Rohren auf, die in verschiedenen Untersuchungen erkannt und beschrieben wurden.

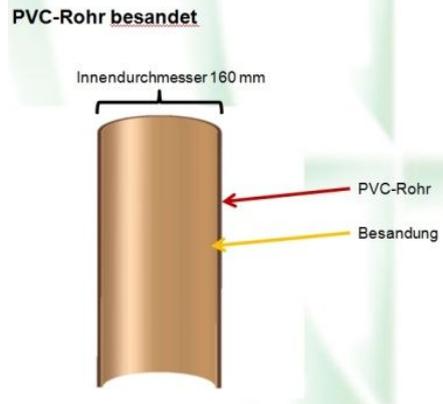


Abbildung 10: Umhüllungsrohr für die Proben mit Innenbesandung

Neben der Ermittlung der Systemdurchlässigkeit an Sonden mit PE-Rohren werden bei der Ringrohrsonde auch Aussagen über den Einfluss des Gewebeschlauches und der Anordnung der Rohre in der Sonde gesucht. Die gute Dichtungswirkung von Gewebepackern ist besonders für die Abdichtung gegen die Bohrlochwand beobachtet worden und hat bei großen hydraulischen Unterschieden zwischen den Grundwasserleitern sein Einsatzgebiet.



Abbildung 11: Eingebaute Probe ohne Gewebeschlauch und Ringrohre mit Wandabstand

Die Komponente Gewebeschlauch muss deshalb auch Bestandteil der Untersuchung der Ringrohrsonde sein.

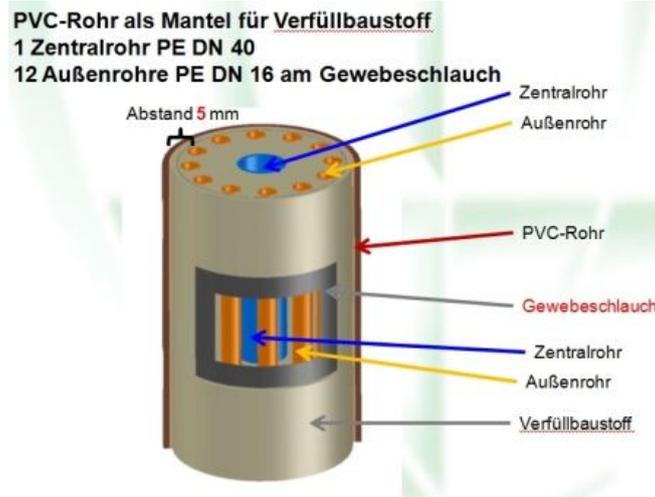


Abbildung 12: Eingebaute Probe mit Gewebeschauch und Ringrohren mit geringem Wandabstand

Mit dem Gewebeschauch sind deshalb alle Voraussetzungen über die gesamte Sondenlänge gegeben, um eine stabile abdichtende Grenzschicht zum Erdreich zu gewährleisten. Dieser Schlauch sorgt zusätzlich für eine Trennung zwischen der Spülung im Bohrloch und dem Verfüllbaustoff. Qualitätsmindernde Mischzonen oder unerwartete Verluste der Verfüllbaustoffe in das Gebirge sind mit der Ringrohrsonde nicht zu erwarten.

In diesem Zusammenhang sollen die Unterschiede der Systemdurchlässigkeitsmessung im Labor mit den praktischen Anwendungen erörtert werden. Der wesentliche Unterschied besteht in dem Untersuchungsfeld. Während bei den Laboruntersuchungen ein besandetes PVC-Rohr die "Bohrlochwand" als undurchlässige Grenze nachbildet, steht in der Erdwärmesonde das aufgeschlossene Erdreich mit all seinen Varianten und Einflussgrößen an. Ebenso können die Einflüsse des Bohrprozesses (Spülung, Spülungskruste usw.) im Labormaßstab nicht nachgestellt und berücksichtigt werden.

Das Versuchsprogramm wurde so gestaltet, dass die Untersuchungen ohne Gewebeschauch eine Rohranordnung mit einem Abstand von ca. 3 cm von der Bohrlochwand aufweist. Diese Ergebnisse für die Systemdurchlässigkeit werden mit den Messungen verglichen, bei denen ein Gewebeschauch mit außenliegenden Rohren Bestandteil des Probekörpers ist.

Mit einem Vergleich der Systemdurchlässigkeiten bei unterschiedlichen Anordnungen kann der Einfluss der jeweiligen Komponenten beurteilt werden. Es werden die Systemdurchlässigkeiten für Proben ohne Einbauten, für Proben mit PE-Rohren und für Proben mit PE-Rohren inklusive Gewebeschauch dargestellt. In der Abbildung 12 Bei der letzten Variante werden die Außenrohre mit dem Gewebeschauch dargestellt. Die Außenrohre sind mit dem Gewebeschauch verbunden, so dass sie nach der vorgesehenen Technologie für die Installation der Ringrohrsonde im Zuge des Verfüllvorganges in die Nähe der Bohrlochwand bewegt werden. Die Außenrohre sind nach dem Verfüllvorgang auch bei den Probekörpern in einem Abstand von ca. 5 mm von der Wand des PVC-Rohres fixiert.

Zur Verifizierung wurden jeweils 2 Proben unter gleichen Bedingungen hergestellt, so dass auf untypische Abweichungen reagiert werden kann und Fehlinterpretationen vermieden werden.

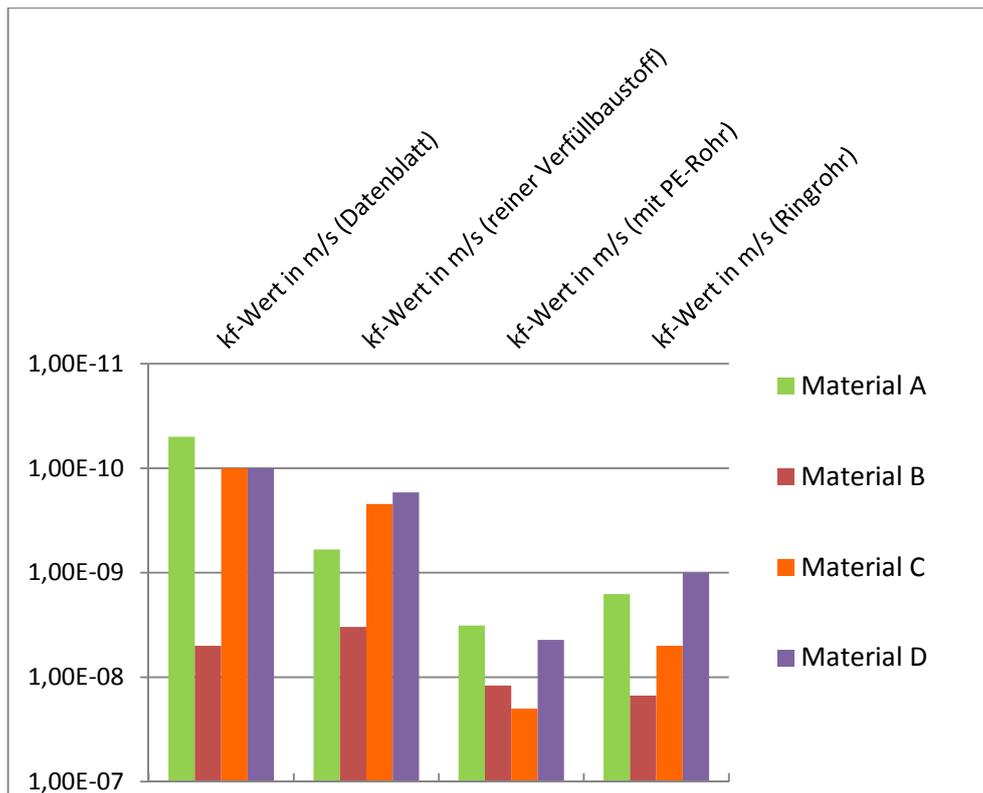


Abbildung 13: Gemessene Systemdurchlässigkeiten verschiedener Verfüllbaustoffe bei unterschiedlichen Sondenkonfigurationen

Aus den Durchlässigkeitsmessungen kann man folgende Aussagen treffen:

- Die Proben mit dem Verfüllbaustoff bestätigen das Durchlässigkeitsniveau aus den Datenblättern der Hersteller.
- Die Proben mit PE-Rohren als Doppel-U-Rohr liefern wesentlich größere Durchlässigkeiten. Die Ursache wird der Randläufigkeit direkt an dem Kontakt Verfüllbaustoff PE-Rohr zugeschrieben. Eine Untersuchung der Randläufigkeit und deren Verringerung wird unter Punkt 3.2.4.1 beschrieben.
- Ein Beschleunigung der Messung ist mit größeren Höhen(Druck-)differenzen möglich und für die Routineanwendung notwendig.
- Die Proben in Ringrohrausführung, also mit Gewebeschlauch, erreichen Durchlässigkeiten in der analogen Größenordnung wie unter Position 2. Die Einflüsse des Gewebeschlauches und die Anordnung der Rohre mit unterschiedlichem Wandabstand sind nicht wesentlich für die Systemdurchlässigkeit einer Erdwärmesonde.

### 3.2.4 DURCHFÜHRUNG DER TECHNIKUMSVERSUCHE

Zunächst wurden die Probekörper hergestellt. Dazu wurden in ein Kunststoffrohr der Verfüllbaustoff und je nach Versuch auch die entsprechenden Einbauten in das Rohr eingebracht.



Abbildung 14: Einbau von PE-Vollstäben zur Simulation der Sondengeometrie / Probekörper vor Einbringen der Zementsuspension (rechter Kunststoffzylinder)

Auch der Gewebeslauch wurde durch manuelles Klammern des später verwendeten PP-Materials hergestellt und die 16mm Außenrohre wurden in Taschen eingebracht. Dies wurde so vorgesehen, da die mechanische Befestigung zur Zeit der Durchführung der Dichtheitsversuche zu Beginn der Projektphase noch als Herstellungsmethode favorisiert wurde.



Abbildung 15: Herstellen des simulierten Gewebeslauches durch mechanisches Klammern



Abbildung 16: Einbringen der PE-Vollstäbe (beschichtet) / Zustand nach Einfüllen der Zementsuspension (linker Kunststoffzylinder)

Nach dem Einbringen der Zementsuspension wurden die Probekörper zunächst 4 Wochen stehend gelagert. In der Zeit erfolgte das erste Abbinden des Zements. Während dieser Zeit wurde die Oberseite zur Vermeidung von Trocknungsrissen ständig mit Wasser benetzt.

Nach diesen 4 Wochen wurde der Probekörper auf seine spätere Länge von 500mm gesägt. Hierbei erfolgte eine optische Kontrolle der gleichmäßigen Verfüllung an Hand der Oberfläche entlang der Schnittkanten.



Abbildung 17: Ober- und Unterteil des Probekörpers nach Schnitt / fertiger Probekörper mit freigelegter Schnittkante

Bis zum Einbau in den Versuchstand wurden die Probekörper nochmal mindestens 8 Wochen bis zum endgültigen Aushärten im Wasserbad gelagert.



Abbildung 18: Lagerung der Probekörper im Wasserbad

Bei der praktischen Durchführung der Versuche zeigte sich, dass sich nach einer anfänglichen Phase hoher Durchlässigkeit und einem Egalisierungsvorgang im Großteil der Versuche ein statischer Durchlässigkeitswert einstellt. Es handelte sich hierbei um Langzeitversuche von mehreren Wochen Dauer.

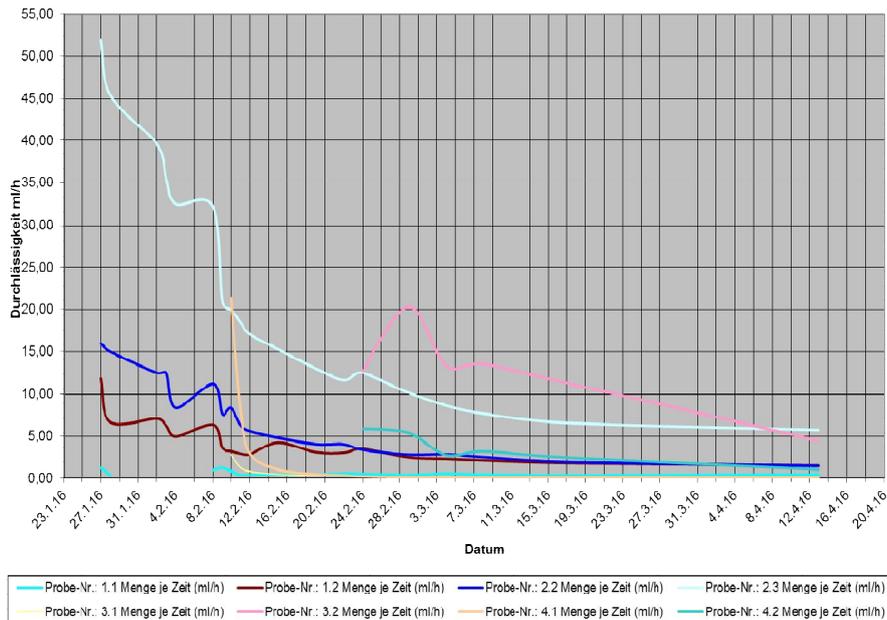


Abbildung 19: Durchlässigkeitswerte von verschiedenen Zementproben im zeitlichen Verlauf

### 3.2.4.1 BESCHICHTUNG DER PE-ROHRE ZUR VERBESSERUNG DER ANHAFTUNG DER ZEMENTSUSPENSION UND VERSUCHE MIT HANDELSÜBLICHEN KLEBSTOFFEN

Polyethylen hat naturgemäß eine hohe Oberflächenspannung, sowie eine sehr glatte Oberfläche. Daher wurde das Beschichten mit Auftragsstoffen zur Verbesserung der Anhaftung der Zementsuspension und /oder der Herabsetzung der Oberflächenspannung untersucht. Hierzu wurden folgende Auftragsstoffe zur Erzeugung einer größeren Rauigkeit bzw. einer größeren Oberfläche untersucht:

- Kunststoffhaltige Beschichtungsfarbe (Fassadenfarbe)
- Auftrag von Polyethylenkleber und anschließendem Besanden
- Handelsüblicher Haftvermittler für Zementsuspensionen (Betonkontakt)
- Fluorierung der PE-Rohre zur Herabsetzung der Oberflächenspannung



Abbildung 20: Rohre mit Betonkontakt (links) und Kunststofffarbe (rechts) behandelt

Weiterhin wurde untersucht, ob sich PE-Kleber zur Verbindung von Außenrohr und Gewebeschlauch eignet:

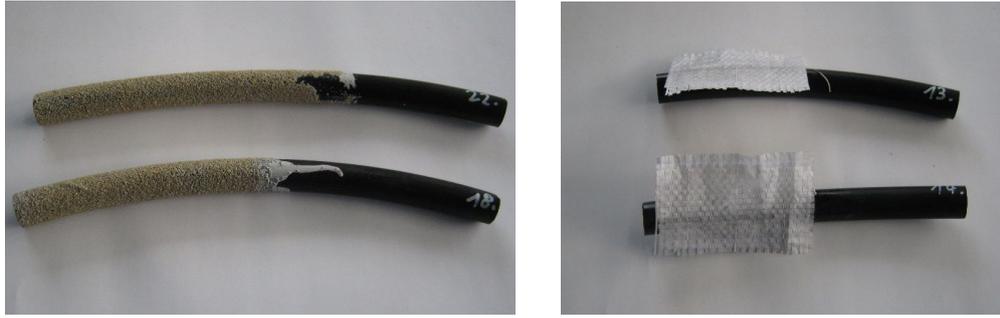


Abbildung 21: Besandete Rohre (links) und Klebeversuche zur Fixierung des Gewebeschlauchs

Die Versuche zur Fixierung des Gewebeschlauchs an den Rohren wurden zu einem Zeitpunkt ausgeführt, zu dem die Verwendung von Heißklebstoffen noch nicht in Betracht gezogen wurde.



Abbildung 22: Verwendeter Klebstoff für Kunststoffe

Die Auswertung der Versuche ergab, dass sich die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte mit zusätzlicher Beschichtung nicht signifikant von den Ergebnissen ohne Beschichtung unterscheiden. Die Abweichungen lagen innerhalb der ermittelten üblichen Abweichungen. Die Verwendung von Polyethylen-Klebstoffen zur Verbindung von Gewebeschlauch und Außenrohren konnte aufgrund der schlechten Klebeverbindung ausgeschlossen werden.

### 3.2.5 VERBINDEN DER AUßENROHRE MIT DEM GEWEBESCHLAUCH

Der wesentliche Unterschied der Ringrohrsonde von den bisher eingesetzten Sonden ist nicht die Vielzahl der Ringrohre (Außenrohre), sondern die Anordnung der Ringrohre im Bohrloch. Dieses Merkmal entscheidet über die Effizienz des Wärmeaustausches. Je näher die Rohre an der Bohrlochwand liegen, umso besser ist die Effizienz des Wärmeaustausches und damit auch der Sonde. Um diese Ordnung herzustellen, ist es notwendig, dass zwischen den Rohren und dem Gewebeschlauch über die gesamte Länge eine Verbindung hergestellt wird. In erster Konzeption war vorgesehen, dass die Ringrohre durch Schlingen oder Haken mit dem Schlauch verbunden werden. Hierzu wurde auch eine Vorrichtung entwickelt und gebaut, die es ermöglicht, die Rohre im Inneren des Schlauches so zu orientieren, dass sie von innen an die Schlauchwand gepresst werden. Mit dieser Vorrichtung war es möglich, die zwölf Außenrohre von außen durch den Gewebeschlauch zu tasten und sie in Abständen von ca. 1 m mit dem Schlauch zu verbinden.



Abbildung 23: Vorrichtung zum Positionieren der Außenrohre für die Befestigung an dem Gewebeschlauch



Abbildung 24: Einführen der Vorrichtung in den Gewebeschlauch



Abbildung 25: Manuelle Befestigung der Außenrohre an dem Gewebeschlauch



Abbildung 26: Am Gewebeschlauch befestigte Außenrohre

Bei diesen Versuchen stellte sich heraus, dass diese Befestigung der zwölf Rohre nicht mechanisiert werden kann. Der Personalaufwand über eine 100 m lange Sonde (mit 1200 Befestigungsstellen) wird zu aufwendig und damit zu kostenintensiv. Die Kosten für die Herstellung hätten so eine wirtschaftliche Anwendung ausgeschlossen. Nach mehreren Versuchen und Verbesserungen der Werkzeuge wurde diese Bauform ohne Erfolg beendet.

Als Alternative wurde für die Verbindung der Außenrohre mit dem Gewebeschlauch eine Klebeverbindung konzipiert. Die Verbindung ist unbedingt notwendig, da sonst das Ziel der Effektivitätssteigerung nicht erreicht werden kann. Für die Verbindung müssen die Materialien Polypropylen (Gewebeschlauch) und Polyethylen (Außenrohre) miteinander verklebt werden. Es sind beides Materialien, die sich nur schlecht verkleben lassen. Nach mehreren Vorversuchen mit Kaltklebern ergaben sich keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Aus dem Grund wurde auf Heißkleber umgestellt. Im Nachhinein kann festgestellt werden, dass diese Form des Klebens eine sehr praktikable und günstige Möglichkeit für die Sonde darstellt. Mit der Verklebung kann sichergestellt werden, dass die Außenrohre mit dem geringsten Abstand an der Bohrlochwand platziert werden und so die energieeffizienteste Position einnehmen. Nach mehreren Tests mit verschiedenen Heißklebern wurde ein geeignetes Produkt gefunden. Es war notwendig die Technologie für das Aufbringen des Klebers und auch das Verkleben mit dem Gewebeschlauch vollkommen neu zu entwickeln. Die Vorrichtungen unterscheiden sich vollständig von der vorhergehenden Schlingenvariante. Es wurde ein technologischer Ablauf gewählt, der sich aus folgenden Teilprozessen zusammensetzt:

- a) Beschichten der Außenrohre mit Heißkleber
- b) Auftrommeln der beschichteten Außenrohren auf Teiltrommeln. Für jedes Außenrohr ist eine Trommel zu verwenden.
- c) Zuführen der Außenrohre in den Gewebeschlauch. Bei diesem Vorgang muss sichergestellt werden, dass die beschichtete Seite des jeweiligen Rohres gegenüber dem Schlauch justiert wird.

Der Heißkleber hat den Vorteil, dass er durch Wiedererhitzen sich verflüssigt und seine Klebekraft erneut entfalten kann. Das wird auch hier ausgenutzt. Die Rohre werden dazu ge-

meinsam mit dem Schlauch einem Heizsystem zugeführt. Für jedes der zehn Rohre wird ein Heizelement verwendet, die den Klebstoff auf dem Rohr zu verflüssigen und während des Vorgangs auf den Gewebeschlauch von Innen verteilen. So entsteht eine Klebeverbindung zwischen Außenrohr und Gewebeschlauch. Nach dem Abkühlen ergibt sich eine ausreichend stabile Verbindung, die in der Lage ist die Rohranordnung mit dem Schlauch in der gewünschten Lage zu stabilisieren.

### 3.2.6 QUALITÄTSSICHERUNGSMÄßNAHMEN FÜR DIE SONDE

Die Erdwärmesonden werden für eine Lebensdauer von 30-50 Jahren ausgelegt. Hierzu eignet sich der Kunststoff Polyethylen gut und wird von fast allen Herstellern verwendet. Aus diesem Grunde wird für die Rohre der Sonde das PE 100 RS benutzt. Die Formteile werden aus PE 100 hergestellt. Mit dieser Materialwahl ist die Voraussetzung für ein stabiles materialverträgliches Verschweißen der Rohre mit dem Sondenfuß beziehungsweise dem Kopf der Sonde gegeben. Die Qualitätssicherung erfolgt unter Mitwirkung des SKL Würzburg. Bei dieser Prüfung und Zertifizierung der Sonden werden nicht nur die Schweißverbindungen visuell geprüft, sondern es werden auch Belastungsversuche durchgeführt und ausgewertet. Mit Druckversuchen wird die Festigkeit der Rohre und der Schweißverbindungen geprüft. Ebenso werden Dauerstandsversuche über mehrere Tage unter Druck unter vorgegebenen Umgebungsbedingungen an einem ca. 100 cm langen Probestück, das aus einem Sondenfuß, den Rohrverbindungen und dem Sondenkopf besteht, durchgeführt. In der Routinefertigung wird die komplett fertig gestellte Sonde mit Luft abgedrückt und die Einhaltung eines vorgegebenen Druckverlustkorridors für den Einbau freigegeben. Der Korridor für den zugelassenen Druckverlust muss für die Ringrohrsonde noch ermittelt werden, da für die Konstruktionsform (10 Außenrohre und 1 Zentralrohr) und das beim Abdrücken auftretende Ballooning keine Erfahrungswerte vorliegen. Dieser zulässige Druckverlust wird mit den bekannten Werten beispielsweise von Doppel-U-Rohrsonden ermittelt. Die Dichtheitstests und die Durchgängigkeitsprüfungen werden an der gesamten Sonde, also unter Einbeziehung der Verschweißungen am Sondenfuß und am Sondenkopf durchgeführt. Mit dieser Druckprüfung sind dann die Voraussetzungen für die Freigabe der Sonde gegeben. Die Dauerstandsversuche werden auf erprobten anerkannten Testanlagen von praktizierenden Sondenherstellern ausgeführt.

### 3.2.7 BOHRTECHNISCHE BEDINGUNGEN FÜR DEN SONDENEINBAU

Bei der Konzeption der Ringrohrsonde wurde besonders darauf geachtet, dass die üblichen Bohrdurchmesser genutzt werden können. Das ist schon deshalb von Interesse, weil die spezialisierte Bohrbranche für Erdwärmesonden in der Regel eine Gerätetechnik vorhält, die bei einem Bohrdurchmesser von 180 mm eine Teufenkapazität von ca. 150 m erreichen kann. Bei über 90% der Erdwärmesonden bewegt sich der Einsatz in diesem Bereich. Mit dem Sondenfußdurchmesser von 90 mm und einem max. Schwerstückdurchmesser von 101 mm reißt sich die Ringrohrsonde in die marktüblichen Sondendurchmesser ein.

Die Bauweise der Ringrohrsonde erlaubt es nicht den Einbau mit einem Schubgestänge auszuführen. Es ist deshalb ausschließlich die Sonde mit einem Schwerstück in das Bohrloch einzubauen. Für den Einbau der Ringrohrsonde werden die technologischen Abläufe in folgenden Schritten beschrieben:

- a) Nachdem die Bohrung bis zu der vorgesehenen Tiefe hergestellt ist, kann mit der Installation der Sondenrohre als Rohrbündel begonnen werden. Die Sondenrohre werden zur Vorbereitung für den Einbau als komplettes Bündel zusammengefasst von einer Trommel, die in der Nähe des Bohrlochs angebracht wird, in das Bohrloch eingebaut. Das Rohrbündel ist so gestaltet, dass es an keiner Stelle größer als 101 mm Durchmesser aufweist. Zum Schutz des Schlauches um das Rohrbündel kann bei komplizierten Bohrlochverhältnissen eine Schutzrohrtour eingebracht werden. Der Sondenfuß, der nur einen Durchmesser von 90 mm auf-

weist, wird von einem Schutzrohr mit einem integrierten Schwerstück voran, in das Bohrloch gezogen. An der Trommel wird die Einbaugeschwindigkeit reguliert und begrenzt.

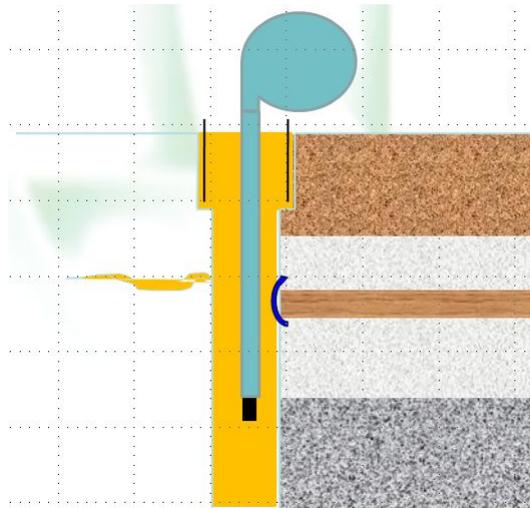


Abbildung 27: Schematische Darstellung - Einbau der Ringrohrsonde von der Schlauchtrommel

- b) Vor dem Einbau wird das Bohrloch sauber gespült und die Tiefe exakt erfasst. Um mit Sicherheit die vorgesehene Sondenlänge einbauen zu können wird die Bohrungslänge ca. 1m länger als die Sondenlänge ausgeführt. Nach dem Abstellen des Sondenrohrbündels auf Sohle, erfolgt das Verfüllen hängend, so dass die Rohrleitungen gestreckt liegen und ein Ausknicken nicht möglich ist. In diesem Zustand wirkt die Spülungssäule von außen auf den Gewebeschlauch und drückt ihn an das Rohrbündel, so dass nur ein kleiner Teil des Bohrloches eingenommen wird.

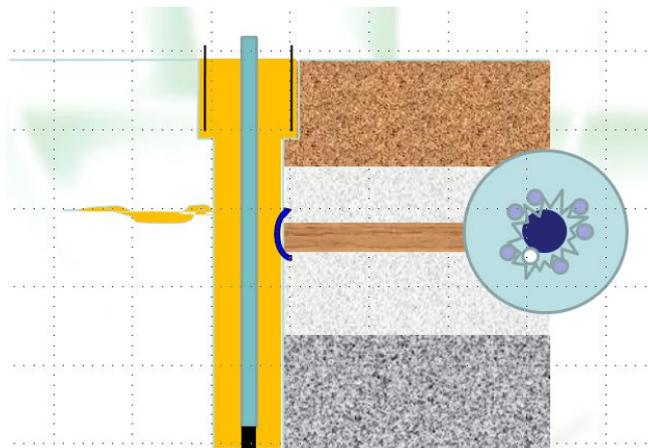


Abbildung 28: Schematische Darstellung - Absetzen der Ringrohrsonde auf der Bohrlochsohle

- c) Im nächsten Schritt beginnt die Verfüllung der Sonde von unten nach oben. Als Verfüllbaustoff kommt der übliche Baustoff für Geothermiesonden zum Einsatz. Die Eigenschaften des Verfüllbaustoffes müssen aber nicht wie bei den konventionellen Sonden mit besonders hoher Wärmeleitfähigkeit ausgestattet sein. Das Material hat durch die Konstruktion nur einen geringen Einfluss auf den thermischen Bohrlochwiderstand. Die wärmeaufnehmenden Außenrohre werden nahe der Bohrlochwand angeordnet. Der Verlust durch den Wärmeübergang durch den Verfüllbaustoff ist deshalb vernachlässigbar. Die Verfüllung wird über ein Verfüllrohr eingepumpt, das gemeinsam mit dem Rohrbündel eingebracht wird.

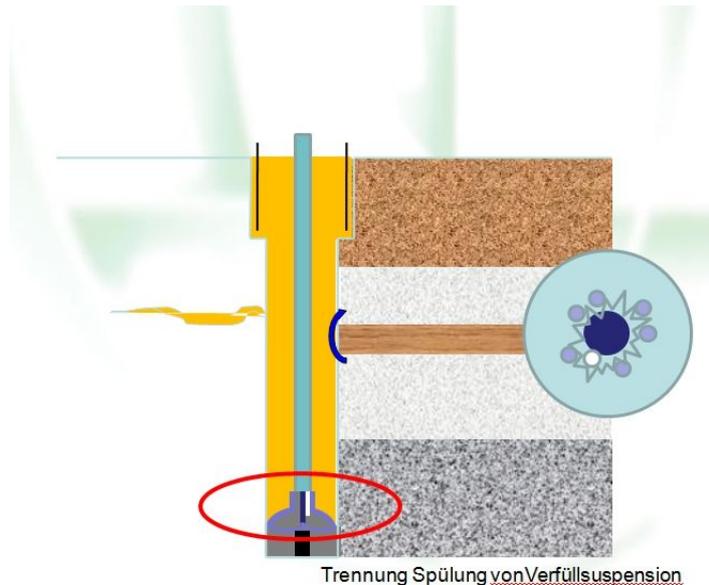


Abbildung 29: Schematische Darstellung - Beginn des Einbringens von Verfüllbaustoffe in den Gewebeschauch

Auf der Darstellung wird im Bohrloch tiefsten (Fußbereich der Sonde) der Beginn des Auffüllens von dem Schlauch verdeutlicht. Der Schlauch hat eine maximale Durchmesserkapazität von 19 cm. In der Regel werden die Bohrungen mit einem Durchmesser von 15 cm hergestellt. Durch seine Flexibilität passt er sich den Unebenheiten der Bohrlochwand formschlüssig an und wird von ihr gestützt, so dass keine Innendruckbelastung wirken kann.

Mit dem weiteren Auffüllen des Schutzschlauches wird neben der verfahrensbedingten Anordnung der Ringrohre an der Bohrlochwand auch die dichte Verfüllung des Bohrloches erreicht. Die Verfüllsuspension besitzt eine größere Dichte als die Bohrspülung und verdrängt sie nach oben oder ins Gebirge. Der Verfüllbaustoff befindet sich im Innern des Schutzschlauches und kommt mit der Bohrspülung nicht in Verbindung und es entsteht keine Mischzone von Spülung und Verfüllsuspension, die die Qualität mindern und sich ungünstig auf die Systemdurchlässigkeit auswirken.

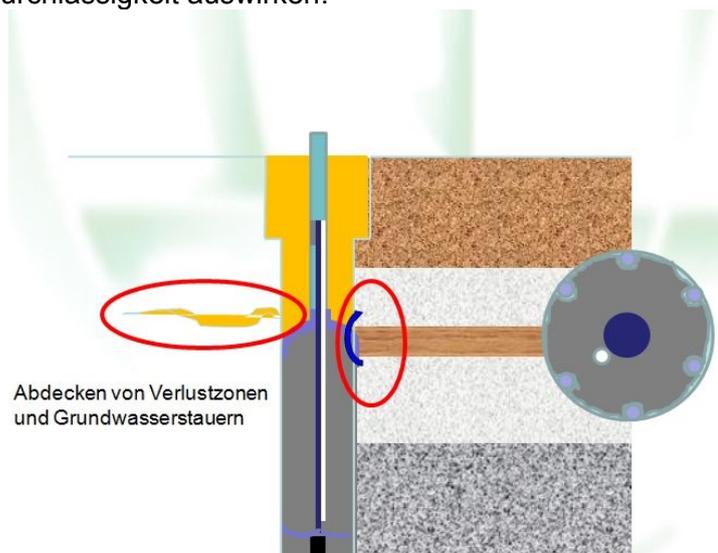


Abbildung 30: Schematische Darstellung - Situation während des Einbringens von Verfüllbaustoff - rechts: Grundwasserstauer; links: Zone mit Spülungsverlust

- d) Die Verfällsuspension befindet sich nur innerhalb des Gewebeschlauches. Das Verfäll erfolgt deshalb ohne Verluste in angrenzende aufnahmefähige Zonen. Das ist nicht nur ein technischer, sondern auch ein großer Kostenvorteil. Diese Verlustzonen werden mit dem aushärtenden Baustoff abgedeckt, ohne dass Material in das Erdreich eindringen oder abfließen kann. Das hat den Vorteil, dass die eingebrachte Verfällmenge auch bei komplizierten geologischen Verlusthorizonten nur wenig von der geplanten Menge abweicht. Das Bohrloch wird bis an die Oberfläche mit dem Baustoff ausgefüllt.

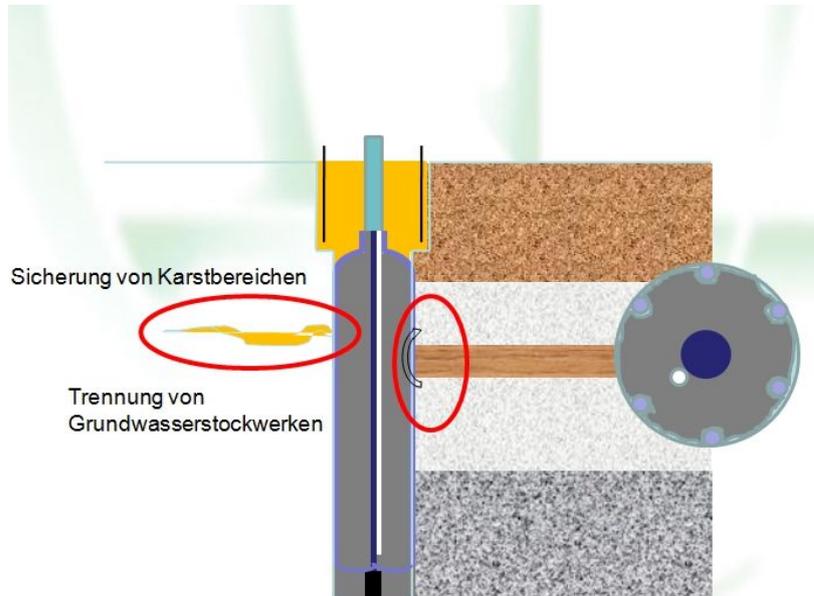


Abbildung 31: Schematische Darstellung - Situation während des Einbringens von Verfüllbaustoff - rechts: Verfüllen eines Grundwasserstauers; links: Abdecken eine Verlustzone

Die Grundwasserstauer werden wie auch bei der schlauchlosen Verfüllung mit der geringdurchlässigen Verfüllsäule abgedeckt, so dass eine hydraulische Trennung der Grundwasserleiter gewährleistet ist. In dem Versuchsprogramm wurden gleichwertige Systemdurchlässigkeiten für die Ringrohrsonde im Vergleich zu den anderen konventionellen PE-doppel-U-Rohr-Sonden ermittelt.

- e) Ein wesentlicher technologischer Vorgang bei der Anwendung der Ringrohrsonde besteht in der Bewegung der Sondenrohre während der Verfüllung an die Bohrlochwand. Die 10 Außenrohre sind mit dem Gewebeschlauch gleichmäßig über den Umfang versetzt um einen Winkel von  $36^\circ$  verteilt angeordnet. Mit dem Einbringen der Suspension bläht sich der Schlauch bis zur Bohrlochwand auf und platziert sie geordnet nebeneinander an der Bohrlochwand, so dass zwangsgeführt und ein planmäßig angeordneter Wärmeübertrager entsteht. Nach dem Aushärten des Baustoffes wird das Rohrsystem in der Position festgelegt. Nach dem Ausbau der Standrohrtour wird das Rohrsystem mit dem Gewebeschlauch an den größeren Durchmesser in diesem Abschnitt angepasst und verbessert den Wärmeentzug und die Dichtheit des Bohrloches im oberen Bohrlochabschnitt.

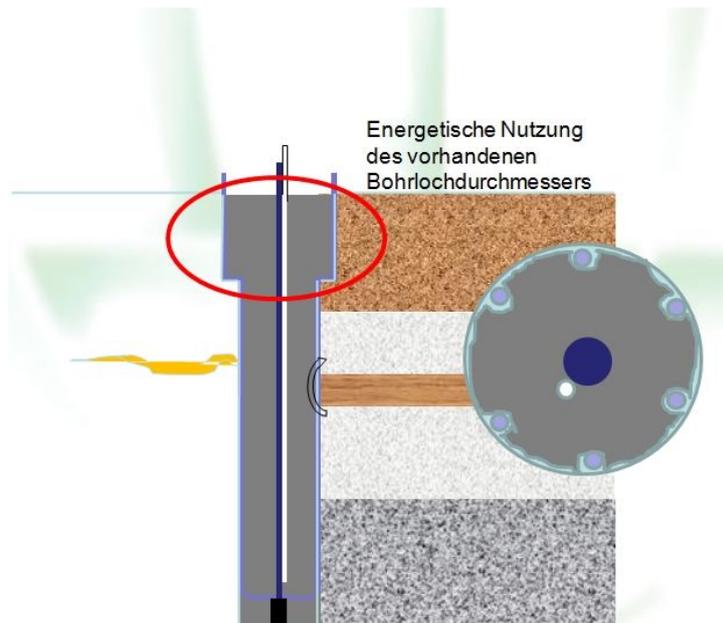


Abbildung 32: Schematische Darstellung - vollständig verfülltes Bohrloch - Verfüllrohr (weiß) vor dem Ausbau - größerer Bohrlochdurchmesser im Bereich der Standrohrtour wird im gesamten Querschnitt ausgefüllt - Ringrohre werden dabei bis an die Bohrlochwand mit dem größeren Durchmesser angeordnet

- f) Als letzter Schritt bleibt noch der Ausbau der Verfüllleitung. Die Sonde kann über den Sammler, der die Außenrohre auf ein DN 40 zusammenfasst, und dem DN 40 Zentralrohr mit Vor- und Rücklauf der Wärmepumpe im Haus verbunden werden.

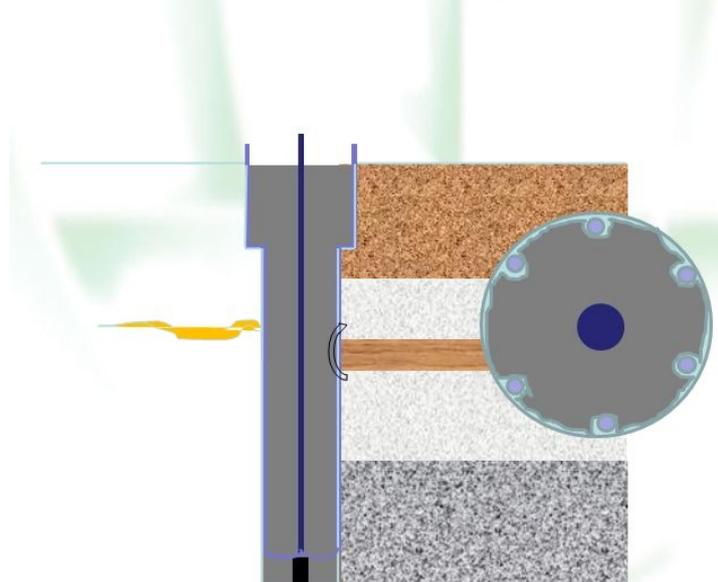


Abbildung 33: Schematische Darstellung - vollständig verfülltes Bohrloch - Endzustand mit ausgebautem Verfüllrohr

Mit dem Einsatz ergeben sich mehrere vorteilhafte Eigenschaften für die Erdwärmesonde, wie

- eine Verfüllung ohne Mischzone mit dem Bohrlochinhalt
- vollständige Verfüllung mit dem Gewebeschauch über die gesamte Sondenlänge in einem Arbeitsgang bis zur Geländeoberkante (kein Nachverfüllen)
- Materialeigenschaften des Verfüllmaterials können unabhängig von der Wärmeleitung ausgewählt werden (z.B. Frost-Tau-resistenter Baustoff)

- keine Verluste des Verfüllmaterials in das Erdreich – einfache Kontrollfähigkeit über die Mengenerfassung
- sichere Trennung verschiedener GW-Stockwerke durch die Packerwirkung des Schutzschlauches
- Qualitätsverbesserung der BLM-Aussage mit größeren Messsonden im Zentralrohr und klare Interpretation durch die radialsymmetrische Anordnung
- geringe Systemdurchlässigkeit ohne Unterschied zur Doppel-U-Rohr-Sonde

### 3.3 TECHNOLOGISCHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DEN BAU DER RINGROHR-SONDE

Die Ringrohrsonde kann mit den im Markt üblichen technologischen Angeboten nicht realisiert werden. Für das Verarbeiten von Kunststoff sind verschiedene Anbieter vorhanden, die aber auch erst diese Voraussetzung mit dem Bau einer Vorrichtung schaffen müssten. Es ist notwendig spezielle Technologien im Zusammenhang mit dem Sondenbau zu entwickeln um sofort Fehler zu beseitigen. Mit diesen Technologien werden die Voraussetzungen geschaffen, um die Sonde herzustellen.

#### 3.3.1 TECHNOLOGIE FÜR DAS PE-SCHWEIßEN VON MEHRFACHROHREN

Für die Herstellung der Ringrohrsonde ist es notwendig die 10 Außenrohre und das Zentralrohr mit dem Sondenfuß beziehungsweise die zehn Außenrohre mit dem Sondenkopf zu verschweißen. Das Herstellen von Schweißverbindungen mit dem Kunststoff Polyethylen ist umfassend bekannt. In der Regel werden die Schweißverbindungen durch stumpfes Aufeinanderfügen oder durch das verschweißen mit "Muffe-Dorn" durchgeführt. Bei den hier zu bearbeitenden relativ kleinen Durchmessern bleibt nur die Anwendung des "Muffe-Dorn"-Schweißens. Bei dieser Methode werden die thermisch plastifizierten Rohre und Bohrungen ineinander geschoben und danach abgekühlt. Bei der Ringrohrsonde ist das Problem zu lösen, dass die 10 Außenrohre mit Durchmesser 16 mm und das Zentralrohr mit Durchmesser 40 mm gemeinsam in das Fußstück eingebracht werden müssen. Der Kunststoff wird vor dem Fügeprozess mit Heizelementen bei einer Temperatur von größer 220 °C sowohl an dem Rohrende als auch in den Bohrungen des Kunststoffkörpers in den plastischen Zustand überführt, dass es beim Zusammenführen der beiden Teile zu einer innigen gefügten homogenen Verbindung des Kunststoffes kommt. Auf diese Weise entsteht eine feste und stabile Verbindung. Die Platzverhältnisse lassen es nicht zu, dass mit unterschiedlicher Heizvorrichtung beide Rohrdimensionen gleichzeitig aufgewärmt und gefügt werden können. Die unterschiedlichen Dimensionen erfordern unterschiedliche Aufheiz- und Fügezeiten. Es ist deshalb notwendig, dass man die Außenrohre und das Zentralrohr in zwei voneinander getrennten Arbeitsschritten verschweißt. Um das Rohrbündel mit dem Fußteil zu verbinden muss es in eine Vorrichtung präzise eingespannt werden, so dass die Rohre exakt gegenüber den Bohrungen im Körper des Sondenfußes angeordnet sind. Diese Halterung muss so gestaltet sein, dass die Spannelemente für die Rohre sich nach dem Schweißprozess wieder entfernen lassen. Für das Zentralrohr ist der Schweißprozess relativ einfach, da das Rohr in den Körper des Sondenfußes vorher auf konventionelle Weise ebenfalls mit "Muffe-Dorn" eingeschweißt werden kann. Wesentlich für den erfolgreichen Schweißprozess ist das Einhalten der Temperaturen und Zeiten. Das Reinigen der Rohre vor dem Schweißen wird natürlich grundsätzlich vorausgesetzt. Während bei dem Zentralrohr mit der Wandstärke von 3,7 mm keine Verengungen im Innendurchgang durch den Schweißprozess auftreten, ist bei den DN 16 Rohren der freie Innendurchgang konstruktiv zu sichern. Aus diesem Grund wird zum Schutz des freien Durchgangs eine Stützhülse eingesetzt, die dafür sorgen, dass kein plastisches Kunststoffmaterial in den Strömungsquerschnitt gelangen kann.

### 3.3.2 KLEBEVERBINDUNG VON POLYETHYLEN UND POLYPROPYLEN

Auf die Entwicklung der Technologie für die Klebeverbindung in diesem Projekt wurde bereits unter Pkt. 3.2.4 eingegangen. Das Verkleben von den beiden Kunststoffen Polyethylen und Polypropylen stellt spezielle Anforderungen an die Klebstoffe und seine Verarbeitungsbedingungen insbesondere der Verarbeitungstemperatur. Der Wärmeeintrag ist so zu begrenzen, dass der Gewebeschlauch nicht beschädigt wird.

Das Material Polyethylen ist der Standardwerkstoff für Erdwärmesonden in der oberflächennahen Geothermie. Das Material für den Gewebeschlauch kann unter Berücksichtigung der technischen und genehmigungsrechtlichen Eignung und der wirtschaftlichen Bedingungen ausgewählt werden. Nach Abwägung der Rahmenbedingungen fiel die Entscheidung zugunsten von Polypropylen. Gewebeschläuche sind aus diesem Material in verschiedenen Größen im Handel verfügbar und erfüllen als lebensmittelrechtlich unbedenkliches Material die Anforderungen gegenüber dem Grundwasserschutz. Eine umfangreiche Anwendung in der Praxis wird über die Eignung letztlich entscheiden.

### 3.4. PHYSIKALISCHE BEDINGUNGEN FÜR DIE AUSLEGUNG DER RINGROHR-SONDE

Die Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe und der zur Verfügung stehende Raum in einem Bohrloch setzen die geometrischen Rahmenbedingungen für eine bis zu 150 m lange Ringrohrsonde. Für die Gestaltung der Ringrohrsonde sind die geometrischen Größen

- a) maximaler Bohrlochdurchmesser von 170 mm
- b) maximaler Sondendurchmesser 100 mm
- c) Dimension der Vor- und Rücklaufleitung DN 40

zu beachten.

Ebenso können die erprobten Kunststoffmaterialien für die Zirkulationsrohre verwendet werden. Das ermöglicht auch den Vergleich zwischen den gebräuchlichen Sondenformen bei gleichen thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit: PE ca. 0,40 W/m K und PP ca. 0,23 W/m K). Für den thermischen Widerstand hat der PP-Gewebeschlauch durch seine geringe Materialstärke von ca. 0,1 mm keine Bedeutung.

Die Ringrohrsonde kann gegenüber den konventionellen Sonden günstige Eigenschaften für den energetischen Wirkungsgrad aufweisen, wie

- große Oberfläche zur Wärmeübertragung
- geringe Wandstärke der isolierenden Sondenrohre
- geringer Abstand zwischen Wärmequelle und den koaxial angeordnete Ringrohre zur Wärmeaufnahme – geringer Wärmewiderstand
- hoher Wärmewiderstand zwischen Ringrohren und dem Zentralrohr geringer thermischer Kurzschluss
- weitgehend unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials
- Nutzung von Durchmessererweiterungen der Sondenbohrung

#### 3.4.1 SIMULATION ZUR BEURTEILUNG VERSCHIEDENER AUSLEGUNGSVARIANTEN

Die Simulation der Wärmeleitung zwischen den verschiedenen Sondenvariationen und dem Erdreich sind eine geeignete Methode die Sondenkonstruktion zu optimieren und die Unterschiede der energetischen Effizienz nachzuweisen. Sie sind für die typischen Einflussfaktoren zusammenfassend dargestellt [6] und zeigen die großen Potentialunterschiede im Energiegewinn auf. Ein solcher Vergleich ist nur durch Modellierung mit dreidimensionalen Zylinderkoordinaten (Radius-Winkel-Tiefe) möglich. Der Vergleich wurde mit einem und demselben Programm für jede Sondenvariante ausgeführt, so dass numerische Einflüsse keine Be-

deutung haben. Mit der verifizierten 3D-Software ModTherm [1] werden die Eigenschaften für die verschiedenen Sondenformen unter gleichen Rahmenbedingungen berechnet. Das Programm nutzt solche Koordinaten, die die Lage jedes Einzelrohres in der Erdwärmesonde punktgenau nachbilden. Die beispielhafte Darstellung der Ringrohrsonde in der Abbildung kann natürlich auch auf die Doppel-U-Rohr-Sonde und die Koaxialsonde angewandt werden, so dass es sehr gut für Vergleiche geeignet ist.

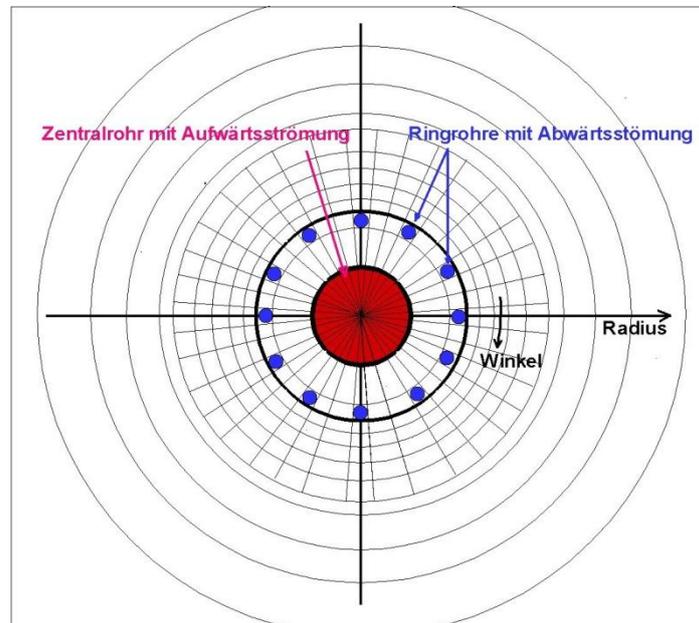


Abbildung 34: Gitterstruktur der Software ModTherm am Beispiel der Ringrohrsonde (hier nur das ebene Netz)

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die geometrischen Angaben für die verschiedenen verglichenen Sondentypen zusammengestellt. In der Tabelle werden aus diesen Geometrien die wirksame Oberfläche zur Aufnahme der Wärme und das Gewicht (bei Dichte PE<sub>HD</sub> RS) der Sondenrohre für eine 100 m lange Sonde gegenübergestellt.

Oberfläche / Gewicht / WD	RR-Sonde	Dp-U-Rohr	Einf-U-Rohr
Sondenform	10xDN16+1xDN40	4xDN32	2xDN40
Fläche in m <sup>2</sup>	62,8	40,2	25,1
Gewicht in kg	<b>105,9</b>	<b>100,7</b>	<b>82,1</b>
Wandstärke mm	1,5 und 3,8	2,9	3,8

Tabelle 1: Die Gegenüberstellung verschiedener Sondenformen (100 m Länge)

### 3.4.2 OPTIMIERUNG DER AUßENROHRANZAHL

Eine große Hilfe waren die Simulationsrechnungen für die Optimierung der Anzahl der Außenrohre. Die Außenrohre sind die wesentlichen Wärmeübertrager für die Ringrohrsonde. Man kann deshalb davon ausgehen, je größer die Wärmeübertragungsfläche ist, umso günstiger ist auch die Wärmeübertragung. Wie aus der vorhergehenden Tab. 1 zu erkennen ist, hat die Ringrohrsonde mit 10 Außenrohren gegenüber der Doppel-U- und Einfach-U-Sonde ohnehin die größte Wärmeübertragungsfläche. Diese Fläche kann man natürlich mit der Anzahl der Rohre variieren. Gegen eine extreme Vergrößerung der Rohranzahl sprechen der hohe konstruktive und bauliche Aufwand für die Fertigung und der geringe Raum im Bohrloch. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die Anzahl der Rohre so zu wählen, dass der Wärmeeintzug (hier ausgedrückt mit der Sondenleistung) sich bei Verringerung der

Sondenrohranzahl nur wenig verringert. In der Tabelle 2 wurden deshalb verschiedene Ringrohrsonden mit baulich möglichen Außenrohranzahlen und eine Doppel-U-Rohr-Sonde berechnet. Hierbei muss noch bemerkt werden, dass die Ringrohrsonde mit 6 Außenrohren die Dimension DN 20 verwendet wurde. Die Ringrohrsonden mit 10 und 12 Außenrohren wurden mit der Dimension DN 16 berechnet. Um vergleichbare Bedingungen herzustellen wurde ein Vorfüllbaustoff mit der Wärmeleitfähigkeit mit 0,8 W/m K für alle berechneten Sonden eingesetzt. Ein sehr wichtiges Konstruktionsmerkmal der Ringrohrsonde ergibt sich aus dem Abstand der Außenrohre von der Bohrlochwand. Um das zu verdeutlichen, wurden hier zwei Varianten für 10 mm (Spalte 2) und für 1 mm (Spalte 3) gegenübergestellt. Es zeigt sich aus den Simulationsergebnissen deutlich, dass es sich sehr lohnt, die Rohre so nah wie möglich an die Bohrlochwand zu platzieren. Für die Auswahl der Anzahl kann festgestellt werden, dass die Steigerung der Rohranzahl von zehn auf zwölf nur eine Verbesserung von < 1 % ergibt. Es ist deshalb sehr sinnvoll, sowohl energetisch, als auch wirtschaftlich mit 10 Außenrohren zu arbeiten. Der Vergleich zu der marktbestimmenden Doppel-U-Rohr-Sonde wird in der Spalte 4 dargestellt. Da dieser Sondentyp keine Anbindung an die Bohrlochwand zulässt, wurde mit einem Abstand der vier Rohre von der Bohrlochwand von 20 mm gerechnet. Ebenso wurde auch der Vorfüllbaustoff mit der Wärmeleitfähigkeit von 0,8 W/m K für die Rechnung benutzt. Mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit wird sich die Leistung auch verbessern. Ein Wärmeentzug, wie der bei der Ringrohrsonde, kann auch bei besseren Leitfähigkeiten nicht erwartet werden. Der große Unterschied beim Leistungsentzug zwischen Ringrohr- und Doppel-U-Rohr-Sonde bestimmt den Effizienzgewinn. Nach Auswertung der Ergebnisse wurde wie oben bereits genannt die Sonderkonstruktion von der Ausgangskonzeption von 12 auf 10 Außenrohre umgestellt. Die Ergebnisse waren Basis für die Neukonstruktion und haben letztlich den Abbruch des Projektes vermieden.

<b>Leistung nach 30 d Dauerbetrieb; Wärmeleitfähigkeit Vorfüllmaterial 0,8 W/mK</b>	<b>RR-Sonde 10mm WA</b>	<b>RR-Sonde 1mm WA</b>	<b>Dp-U-Rohr 20 mm WA</b>
<b>Sondenform</b>	10xDN16+1xDN40	10xDN16+1xDN40	4xDN32
<b>6 Rohre</b>	4,10 kW	4,46 kW	-
<b>10 Rohre</b>	4,41 kW	4,80 kW	-
<b>12 Rohre</b>	4,45 kW	4,84 kW	-
<b>4 Rohre</b>	-	-	3,77 kW

Tabelle 2: Vergleich der Entzugsleistung bei variiertem Außenrohranzahl (100 m Länge)

### 3.4.3 HYDRAULISCHER EINFLUSS DURCH ZIRKULATION

Die Ringrohrsonden gehören, wie die Doppel-U-Rohr-, Einfach-U-Rohr- oder Koaxialsonden, zu den Zirkulationssonden. Die Wärme ist aus dem Erdreich auf die zirkulierende Arbeitsflüssigkeit in der Sonde zu übertragen. Hierzu ist es notwendig, dass diese Arbeitsflüssigkeit, in der Regel ist es ein Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch, mit einem Volumenstrom von ca. 3 l/min zirkuliert werden muss. Auf diesem Volumenstrom sind die Wärmepumpen abgestimmt und kühlen diese Flüssigkeit beim Wärmetzug um ca. 3 K ab. Diese Strömung verursacht Strömungsverluste in den Sondenrohren, die von der Zirkulationspumpe überwunden werden müssen. Die Berechnung der Druckverluste in der Tabelle 3 wurde ebenfalls für eine 100 m lange Sonde für die verschiedenen Varianten durchgeführt. Die Verringerung der Außenrohranzahl wirkt sich natürlich auf die Verluste des Ringrohrs deutlich aus. Sie liegt damit ungefähr 50 % über dem Druckverlust der Doppel-U-Rohr-Sonde. In diesem Zusammenhang kann aber darauf hingewiesen werden, dass die standardmäßig eingebauten Zirkulationspumpen in den Wärmepumpen so dimensioniert sind, dass sie auch diesen höheren Druckverlust ausgleichen. Die Druckverluste für die Einfach-U-Rohr-Sonde sind der Voll-

ständigkei t halber mit angegeben. Dieser Druckverlust ist natürlich ein Nachteil, weil die Pumpen elektrisch angetrieben werden und dafür Fremdenergie eingesetzt werden muss. Im Vergleich der jeweiligen Sonden wird der Verbrauch an elektrischer Arbeit in Kilowattstunden für 2000 Betriebsstunden (das sind die üblichen Betriebsstunden für ein Jahr) mit angegeben. Hieraus ergibt sich, dass die Mehrleistung an elektrischer Energie deutlich von der Mehrleistung an Wärme übertroffen wird. Es ist also sinnvoll, diesen höheren Druckverlust bei den Ringrohrsonden in Kauf zu nehmen.

	<b>RR-Sonde</b> <b>10xDN16+1xDN40</b>	<b>Dp-U-Rohr</b> <b>4xDN32</b>	<b>Einf-U-Rohr</b> <b>2xDN40</b>
<b>Druckverlust in bar</b>	0,270	0,185	0,221
<b>Elektrische Arbeit für Zirkulation in kWh/a</b>	24,4	16,7	20,0
<b>Arbeit für Wärme in kWh/a</b>	9600	7540	n.b.

Tabelle 3: Druckverlust der Zirkulation für verschiedene Sondenformen (100 m Länge)

### 3.5 ENTWICKLUNG UND TECHNOLOGIE DER FERTIGUNG

Grundsätzlich wurde im frühen Projektstadium entschieden, dass die Fertigung parallel ablaufen soll, um eine möglichst effiziente Herstellung der Sonde zu realisieren. Grundsätzlich wurden folgende Arbeitsabschnitte festgelegt:

- Beschichten der Außenleitungen
- Verkleben von Außenleitungen und Gewebeschlauch
- Anschweißen des Sondenfußes und des Sammlers und Aufwickeln auf die Liefertrömmel

Ebenfalls war bereits zu einem frühen Zeitpunkt klar, dass einzelne Arbeitsschritte, die zeitaufwendig aber linear ablaufen, möglichst automatisch ablaufen sollen.

Aus diesem Grund wurde die Fertigungsstrecke mit einer speicherprogrammierten Steuerung (SPS) ausgestattet. Diese ermöglicht durch Ihren modularen Aufbau Änderungen sowohl am Programmablauf, als auch an der Zahl und Ausführung der Schnittstellen. Es zeigte sich früh, dass Änderungen in der Konstruktion auch immer Änderungen in der Fertigung und im Programmablauf verursachen.



Abbildung 35: SPS-System Sabo PLM 700

## Systemaufbau PLM 730

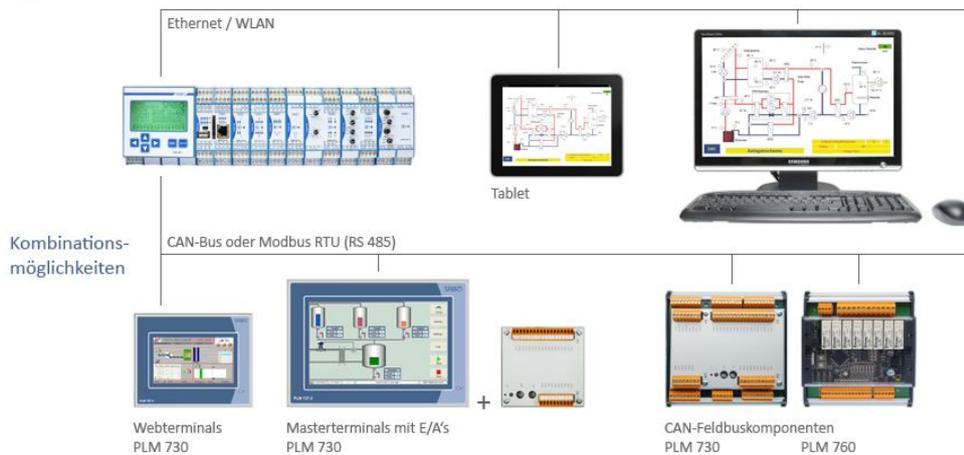


Abbildung 36: Modularer Aufbau des SPS-Systems mit Erweiterungsmöglichkeiten

Die Fertigungsabschnitte „Beschichten der Außenleitungen“ sowie „Anschweißen des Sondenfußes und des Sammlers“ erfordern lediglich die Einrichtung der entsprechenden Maschinen und eine sporadische Aufsicht. Die Arbeitsabläufe an sich sind automatisiert.

Folgende grundlegende Programmfunktionen wurden realisiert:

- Abwickeln des 16 mm PE-Rohrs von der Liefertrommel und Aufwickeln auf eine Zwischentrommel – Dazu wird über einen Drehzahlaufnehmer eine Impulsmessung vorgenommen. Daraus wird die Abrollgeschwindigkeit über den Wickelmotor geregelt und die Länge des umgetrommelten Rohres gemessen. Der parallel beim Abtrommeln ablaufende Beschichtungsvorgang mit Heißkleber benötigt für einen gleichbleibenden Auftragsfilm eine möglichst konstante Geschwindigkeit. Gleichzeitig muss der Heißkleber abkühlen, bevor er beim Wiederauftrommeln übereinandergelegt und belastet werden kann. Hier hat sich eine Umtrommelgeschwindigkeit von 2 Meter pro Minute als praktikabel erwiesen. Ein zusätzliches Abkühlen über eine Wassernebelkühlung kann die Geschwindigkeit für das Umtrommeln nochmals um 50% erhöhen.
- Kleberauftrag – Der Kleberauftrag erfolgt durch Freigabe der Düse durch einen elektrischen Impuls. Hierbei wurde ein einstellbares Intervall mit frei einstellbaren Auftrags- und Pausenzeiten realisiert, um die benötigte Klebstoffmenge zu optimieren.
- Wickelführung und Kontrolle der Lagen – Je nach Aufwickelgeschwindigkeit wird die PE-Rohrleitung entsprechend der Wicklungszahl und der Lagen auf den Trommelkern geführt.
- Aufheizen des Schweißspiegels – Das Aufheizen des Schweißspiegels erfolgt über vier Heizelemente mit jeweils 250W. Die Temperatur wird über 2 Fühler gemessen und in einem Bereich von +/-5K um den Sollwert gehalten.
- Linearbewegung des Schweißspiegels und Verriegelung von beweglichen Anlagenteilen – Der Vorschub des Schweißspiegels wird mit einem Schrittmotor realisiert. Dieser kann präzise verschiedene Geschwindigkeiten und Wegstrecken realisieren.
- Ansteuerung des Hydraulikaggregates – Die Ansteuerung der hydraulischen Wickelvorrichtung erfolgt über die Freigabe eines Magnetventils.

### 3.5.1 HERSTELLEN DES SONDENFUßES

Der Sondenfuß bzw. der Sammler bestehen aus einem aus Polyethylen 100 gefertigtem Drehteil mit einem Außendurchmesser von 90 mm, welches im Falle des Sondenfußes am

unteren Ende für die Umlenkung und Zusammenfassung der Strömung von den Außenrohren in das Zentralrohr sorgt.

Der Sammler hingegen dient dem Aufsplitten des Volumenstroms, des von der Wärmepumpe kommenden Zentralrohrs auf die Außenrohre im oberen Teil der Sonde. Hierfür wird die Sonde in entsprechenden Standardlängen oder nach Kundenwunsch produziert. Es existiert jedoch auch die Möglichkeit, die Sonde vor Ort z. B. mit Elektroschweißverbindungen an die Einbaubedingungen anzupassen.

#### 3.5.1.1 SCHWEIßVERBINDUNG

Die Bearbeitung von Polyethylen erfolgt in der Regel im Spritzgussverfahren. Aus Kostengründen wurden die Körper für den Sondenfuß durch mechanische Bearbeitung hergestellt. Unter dem Punkt 3.2.2 wurde die Konstruktion und die Entwicklung bereits beschrieben. In diesem Abschnitt soll deshalb nur auf die letzte Variante der Herstellung eingegangen werden. Der herzustellende Sondenfuß besteht aus dem Körper, der mit den 10 Außenrohren und dem Zentralrohr verbunden werden muss (s. Anlage 6).



Abbildung 37: Sondenfuß mit 10 Außenrohren

Weiter wurde in dieser Konstruktion die Aufhängung für das Schwerstück und die Befestigung für den Gewebeschlauch verbessert bzw. mit berücksichtigt. Die Variante vereinfacht den technologischen Prozess bei dem Verbinden der Rohre mit dem Körper. Sie erfordert aber eine hohe Präzision bei der Ausführung. Um das zu beherrschen, wurde die Schweißvorrichtung über eine Programmsteuerung bedient, die in der Lage ist, die Aufwärm- und Fügezeiten reproduzierbar einzuhalten. Ursprünglich wurde versucht, sowohl die Außenrohre, als auch das Zentralrohr mit der Schweißvorrichtung zu fügen. Allerdings hätte das eine zweiteilige und klappbare Schweißzange vorausgesetzt. Hier war die mechanische Genauigkeit vor allem durch die hohe Belastung mit einer Kraft von ca. bis zu 2000N zum Fügen der Sondenteile nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass in das Fußstück und auch den Sammler zunächst jeweils ein kurzes 42mm PE-Rohrstück per Handschweißung eingeschweißt wird. Hier wird dann nach dem Fügen der Außenrohre das entsprechende Zentralrohr über eine Elektroschweißmuffe angebunden. Hierdurch konnte der Konstruktionsaufwand verringert und die Reproduzierbarkeit der Schweißungen deutlich erhöht werden.

#### 3.5.1.2 SCHWEIßVORRICHTUNG

Beide Teile, der Sondenfuß und auch der Sammler, werden in der gleichen Vorrichtung geschweißt. Dabei geht es bei der Endvariante ausschließlich um den Einschweißvorgang der Außenrohre in den Sammler/Fuß. Folgende Problemstellung lag vor:

- Es gibt keine bekannte Normung für das Verschweißen von unterschiedlichen Durchmessern und Wandstärken. Es existieren lediglich Richtwerte.
- Das Einschweißen der Außenrohre in das entsprechende Drehteil muss aufgrund der Platzverhältnisse und der Produktivität simultan erfolgen.
- Es müssen unterschiedliche Aufwärm- und Fügezeiten eingehalten werden.
- Der erforderliche Kraftaufwand ist höher als bei der üblichen Handverschweißung mit Schweißspiegel und im Regelfall nur einer Schweißstelle.

Die vorgenannten Gründe erforderten eine die Handschweißung unterstützende Mechanik. Dazu wurde zunächst eine Schweißvorrichtung mit einer manuell zu bedienenden Spindel konstruiert. Diese war auf Rollen verfahrbar, um sie später für das reine Aufwickeln aus dem Wickelstrang wieder entfernen zu können.

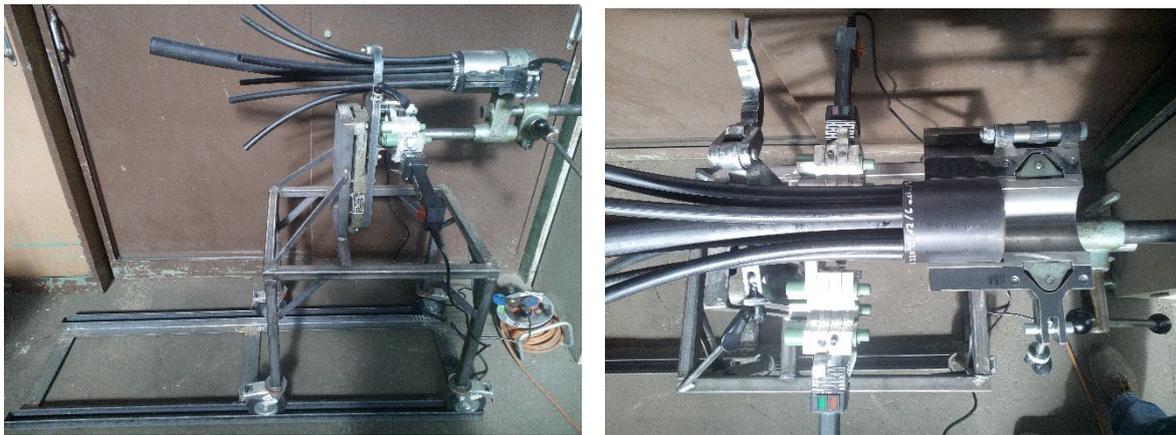


Abbildung 38: Schweißvorrichtung (erste Version); rechts: Detailaufnahme

Nachfolgend im Detail die Spannvorrichtung mit den Zentrier- bzw. Ausrichtungshilfen für die Außenrohre. Hier noch als 6+6 Version (jeweils sechs Außenrohre auf zwei Ebenen)



Abbildung 39: Detailaufnahme der Spannvorrichtung / Zentrierstifte zur Überprüfung bzw. Ausrichtung der Rohre zum Kunststoffblock

Die Funktionsweise:

Die Außenrohre bzw. das Zentralrohr wird auf eine Länge gebracht und in einer Klemmvorrichtung nach der entsprechenden Ausrichtung zum Drehteil von Klemmelementen und einem schellenartigen Bügel gehalten. Das Drehteil ist in einer zweiteilig aufklappbaren

Klemmhülse gehalten. Alle Klemmteile wurden aus lasergeschnittenen Stahlblechen bzw. Dreh- und Frästeilen hergestellt.

Der Spindelvorschub ist ein handelsübliches Fertigteil (analog einem Bohrständer). Zum Aufwärmen von Block und Außenrohren wird ein beheizter und ebenfalls zweiteilig aufklappbarer Aluminiumblock genutzt. Dieser wird durch zwei Rohrheizelemente aufgewärmt. Die Regelung erfolgte bei dieser frühen Version über einfache Thermostatelemente.

Das Aufwärmen selbst erfolgt in auf den Rohrdurchmesser genormten Heizdornen und Muffen. Diese wurden jedoch entsprechend der geforderten Abstände durch Drehen und Fräsen bearbeitet und an den Aluminiumblock und den geforderten Lochkreis angepasst. Die Zeitmessung erfolgte über eine Stoppuhr.

Zunächst wurde der Sondenfuß bzw. der Sammler gegen den aufgeheizten Aluminiumblock mit der Dornenseite geschoben und die Heizdorne synchron in den Fuß/Sammler eingeschoben. Nach einer empirisch ermittelten Wartezeit wurde der Fuß/Sammler mit dem Heizblock weiter in Richtung der geklemmten Rohre verschoben und die Rohre ebenfalls synchron in die Heizmuffen geschoben. Nach Ablauf einer Gesamtaufheizzeit wurde der Komplex wieder auseinander gefahren. Die Rohre und der Fuß/Sammler vom Heizblock getrennt, der Heizblock aufgeklappt und nach unten aus der Verfahrstrecke entfernt und die zu schweißenden Teile wieder zusammengefahren und nach der Abkühlzeit ausgedehnt und begutachtet.

Die ersten Schweißversuche ergaben, dass ein Verschweißen generell möglich ist, jedoch die geforderte Reproduzierbarkeit und gleichbleibende Schweißqualität durch die vielen manuellen Schritte und Unwägbarkeiten nicht erreicht werden kann.

Da sich zwischenzeitlich auch die Gesamtkonstruktion für den Sondenfuß mit einer Reduzierung von 2x6 Außenrohre mit 2 Ebenen auf 1x10 Außenrohre auf nur noch einer Ebene geändert hatte, wurde die Schweißvorrichtung neu konstruiert und durch einen elektrischen Antrieb über einen Schrittmotor, zusätzliche Endlagenschalter sowie ein vollelektronisches Aufheiz- und Ablaufprogramm erweitert. Auch der alte vollgeschweißte Rahmen wurde durch einen variableren und leichteren Aluminiumprofilrahmen ersetzt.



Abbildung 40: Schweißvorrichtung (Finalversion); rechts: Detailaufnahme

Mit dieser Vorrichtung lassen sich alle Fertigungsschritte der ersten Version in einer adäquaten Qualität ausführen. Lediglich das Einspannen, Ausrichten und Wiederausspannen der Sonde muss von Hand erfolgen. Die Qualität ist durch Erreichen einer höheren Geschwindigkeit und Präzision in den Verfahrenswegen deutlich höher als bei der manuellen Variante. Das Einschweißen des Zentralrohrs sollte anfänglich ebenfalls mit der Schweißvorrichtung erfolgen. Allerdings wurde diese Variante wieder fallengelassen, da die benötigte zweiteilige Ausführung des Schweißspiegels für die Außenrohre die benötigte Präzision nicht besaß. So wurde entschieden, ein bereits zentral angedrehtes oder eingeschweißtes Rohrstück mit einer handelsüblichen Elektroschweißmuffe an das Zentralrohr anzubinden. Der benötigte Aufwand ist hierbei deutlich geringer.

Die programmgesteuerte Schweißvorrichtung wird nur für die dünnwandigen DN16 Rohre eingesetzt. Ein 100 mm langes Zentralrohrstück wird vorher manuell in den Fuß eingeschweißt. An dieses Rohrstück wird mit einer Elektroschweißmuffe das lange Zentralrohr angebunden (s. Anlage 5). Auf die Verschweißung mit der Elektroschweißmuffe DN40 wird nicht näher eingegangen, da er Stand der Technik ist und in einem erprobten halbautomatischen Vorgang abläuft.

Grundlegender Programmablauf:

1. Fahren aus der Ruheposition bis an die Heizdorne – Geschwindigkeit: mittel
2. Einfahren in die Dorne / Schweißspiegel ist verriegelt – Geschwindigkeit: langsam
3. (Teil-)Wartezeit für das Aufheizen des Sondenfußes/Sammlers (ca. 6s) – Geschwindigkeit: 0
4. Lösen der Verriegelung / Schieben des Schweißspiegels mit dem Fuß/Sammler bis an die 16mm PE-Rohre – Geschwindigkeit: mittel
5. Aufschieben der Heizmuffen auf die PE-Rohre – Geschwindigkeit: langsam
6. Wartezeit für das Aufheizen der 16mm PE-Rohre – Geschwindigkeit: 0
7. Auseinanderfahren bis Ruheposition, Ausfahren der 16 mm PE-Rohre aus den Muffen, Verriegeln der Schweißzange in Mittelposition, Ausfahren der Heizdorne aus dem Sondenfuß/Sammler – Geschwindigkeit: sehr hoch
8. Manuelles Hochklappen der Schweißzange, dann Freigabe für weiteren Programmablauf
9. Fahren bis an die 16mm PE-Rohre – Geschwindigkeit: sehr hoch
10. Einschieben der 16mm PE-Rohre (warm) in den Sondenfuß/Sammler (warm) – Geschwindigkeit: gering
11. Ruhen in Endposition bis Abkühlzeit erreicht, danach optische Signalisierung und manuelles Ausspannen

### 3.5.2 KLEBSTOFFAUSWAHL UND KLEBERBESCHICHTUNG

Die Klebstoffauswahl erfolgte zusammen und in Absprache mit dem Hersteller Bühnen Klebetechnik. Von diesem wurden mehrere Heißklebstoffe als Muster zur Verfügung gestellt und die Klebefähigkeit mechanisch und der Klebeauftrag optisch begutachtet. Hierzu wurden mehrere Vorversuche vorgenommen. Dabei wurden Einfach- und Doppelauftrag als Raupenauftrag sowie der Filmauftrag untersucht.



Abbildung 41: Klebstoffauftragseinheit / Manueller Auftragsversuch



Abbildung 42: Rohrmuster mit Kleberauftrag / Manuelles Verkleben durch Wiederverflüssigung des Klebers mittels Wärmeeintrag



Abbildung 43: Begutachtung der Klebestelle / Versuch des Manuellen Lösens der Verklebung

Hierbei stellt der Filmauftrag die ökonomischste und konstruktiv beste Möglichkeit des Kleberauftrags dar, denn es wird weniger Klebstoff verbraucht, gleichzeitig aber eine größere Rohroberfläche mit Kleber beschichtet. Dies ermöglicht bei leichten Abweichungen der Ausrichtung der Rohre von der Sondengeometrie, dass diese trotzdem beim Wiedererwärmen

sicher mit dem Gewebeslauch verbunden werden können. Es wird eine Beschichtung des Rohrs von mindestens 120° bis teilweise >180° erreicht.

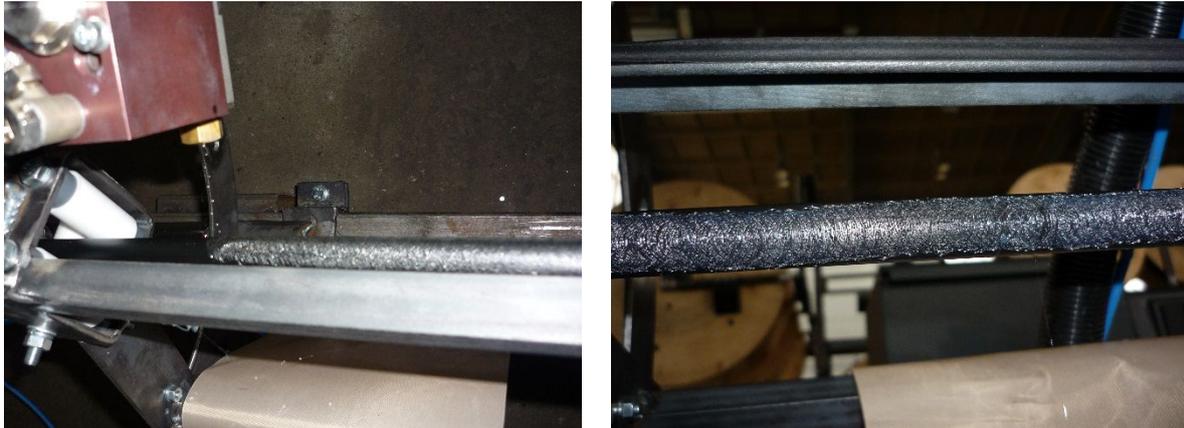


Abbildung 44: Filmauftrag (Vorgang) / fertiger Klebstoffauftrag

### 3.5.2.1 VORRICHTUNGSBAU FÜR BESCHICHTUNGSEINHEIT

Die Beschichtungsstrecke besteht aus einem Abwickelblock, auf den das vom Hersteller gelieferte 16mm PE-Rohr von der entsprechenden Liefertrommel abgewickelt wird. Das Rohr wird dann in einer Schiene geführt und durchläuft einen Längenaufnehmer. Dieser misst die Geschwindigkeit und die abgewickelte Länge. Entsprechende Geschwindigkeiten und benötigte Rohrlängen können an der SPS eingegeben werden und ermöglichen die automatische Abhängung, eine konstante Zuggeschwindigkeit für einen gleichmäßigen Kleberauftrag und eine gleichmäßig geführte Wiederaufwicklung auf die Zwischentransporttrommeln.

Das Rohr durchläuft dann die drehbare Auftragsvorrichtung, wo es durch jeweils eine Lünette am Eingang und am Ausgang geführt und in konstantem Abstand zum Auftragskopf gehalten wird. Der Auftragskopf wird von einem Auftragsgerät der Firma Bühnen mit Klebstoff versorgt. Dieser wird mit konstanter Temperatur vom Schmelzbad über einen beheizten Schlauch bis zum ebenfalls beheizten Auftragskopf transportiert und mit Hilfe von Druckluft in einem einstellbaren Sprühbild versprüht und auf das Rohr aufgetragen. Es besteht hier die Möglichkeit, ohne Nachjustierung in festen Winkeln von 36° aus jedem benötigten Winkel das Rohr zu beschichten. Nach erfolgter Beschichtung wird der Kleber durch einen Wassersprühaufrag gekühlt und nach Durchlaufen einer weiteren Führungsschiene auf einer Zwischentransporttrommel aufgewickelt. Der Antrieb des Wickelmotors und der Horizontalführung erfolgt elektrisch und geschwindigkeitsabhängig.

Nach dem Beschichtungsvorgang werden die abgehängten Rohre zum nächsten Fertigungsabschnitt gebracht bzw. zwischengelagert.

### 3.5.2.2 VORRICHTUNGSBAU FÜR AUßENROHRTROMMELN MIT VERDRILLUNGSFREIEM AB-LAUF

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten die Außenrohre zu beschichten. Da der Kleber immer in Richtung des Gewebesacks positioniert sein muss, muss der Kleber bei z.B. 10 Außenrohren mit jeweils 36° geändertem Winkel von Rohr zu Rohr an den runden Gewebesack geführt werden, um die Außenrohre gleichmäßig über den Umfang des Bohrloches zu verteilen. Dazu muss bei gleicher Wickelrichtung das Rohr in unterschiedlichen Bereichen beschichtet werden. Es wird also eine variable Beschichtungseinheit benötigt. Wenn die Beschichtungseinheit hingegen fix ist, so müssen das Rohr selbst bzw. die Trommeln mit dem Rohr in verschiedenen Winkeln positionierbar sein. Hier war außerdem die Frage zu stellen,

ob auf der Innenseite oder auf der Außenseite der Wicklung der Kleber aufgetragen werden sollte.

Zunächst wurden die feste Beschichtung auf der Wicklungsaußenseite und das Positionieren der Trommeln in unterschiedlichen Winkeln probiert. Dabei zeigte sich, dass durch die unterschiedlichen Winkel das Rohr auf dem Kern immer wieder verrutschte und es dadurch zu Spannungen und Verdrillungen im Rohr kam. Dies führte dazu, dass die beschichtete Rohrseite immer wieder aus der gewünschten Winkelposition geriet.

Bei den weiteren Versuchen wurde dann das Rohr in seiner Lage belassen und stattdessen die Beschichtungsvorrichtung in 10 festen Positionen drehbar angeordnet. Hierbei ist der Zeitaufwand für das Einrichten der Beschichtungsstrecke zwar etwas höher. Allerdings bleibt das Rohr auf dem Trommelkern gerade und kann sich nicht verschieben oder überwerfen.



Abbildung 45: sternförmige Anordnung der Trommeln

In einem weiteren Schritt erfolgte nun die Anordnung der Trommeln in einem festen Winkel. Dadurch wurde die Lage beim Abrollen nicht verändert und die Beschichtungsseite zeigte geringere Winkelabweichungen an der Verklebungsvorrichtung.



Abbildung 46: parallele Anordnung der Trommeln



Abbildung 47: Beschichtungseinheit mit fester Einstellung



Abbildung 48: Beschichtungseinheit mit 10 einstellbaren Winkeln von jeweils  $36^\circ$  über den Umfang der Außenrohre

### 3.5.2.3 TECHNOLOGISCHER ABLAUF FÜR DIE VERKLEBUNG

Im Vorfeld der Konstruktion wurden mehrere Möglichkeiten ins Auge gefasst, den Gewebesack mit den Außenrohren zu verbinden. Vor allem der hohe fertigungstechnische Aufwand zwang dazu, von manuellen Befestigungen z.B. durch Klammern oder Taschen bzw. doppelwandiges Gewebe Abstand zu nehmen und eine effizientere Lösung zu suchen. Vor allem im industriellen Umfeld kommen in letzter Zeit immer häufiger klebetechnische Verfahren zum Einsatz. Diese Verfahren sind erprobt und flexibel einsetzbar und von den

entsprechenden Herstellern steht ein breites Produktprogramm mit entsprechenden Klebstoffen für eine Vielfalt an Einsatzbedingungen und unterschiedlichen Materialien bereit.

Mit dem Hersteller Bühnen Klebesysteme konnte ein Partner gewonnen werden, der engagiert an einer klebetechnischen Systemlösung mitgearbeitet hat. Um die Außenrohre aus PE100-Material mit dem PP-Gewebesack zu verbinden, sollte ein Schmelzklebstoff eingesetzt werden. Denn nur so besteht die Möglichkeit, die Außenrohre vorab zu beschichten und nach Erkalten des Klebefilms die Rohre zum nächsten Fertigungsschritt zu befördern und dort den Kleber durch Wiederanwärmen zu reaktivieren.

Der ausgewählte Klebstoff kann mit Temperaturen von etwa 90°C bis 150°C verarbeitet werden. So erfolgt der Auftrag des Klebefilms für eine optimale Verteilung auf dem Rohr bei einer Temperatur von etwa 145°C. Das Wiedererwärmen und Verbinden mit dem Gewebesack jedoch nur bei etwa 110°C, da der Gewebesack bei Temperaturen >125°C seine Struktur verliert und schmilzt bzw. sich zusammenzieht.

Auch beim Klebeauftrag wurden mehrere Varianten ausprobiert. Anfänglich wurde ein Raupenauftrag favorisiert, jedoch erfordert dieser eine exakte Ausrichtung der Trommeln beim nächsten Fertigungsschritt und es traten Fehlstellen auf, in denen der Bereich mit dem Kleber nicht wiedererwärmt wurde und dadurch das Rohr auch nicht fixiert wurde. Nach Auswechseln der Raupen-Auftragsdüse gegen eine Filmauftragsdüse konnte nun ein deutlich größerer Bereich des Rohrumfangs zwischen 120° - 180° beschichtet werden, so dass eine sichere Verklebung in jedem Fall gewährleistet werden kann.

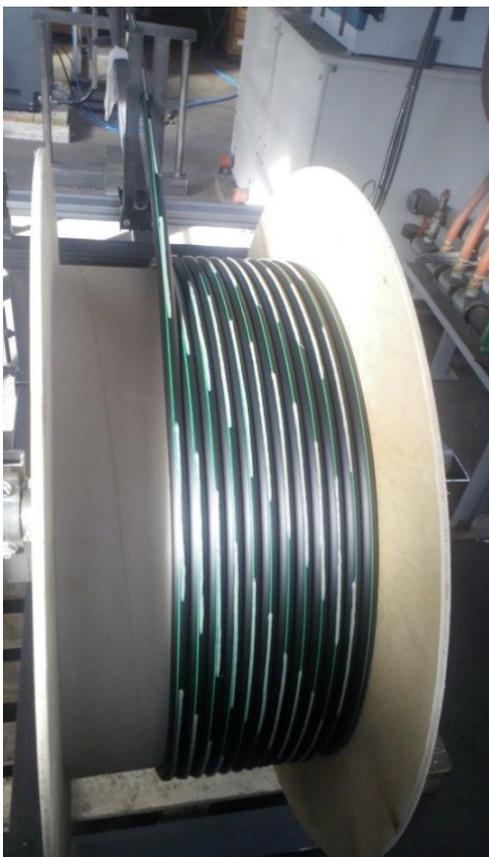


Abbildung 49: Klebeauftrag (links: Raupenauftrag ; rechts: Filmauftrag)

Dabei wird die Auftragsvorrichtung entsprechend des benötigten Winkels gedreht. Die Lage der Trommel kann so gleich bleiben und es treten keine Lageänderungen beim Wiederabwickeln auf.

### 3.5.2.4 PROGRAMMIERUNG DES KLEBEAUFTRAGES UND DES –VORGANGES

Für den Kleberauftrag ist vor allem eine gleichbleibende Wickelgeschwindigkeit an der ziehenden Trommel nötig. Dies wird durch Abnehmen der aktuellen Geschwindigkeit über einen Drehimpulsaufnehmer und Nachführen der Geschwindigkeit über den Stromregler des Gleichstrom-Wickelmotors erreicht. Gleichzeitig wird die Länge des beschichteten Rohr gemessen und der Wickelvorgang nach Erreichen der Solllänge gestoppt.

### 3.5.3 HERSTELLUNG DER ANBINDUNG VON AUßENROHR UND SCHLAUCH

Für die Verbindung von Außenrohren und Gewebesack wurde eine weitere Fertigungsstrecke konstruiert. Diese besteht aus einer verdrillungsfreien Anordnung der Zwischentransporttrommeln für die einzelnen 16mm Rohrleitungen nach Abbildung 42. Von dort wird das Rohr über ein Stahlrohr geführt auf dem in einzelnen koaxial angeordneten Kanälen die Rohre bis zur Heizvorrichtung geführt werden. In dem Rohr werden ebenso parallel das 42mm PE-Innenrohr, sowie eine 25mm PE-Leitung als spätere Verfüllleitung für den Verfüllbaustoff mitgeführt. Diese müssen nicht nach außengeführt werden, da sie nicht vom Klebevorgang betroffen sind.



Abbildung 50: Koaxialrohr mit durchgeführten 16 mm PE-Rohren / auf das Außenrohr aufgefädelter PP-Schlauch

Auf das äußere Rohr wird der PP-Schlauch aufgefädelt. Auf die vorhandenen 6m Rohrlänge lassen sich bis zu 150m Gewebesack problemlos auffädeln und zusammen schieben (raffen). Von hier werden die Rohre über eine Andruckvorrichtung zusammen mit dem Gewebesack mechanisch an entsprechend der Geometrie umliegend angeordnete Heizelemente gepresst



Abbildung 51: Mechanische Andruckvorrichtung mit Heizelementen zum Wiederaufheizen und Verkleben von Außenrohren und Gewebesack

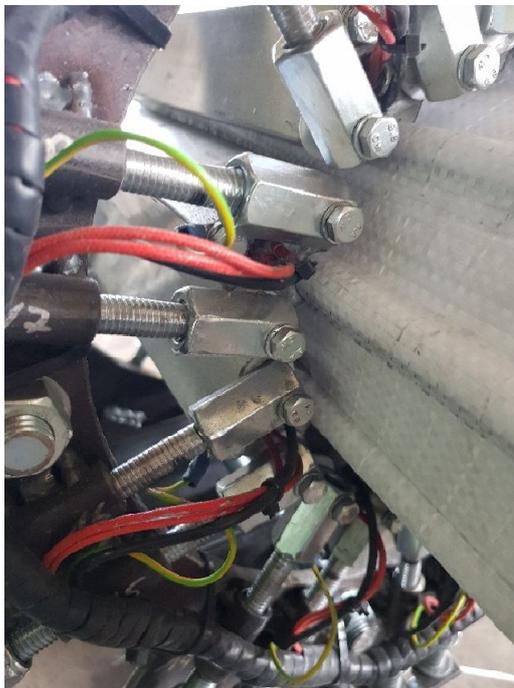


Abbildung 52: Aufheizvorrichtung (Detailaufnahme / Heizelemente mit Führungsnuten)

Die Aufheizvorrichtung besteht aus kreisförmig angeordneten Heizelementen die an verstellbaren und federbelasteten Führungsbolzen befestigt sind. Jedes Heizelement besteht aus einem Aluminiumblock, in den eine 16mm Nut zur Führung eines Außenrohrs, sowie zwei Bohrungen zur Befestigung und zwei weiteren Bohrungen zur Aufnahme eines 250W-Heizelements und eines Temperaturfühlers. Jedes Heizelement kann so separat gesteuert

und eingestellt werden. Der Gewebesack wird durch die Vorrichtung gezogen und durch den Gewebesack wird die Kleberschicht aus dem, darunter geführten PE-Rohr wieder aufgeschmolzen und dieses mit dem Gewebesack verklebt. Der Vortrieb erfolgt durch die hydraulische Wickleinrichtung, wobei das erste Stück des Sacks noch manuell geführt werden muss. Nach dem Verkleben des ersten Teilbereichs und dem Aufschweißen des Sondenfußes kann das Rohrbündel an der Zugvorrichtung angebunden werden. Es können Längen bis 150 m verklebt werden. Das Auffädeln des Sacks auf das Trägerrohr muss vor dem Einführen der Rohre vorgenommen werden.

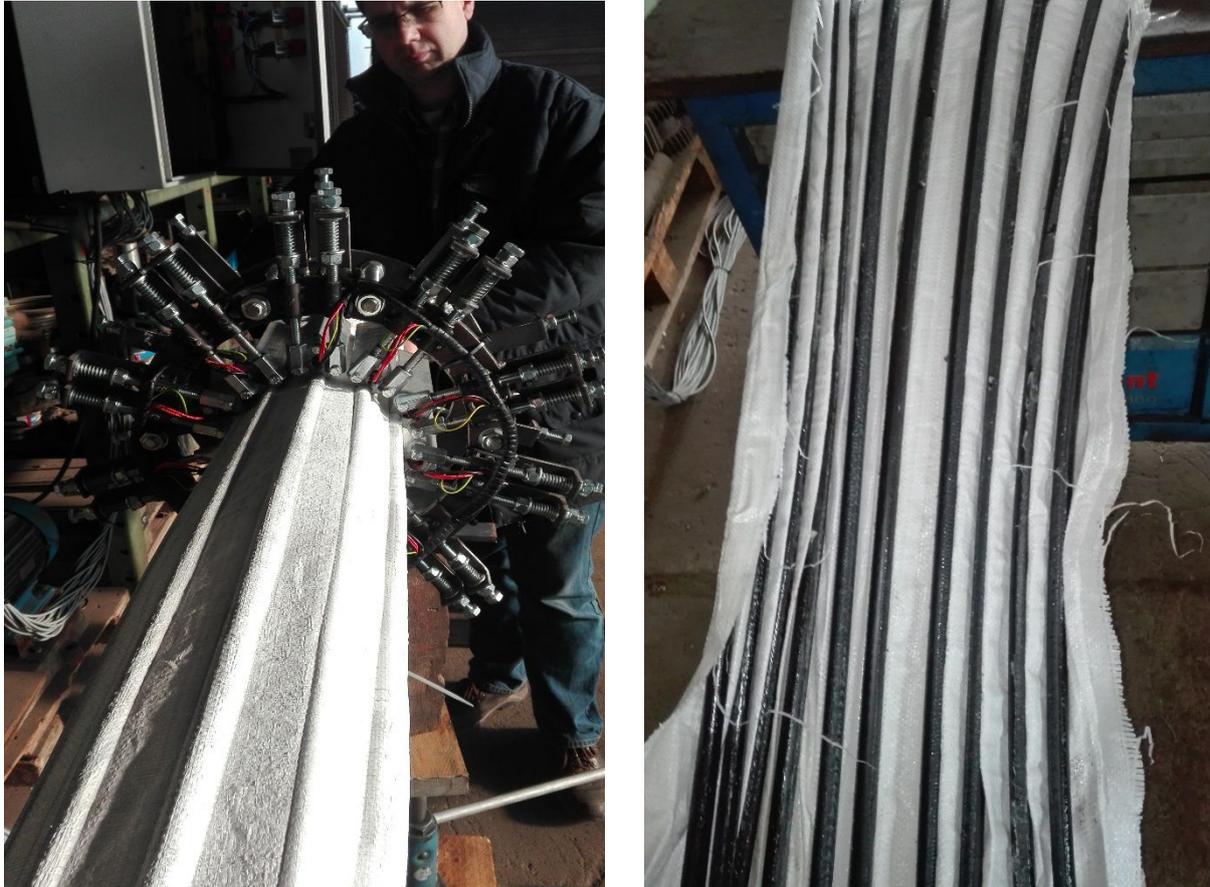


Abbildung 53: Während des Klebevorgangs / Qualitätskontrolle an einem aufgeschnittenen Probe-  
stück

### 3.5.3.1 VORRICHTUNGSBAU DER WICKELEINHEIT MIT HYDRAULISCHEM ANTRIEB

Nach dem Anschweißen des Sammlers wird die Sonde entsprechend der Einbaurichtung aufgewickelt, so dass der Sondenfuß zum Schluss angeschweißt wird und sich das Fußstück als erster Teil der Sonde beim Abwickeln auf der Trommel befindet.

Das Aufwickeln der Sonde wird auf Leihtrommeln vorgenommen, die nach dem Einbau vor Ort wieder in eine transportoptimierte Ausführung zerlegt werden und an den Lieferanten zurückgegeben werden können.

Die Aufwickelvorrichtung arbeitet hydraulisch und wurde ebenfalls eigens hierfür konstruiert. Die Wickleinheit kann von der Zentralsteuerung ein und nach dem Aufwickeln wieder abgeschaltet werden. Die Regelung der Zuggeschwindigkeit wird an der Maschine selbst geregelt.



Abbildung 54: Aufwickel- und Transportvorrichtung (hydraulisch)

### 3.6 SONDENZUBEHÖR (SCHWERSTÜCK, RÜCKSCHLAGVENTIL, ...)

Der Einbau von Erdwärmesonden erfolgt entweder mit einer Schubstange angetrieben von der Bohranlage oder mit Schwerstücken. Der Einbau mit Schubstangen scheidet durch die besondere Konstruktion mit dem Gewebeslauch aus. Für die Ringrohrsonden kommt nur der Einbau mit Schwerstücken in Betracht, die am Sondenfuß angebracht werden müssen. Das Schwerstück muss so dimensioniert werden, dass die Sonde ohne zusätzliche Schubkraft in das Bohrloch eingebaut werden kann. Für eine 100 m Sonde wird mit einem Ballastgewicht von mehr als 50 Kilo gerechnet. Das Schwerstück am Sondenfuß wird in das Schutzrohr integriert, das den Gewebesack an dem größten Durchmesser der Sonde schützt. Dieses kurze Schutzrohr ragt über den Sondenfuß nach oben und unten hinaus. Der Überstand unterhalb dient gleichzeitig zur Befestigung des Schwerstückes. Diese Anordnung wird benutzt, wenn die Ringrohrsonde in ein Bohrloch ohne Schutzverrohrung eingebaut wird.

Bei Bohrlochverhältnissen, die eine Schutzverrohrung über die gesamte Länge der Bohrung erfordern, kann auf das kurze Schutzrohr Sondenfuß verzichtet werden. In dem Fall wird das Schwerstück ohne die Befestigung über das kurze Schutzrohr direkt an dem Sondenfuß befestigt. Die Schutzverrohrung im Bohrloch erfordert deshalb nur einen lichten Mindestdurchmesser von 94 mm.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Ringrohrsonde wurde zusätzlich ein besonderer Sondenfuß konstruiert und gebaut, in dem ein Rückschlagventil integriert ist. Mit diesem Sondenfuß wird das Ziel verfolgt, die Verfüllung über das Zentralrohr durchzuführen. Dieses Rückschlagventil ermöglicht deshalb auf die Verfüllleitung zu verzichten. Die Auffüllung des Gewebeslauches und die Verfüllung des Bohrloches erfolgt direkt über das Rückschlagventil, das mit dem Zentralrohr verbunden ist. Beim Einpumpen öffnet das Rückschlagventil den Weg in den Raum des Gewebeslauches und damit in die Bohrung. Es verhindert durch den höheren hydrostatischen Druck im Bohrloch ein Zurückfließen in die Sondenleitungen und schließt diesen Strömungsweg. Für den Einsatz wurde ein federbelastetes Ballventil gewählt, das für diesen Druckbereich ausgelegt und geeignet ist. Nach dem Aushärten des Verfüllmaterials wird das Ventil in dieser Position fixiert. In dem Anhang ?? ist der technologische Ablauf unter Verwendung des Rückschlagventils am Sondenfuß dargestellt. Diese Variante hat nicht nur den Vorteil der eingesparten Verfüllleitung, sondern es wird auch die Bohrung vom tiefsten Punkt verfüllt. Die qualitätsgerechte Verfüllung wird da-

mit unverzichtbarer Teil des Sondenbaus und kann nicht durch Störungen im Verfüllprozess weggelassen werden. Weiterhin erfolgt die Verfüllung über ein Rohr der Dimension DN 40, so dass Verstopfungen ausgeschlossen sind. Die Technologie wird gegenwärtig noch nicht bei dem Bau von Erdwärmesonden angewandt. Sie ist aber bei der Tiefbohrtechnik eine anerkannte und gut erprobte Technologie, die in der Regel bei Rohrzementationen eingesetzt wird. Die Bearbeiter haben durch ihre langjährigen Erfahrungen (seit 1960) bei der Bohrlochzementierung in Tiefbohrungen eine große Fachkunde. Mit einer qualitätsgerechten Verfüllung werden die Bohrungen so verfüllt, dass die Abdichtung der Grundwasserleiter zuverlässig erfolgt und die Wässer unterschiedlicher Qualität fachgerecht voneinander getrennt werden können. Der Vorwurf der Wasserbehörden, dass die Erdwärmesonden die Grundwasserleiter beschädigen wäre damit entkräftet und die Erdwärmegewinnung könnte von dieser Einschränkung befreit werden.

### 3.7. BOHRTECHNISCHE BEDINGUNGEN DER RINGROHRSONDE

Bei der Entwicklung der Ringrohrsonde wurde darauf geachtet, dass für sie keine besonderen Anforderungen an die Bohrung gestellt werden müssen. Das soll dazu beitragen, die Marktakzeptanz für das neue und fremde Produkt zu erreichen.

In der Regel werden die Bohrungen für die Erdwärmesonden im Spülbohrverfahren hergestellt. Für die Ringrohrsonden kann die Bohrung einen Durchmesser von maximal 190 mm aufweisen. Mit dem maximalen Durchmesser der Sonde von 101 mm am Schwerstück ist der Mindestdurchmesser vorgegeben. Für die Bohrung wird ein Mindestdurchmesser von ca. 120 mm empfohlen.

#### 3.7.1 HYDRAULISCHE BEANSPRUCHUNGEN DER SONDE IM BOHRLOCH

Auf die hydraulischen Bedingungen für die Zirkulation des Arbeitsmittels (Wasser-Frostschutzmittelgemisch) wurde bereits im Abschnitt 3.4.3. eingegangen. In dem vorliegenden Abschnitt soll auf die besonderen Bedingungen der Ringrohrsonde im Zusammenhang mit den Bohrlochbedingungen eingegangen werden. Beim Abteufen der Bohrung ist dafür zu sorgen, dass das gesamte Bohrloch bis an die Oberfläche mit Spülung gefüllt ist. Insbesondere ist das vor dem Einbau der Sonde wünschenswert. Damit ist die Gewissheit gegeben, dass kein Spülungsverlust vorhanden ist und die Bohrlochwand von der Spülungssäule gestützt wird. Das ist der Idealfall, der nicht immer erwartet werden kann. Bei sehr niedrigem Grundwasserniveau und einem sehr durchlässigen Gebirge (bis hin zu kavernösem Gestein) muss auch mit einem teilweise gefüllten Bohrloch vor dem Einbau der Ringrohrsonde gerechnet werden. In diesem Fall kann der Einbau der Ringrohrsonde besonders in dem oberen luftegefüllten Abschnitt eine vollständige Verfüllung der Bohrung gewährleisten. Der Gewebeschauch übernimmt jetzt auch die Funktion, unkontrollierte Spülungsverluste und Verluste der Verfüllsuspension in das Gebirge zu vermeiden. Die Verfüllung wird, wie bereits mehrfach erwähnt, über eine Verfüllleitung innerhalb des Gewebeschauchs von unten nach oben durchgeführt. Dabei wird die Spülung mit einer geringeren Dichte von der Suspension mit einer deutlich höheren Dichte verdrängt. Es ist deshalb Grundvoraussetzung, dass dieser Normalfall des Dichteunterschiedes auch zutrifft. Die Verdrängung der Spülung erfolgt ohne direkten Kontakt mit der Verfüllsuspension. Das verhindert die sonst bekannten Mischzonen zwischen Spülung und Verfüllbaustoff, sichert die unbeeinflusste Qualität des Verfüllbaustoffes und reduziert die Menge des Verfüllmaterials durch den Wegfall der Auszirkulation der Mischzone und nicht auftretenden Verlustmengen. Diese Verlustmengen sind häufig erheblich und stellen einen wirtschaftlichen und auch technologischen Aufwand bei dem Bau von Erdwärmesonden dar. Für die Verfüllung im Bohrloch wurde ein Gewebeschauch ausgewählt, der einer Innendruckbelastung ohne Abstützung an der Bohrlochwand bis zu einem Druck von circa 1 bar widersteht. Dieser Druck wurde in Technikumsversuchen gemessen und kann als grober Richtwert genommen werden.



Abbildung 55: Versuchsanordnung für die Bruchlastbestimmung des Gewebeslauches gegen Innendruck



Abbildung 56: Überlagerungsdruckmessung für den Eignungstest des Gewebeslauches



Abbildung 57: Maximale Innendruckbelastung während des Versuches auf den Gewebeslauches



Abbildung 58: Ausbau des geborstenen Gewebeschauches nach dem Versuch

Mit dieser Innendruckbelastbarkeit ist es notwendig, dass das Bohrloch den maximalen Durchmesser von 190 mm nicht überschreitet und der Gewebeschauch zügig und ohne Unterbrechung aufgefüllt wird. Es muss sichergestellt werden, dass sich der Gewebeschauch an der Bohrlochwand bewegt und die hydrostatische Druckbelastung vollständig von der Bohrlochwand aufgenommen wird. Um geringe Durchmesserergrößerungen auszugleichen, wurde ein Gewebeschauch ausgewählt, der geringfügig Suspension durchlässt und so eine formschlüssige Verbindung mit der Bohrlochwand herstellen kann. Für artesischen Brunnen gelten die üblichen Sicherheitsvorkehrungen wie auch für die konventionellen Erdwärmesonden. Auch hier ist es notwendig, vor dem Einbau unbedingt den artesischen Austritt zu stoppen. Unter diesen Bedingungen soll noch einmal auf die notwendigen Dichteunterschiede hingewiesen werden. Falls der artesischen Überlauf mit einer höheren Spüldichte bekämpft wird, muss die Suspensionsdichte um mindestens  $0,3 \text{ g/cm}^3$  darüber liegen.

### 3.7.2 KONZEPT FÜR DIE EINBAUTECHNOLOGIE IN DAS BOHRLOCH

Für die Erprobung der bohrtechnischen Bedingungen unter Verwendung der Ringrohrsonde wurde eine Testbohrung hergestellt. Die Testbohrung wurde bis auf 38 m abgeteuft. Um eine mehrfache Verwendung zu ermöglichen, wurde ein Bohrdurchmesser von 270 mm gewählt und die Bohrung über die gesamte Länge mit einer Rohrtour von 243 mm Durchmesser ausgebaut. Dieser größere Durchmesser lässt es nun zu, für den üblichen Bohrdurchmesser als Ersatz eine Verrohrung einzubauen. An der Versuchsbohrung wurde eine PVC-Rohrtour mit einem Innendurchmesser von 150 mm eingebaut. Diese Rohrtour wird mit der großen Stahlrohrtour nicht fest verbunden, so dass es möglich ist, mehrere Funktionstests mit Ringrohrsonden ohne eine Neubohrung durchzuführen. Nach dem Test ist die gefüllte Sonde mit dem PVC-Rohr verbunden und kann nur gemeinsam mit der Rohrtour ausgebaut und bewertet werden. Auch wenn der Vorgang mit dieser Variante mehrfach wiederholbar ist, so ist er doch sehr aufwendig. Durch die Verwendung von aushärtenden Vorfüllbaustoff kann man die Untersuchungen zur Lage der Anordnung der Ringrohre nur nach Zerstörung der Schutzrohrtour vornehmen. Für den Einbau der Ringrohrsonde wird am Standort der Testbohrung im Werksgelände die Wickeleinrichtung benutzt, die auch bei der Herstellung der Sonde als Zugvorrichtung eingesetzt wird. Bei dem Bau von neuen Erdwärmesonden wird die Sonde auf einer Trommel in der Nähe des Bohrloches abgewickelt und unter der Last des Schwerestückes in das Bohrloch eingebaut. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass an dem Gewebeschauch keine Schäden entstehen. Um das zu verhindern, werden die Rohre gemeinsam mit dem Gewebeschauch mit Klebestreifen zusammengebündelt. Auf diese Weise wird erreicht, dass dieses Bündel nur einen Durchmesser von ca. 80 mm benötigt. Er ist somit deut-

lich kleiner, als das eingebrachte Schwerstück als Leitvorrichtung mit 101,3 mm Durchmesser. Man kann bei einem gut befahrbaren Bohrloch davon ausgehen, dass der Gewebeschlauch unter normalen Bedingungen unbeschädigt bis auf die Bohrlochsohle kontrolliert eingebaut werden kann. Bei komplizierten Bohrlochverhältnissen (z.B. Nachfall aus dem Gebirge, Engstellen) ist der Einbau nur im Schutz einer Sicherheitsrohrtour möglich. Dieses Sicherheitselement wird nach dem Einbau der Ringrohrsonde wieder ausgebaut. Unter dieser Bedingung wird das Schwerstück so ausgeführt, dass der Ballast den Durchmesser der Ringrohrsonde von 90 mm nicht überschreitet. Die Ringrohrsonde wird unten auf der Sohle abgestellt und über den Verfüllschlauch mit einer geringen Verpressrate aufgefüllt. Die verdrängte Spülung wird entweder am Bohrlochkopf ausgetragen oder in das Erdreich (Gebirge) verpresst.

Bei diesem Vorgang wird nicht nur die Spülung nach oben verdrängt, sondern es werden funktionsgerecht die Ringrohre an die Bohrlochwand bewegt und dort in ihrer Lage fixiert. Nach dem Aushärten des Verfüllmaterials hat der Gewebeschlauch seine Aufgabe erfüllt. Am Kopf der Ringrohrsonde wird das Zentralrohr als Rücklauf zu der Wärmepumpe verlegt. Die Ringrohre werden über einen Sammler am Sondenkopf (in ähnlicher Bauweise wie der Sondenfuß zusammen gefasst) ebenfalls auf eine DN 40 PE-Leitung als Vorlauf zusammengeschlossen und zur Wärmepumpe geführt.



Abbildung 59: Wickelvorrichtung während des Sondeneinbaus an einer Testbohrung



Abbildung 60: Detailaufnahme Sondeneinbau

### 3.7.3 LOGISTIKKONZEPT FÜR DEN SONDENVERTRIEB

Für die Bereitstellung der Ringrohrsonde sind die Materiallieferungen durch die Zulieferfirmen, als auch die Belieferung der Anwender zu organisieren.

Bei dem Konzept wurde darauf geachtet, dass die notwendigen Teile bis auf wenige Ausnahmen keine Sonderfertigungen sind und im Markt auf normale Weise bezogen werden können. Das hat den Vorteil, dass die Qualitätssicherung von dem Vorlieferanten erbracht wird und keine Herstellungsanlagen angeschafft werden müssen. Das gilt insbesondere für die Bereitstellung der PE-Rohre. Das Extrudieren erfolgt in den gewünschten Dimensionen und der erforderlichen Materialqualität bei den renommierten Herstellern. Hier werden die PE-Rohre in großen Längen beschafft und bedarfsgerecht abgehängt. Um eine kontinuierliche Produktion zu ermöglichen, ist vorgesehen für die Außenrohre eine ausreichende Anzahl von Trommel vorzuhalten. Die eigentliche Produktion der Sonde kann dann im eingespielten Ablauf bis hin zur Qualitätssicherung mit dem Dichtheitsnachweis erfolgen. Die Herstellung der speziellen Teile, wie Sondenfuß und Sammler (Sondenkopf) erfolgt in eigener Hand. Sie werden mit den entwickelten Schweiß- und Klebevorrichtungen zur fertigen einbaufähigen Sonde komplettiert. Zur schnellen Reaktion auf Nachfragen ist ein kleines Zwischenlager vorgesehen, in dem die wichtigen Standardlängen bereitgehalten werden. Das gilt auf für das Zubehör, wie z.B. Schwerstücke.

Auf der Anwenderseite kann die Ringrohrsonde wie auch andere Zirkulationssonden von jedem erfahrenen Bohrteam für Erdwärmesonden eingebaut werden. Für den Vertrieb ist es deshalb notwendig, dass die Sonden kundengerecht zur Verfügung gestellt werden. Dazu sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Zertifizierung der Sonde nach den üblichen Standards
- Bereitstellen in den verschiedenen Längen
- Bereithalten von notwendigem Zubehör, wie Trommeln zu Transport und Einbau
- Auswertung von ersten Erfahrungen mit den Anwendern
- Lagerhaltung von üblichen Größen
- Verständliche Dokumentation für Kunden und Anwender
- Schnelle Bereitstellung und Lieferung der Sonden

Bei der Konstruktion wurden wesentliche Eigenschaften bereits mit berücksichtigt. Gegenwärtig existiert nur ein Prototyp, so dass keine Erfahrung für die Belieferung von Anwendern vorliegt. Es wird deshalb auch bei dem Vertrieb einen Entwicklungsprozess geben, der die Akzeptanz ständig verbessern muss. Beispielsweise ist vorgesehen die Sonden auf Leih-trommeln bereitzustellen, die in einer transortoptimierten Form im Umlauf gehalten werden sollen. Gleichzeitig sollen diese Trommeln ein Hilfsmittel für den Einbau der Sonde sein.

### 3.8 ENERGETISCHE NUTZUNG DER RINGROHRSONDE

#### 3.8.1 EINBINDUNG IN DEN HEIZKREIS ÜBER WÄRMEPUMPEN

Für die Ringrohrsonde sind für die Gebäudetechnik keine besonderen Ausrüstungen und Materialien notwendig

- Ringrohrsonde erfordert keine speziellen Wärmepumpen. Das gebräuchliche Zirkulationsmedium kann in gleicher Weise genutzt werden.
- Vor- und Rücklauf werden mit DN 40 bereitgestellt. Der Sammler am Sondenkopf vereinigt die 10 Außenrohre auf die Rohrdimension DN 40. Das Zentralrohr besitzt ohnehin die Dimension DN 40. Beide Leitungen können in üblicher Weise mit Elektroschweißmuffen angebunden werden.
- Der hydraulische Druckverlust liegt ca. 50 % über dem der Doppel-U-Rohr-Sonde und wird von der Standarddruckhöhe der Wärmepumpe mit ca. 1,1 bar abgedeckt. Ebenfalls ist die Überwindung dieses Mehraufwandes wirtschaftlich vernachlässigbar. Unter gegenwärtigen Bedingungen sind dafür zusätzlich Betriebskosten von ca. 2,00 €/Jahr aufzubringen.
- Bei der Planung der Anlage wird empfohlen die Eigenschaften der Ringrohrsonde zu beachten. Falls keine geeignete Software zur Verfügung steht, sollte die Auslegung mit den verfügbaren Programmen für die Doppel-U-Rohrsonde erfolgen. Unter der Annahme ist man auf jeden Fall auf der sicheren Seite.

#### 3.8.2 MESSTECHNISCHE ERFASSUNG DES WÄRMEENTZUGS

Für die messtechnische Erfassung des Wärmeentzugs sind neben den bekannten Thermal Response Tests (TRT) in der Anfangsphase auch Wärmemengenzähler vorgesehen, die direkt die Unterschiede verschiedener Sonden ermitteln können. Die elektronischen Messeinrichtungen sollen vorzugsweise in dem Technikraum des Gebäudes untergebracht werden und über ein MODEM die Daten sowohl von den Sonden als auch von dem Verbraucher kontinuierlich bereitstellen. Als geeignete Technik stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. Eine grundlegende Eigenentwicklung ist nicht erforderlich.

#### 3.8.3 WIRTSCHAFTLICHE EINSCHÄTZUNG DER SONDE

Bei der wirtschaftlichen Einschätzung wirken sich folgende Einflussgrößen aus:

- Die annähernd gleichen Herstellungskosten bei den bewerteten Sondentypen sind für die Anschaffungskosten ausschlaggebend.
- Mit der hohen Effizienz ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich, der zu geringeren Betriebskosten beiträgt.
- Mit der Sondenform ist ein geringes Schadensrisiko bei der Herstellung und den Betrieb der Ringrohrsonde vorhanden. Mit dem Einpumpprozess in den Gewebes Schlauch entsteht eine dichte Verfüllsäule im Bohrloch, die Wasserwegsamkeiten als Schadensursache verhindert.

100m Länge	RR-Sonde	Dp-U-Rohr	Einf-U-Rohr
	10xDN16+1xDN40	4xDN32	2xDN40
Herstellungskosten	900 €	300 €	250 €
Bohrkosten	4000 €	4000 €	4000 €
Verfüllen (3m³)	285 €	1080 €	1080 €
Gesamtkosten	<b>5185 €</b>	<b>5380 €</b>	<b>5330</b>

Tabelle 4: geschätzter Kostenvergleich verschiedener Sondentypen

Für die oben analysierten Erdwärmesonden sollen die Investitions- und Gesamtgestehungskosten für Wärme eingeschätzt werden. Die Investitionskosten für die Bohrung einschließlich Komplettierung wurden aus Preisangaben von Fachfirmen ermittelt, wobei die wesentlichen Unterschiede in den reinen Bohrkosten (50 €/m für 150 mm Durchmesser und 75 €/m für 220 mm Durchmesser), im PE-Bedarf für die Rohre, in den unterschiedlichen Verfüllbaustoffen und im höheren Aufwand für den Einbau großvolumiger PE-Rohre bestehen. Die Kosten für eine großvolumige KOAX-Anlage wurden mit dem Doppelten einer üblichen kleinkalibrigen Anlage veranschlagt werden.

Die Kosten der Wärmepumpenanlage einschl. Pufferspeicher, Gebäudeleittechnik und Installation soll bei allen Anlagen gleich sein (7.400 €). Die gesamten spezifischen Gestehungskosten je kWh Wärme werden nach der Annuitätenmethode berechnet, wobei die gebäudetechnische Anlage eine Standzeit von 15 Jahren, die Sonde jedoch von 30 Jahren, besitzen soll. In die Berechnungen wird eine finanzielle Förderung von 4.500 € einbezogen. Als Zinssatz wurden 4% angesetzt, die Stromkosten sollen jährlich um 2% steigen.

Die Gestehungskosten Wärme belaufen sich danach auf etwa 11,1 € ct/kWh für die Ringrohr-, 11,6 € ct/kWh für die Doppel-U-Rohr- und 13,4 € ct/kWh für die großvolumige KOAX-Sonde (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Sondentyp	Winterleistung, kW	Investitionskosten der Bohrung, €	Gesamt-Gestehungskosten Wärme, €cent/kWh*
Doppel-U, 150mm	6.04	6432	11.6
KOAX-150mm	5.95	7087	11.7
KOAX-220mm	6.8	12963	13.4
Ringrohr, 150 mm	6.9	7049	11.1

Tabelle 5: Kostenschätzung für eine Einfamilienhaus-Heizung mit 2000 Jahresbetriebsstunden, (\* 15 Jahre Standzeit der Wärmepumpenanlage, 30 Jahre Standzeit der Sonde, mit KfW-Förderung 4500 €)

### 3.9 BEITRAG ZUM KLIMASCHUTZ

Der Einsatz der Wärmepumpen ermöglicht die Nutzung von Niedertemperaturwärme. Sie sind eine sinnvolle Möglichkeit für die Wärme und Warmwasserversorgung der Gebäude mit Erdwärme aus den oberflächennahen Schichten. Durch eine Vielzahl von Weiterentwicklungen bei den Kältemitteln und den Verdichterkonstruktionen hat sich eine Effizienzverbesserung der Anlagentechnik für die Wärme und Warmwasserversorgung der Gebäude ergeben. Die Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser liegt im Spektrum der Erdwärmennutzung. Sie wird aber nur zu 1,1 % für die Wärmeversorgung eingesetzt. In der Regel werden die Wärmepumpen elektrisch angetrieben, so dass der Strom aus erneuerbarer Energie den Klimaschutz dieser Technologie fördert. Die Anstrengungen für die Gewinnung erneuerbarer Energien haben in den Jahren von 2007-2014 zu einer Steigerung der Stromversorgung von 14,2 % auf 27,8 % geführt. Dagegen muss festgestellt werden, dass der Einsatz erneuerba-

rer Energien für die Wärmeherstellung seit 2012 stagniert. "Wie in den Vorjahren konnten Wärmepumpen laut dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) auch im Jahr 2018 ein deutliches Marktwachstum verzeichnen. Mit rund 84.000 neuen Heizungsanlagen wurde der Absatz des Vorjahres um rund 8 Prozent übertroffen. Von den neu installierten Heizungsanlagen waren etwa 72 % Luftwärmepumpen und 28 % Erdwärmepumpen (für die Erdwärmepumpen werden ca. 20.000 Erdwärmesonden pro Jahr hergestellt) und sonstige Systeme. Auch der Absatz von Warmwasserwärmepumpen stieg. Mit etwa 15.000 Anlagen wurden rund 11 % mehr Wärmepumpen zur Brauchwassererwärmung abgesetzt als im Jahr 2017. Der Zubau spiegelt sich auch in der steigenden Wärmenutzung wider. Zusammen mit den tiefen geothermischen und balneologischen Anlagen (Bäderbetriebe) wurden im Jahr 2018 insgesamt 14,7 Mrd. kWh Wärme aus Geothermie und Umweltwärme gewonnen. Dies sind etwa 8 % mehr als im Vorjahr (13,6 kWh)" [BMW 2019]. Ebenso liegt die Entwicklung des Verhältnisses von weniger effizienten Luft- zu den wirkungsvolleren Erdwärmepumpen nicht im Sinne des Klimaschutzes.

Der Einsatz der Erdwärme im Wärmemarkt steht in einem deutlichen Missverhältnis zu den politischen Zielen der Energiewende, da der Anteil an den fossilen Energieträger nicht reduziert wurde. Die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser mit Mineralöl bzw. Gas ist das Marktpotential für die oberflächennahe Erdwärme.

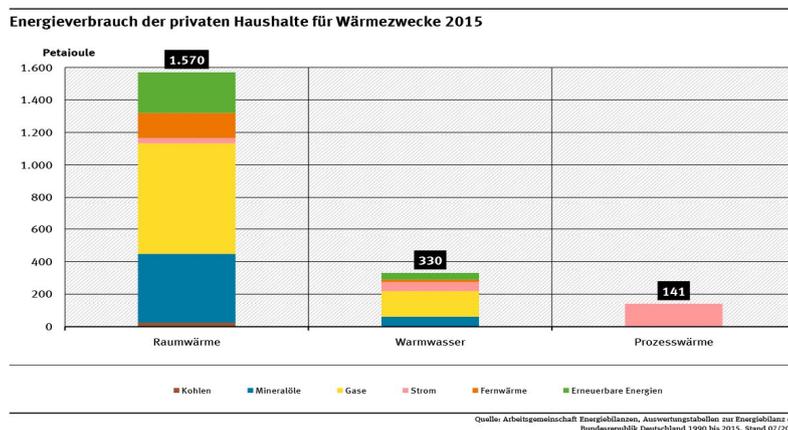


Abbildung 61: Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wärmezwecke 2015

Mit der Verbesserung der Energiegewinnung mit Hilfe der Ringrohrsonde wird die Effizienz der Erdwärmepumpe gefördert und damit ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Bei der Anwendung der Ringrohrsonde muss man bei einer klimaförderlichen Anwendung voraussetzen, dass die Bohrtiefen (Längen der Erdwärmesonde) im Vergleich zu der Auslegung konventioneller Erdwärmesonden auch für die Ringrohrsonden gelten. Der zusätzliche Wärmeentzug sollte deshalb nicht für die Reduzierung der Sondenlängen, sondern zugunsten eines geringeren Fremdenergieaufwandes eingesetzt werden. Auf diese Weise würde ein nützlicher Beitrag für den Klimaschutz geleistet.

Ebenso liegt die Entwicklung des Verhältnisses von weniger effizienten Luft- zu den wirkungsvolleren Erdwärmepumpen nicht im Sinne des Klimaschutzes, aber es wird politisch leider nicht dagegen gesteuert.

### 3.9.1 CO<sub>2</sub> REDUZIERUNG IM VERGLEICH ZUR STANDARDSONDE

Wie bereits einleitend erwähnt, wird mit der Ringrohrsonde das Ziel verfolgt, unter vergleichbaren Rahmenbedingungen eine höhere Energieausbeute zu gewinnen. Vergleichbare Rahmenbedingungen bedeutet, dass die Erdwärmesonde in einem Bohrloch mit gleichem Bohrdurchmesser und gleicher Bohrtiefe eingebaut und die Sonde an eine vergleichbare Wärmepumpe angeschlossen wird. Nur wenn man diese Bedingungen einhält, bekommt

man im Ergebnis eine Reduzierung des Fremdenergiebedarfes (Stromversorgung für die Wärmepumpe). Mit diesem verringerten Stromeinsatz (ein Mix aus fossilen und erneuerbaren Energien) verringert sich auch der CO<sub>2</sub>-Verbrauch für die Herstellung der Wärmeenergie. Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass bei gleicher Leistungszahl der Wärmeentzug um 18 % höher liegt. Um die gleiche Wärmemenge herzustellen, benötigt man nur 84 % des Stromes. Das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial kann mit dem CO<sub>2</sub>-Vermeidungsfaktor bewertet und quantifiziert ausgedrückt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die Abschätzungen zu den Emissionen im Vergleich der verschiedenen Technologien dargestellt.

Heizwärme	Anteil in %	Jahresarbeitszahl (2014)	CO <sub>2</sub> -Vermeidungsfaktor in g/kWh
Luft-WP	46	2,9	91
Erdwärme-WP	39	<b>3,3</b>	<b>108</b>
Wasser-Wasser WP	10	3,2	98
Gas-Luft-WP	2	1,4	91
Solarthermie			260
Tiefe Geothermie			326

Tabelle 6: Emissionsabschätzung der Wärmeversorgung nach verschiedenen Erzeugertypen

Wie aus der Abbildung "Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wärmezwecke 2015" hervorgeht, sind 71 % des Wärmebedarfs das Potential für die erneuerbaren Energien; darunter auch für die Geothermie. Von den 40 Mio. Haushalten werden mit Stand 2015 528 GWh für die Wärmeversorgung verbraucht. Das sind im Durchschnitt 13.200 kWh/a. Davon werden nur 7 % von Geothermie und Wärmepumpen bereitgestellt. Es sind 11.305 GWh, die über Wärmepumpen erzeugt wurden.

Mit der Jahresarbeitszahl steht eine Kenngröße zur Verfügung, die den Anteil der erneuerbaren Energie zur Fremdenergie angibt. Die Jahresarbeitszahl der Luft-Wärmepumpen und Wasser-Wasser-Wärmepumpen sind technologisch bezogen auf die Wärmequelle weitgehend ausgereizt. Hier wird es bei der Wärmeübertragung an den Wärmetauschern nur geringe Verbesserungen geben. Die Entwicklung des Wärmepumpenwirkungsgrades kommt allen Anwendertechnologien gleichermaßen zugute. Bei der oberflächennahen Geothermie ist der Wärmetauscher im Erdreich ein sehr einflussreicher Anlagenteil, der ein erhebliches Potential für die Erdwärmepumpen bietet. In der nachfolgenden Tabelle sind CO<sub>2</sub>-Vermeidung der verschiedene Sondentypen (Doppel-U-Rohr - Ringrohr) und die Luftwärmepumpe gegenübergestellt.

Erdwärmesondentyp	Länge in m	JAZ (2014)	CO <sub>2</sub> -Vermeidungsfaktor in g/kWh	CO <sub>2</sub> -Vermeidung pro Haushalt und Jahr in t
Dp.-U- Rohrsonde	ca. 100	3,3	108	1,43
Ringrohrsonde	ca. 100	4,3	141	1,86
Luft-WP		2,9	91	1,20

Tabelle 7: CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei Nutzung von Erdreichwärmepumpen (mit verschiedenen Sondentypen Doppel-U-Rohr und Ringrohr) und von Luftwärmepumpe aus Feldtestangeben

Die Wahl der Anlagentechnik wird von mehreren Faktoren bestimmt. Für den Bauherrn sind häufig die Investkosten ausschlaggebend, so dass die Entscheidung oft gegen die klimaeffizienten Systeme, zu den die Erdwärmesonden (und hier insbesondere die Ringrohrsonde)

gehören, getroffen werden. Als typisches Beispiel ist der Trend im Rückgang der Erdwärmepumpen im Verhältnis zu den Luft-Wärmepumpen, obwohl sie bei der CO<sub>2</sub>-Reduzierung deutlich schlechter abschneiden.

Mit 0,660 t CO<sub>2</sub> pro Haushalt und Jahr liegt die zusätzliche Vermeidung einer Ringrohrerdwärmearanlage gegenüber der Luft-Wärmepumpe.

Von Seiten des Verbrauchers sind Energieeinsparungen am Gebäude und das Erschließen regenerativer Wärmequellen im Zusammenhang ausschlaggebend für die Energieeffizienz und den klimaschonenden Umgang mit den Ressourcen und der Reduzierung von Emissionen.

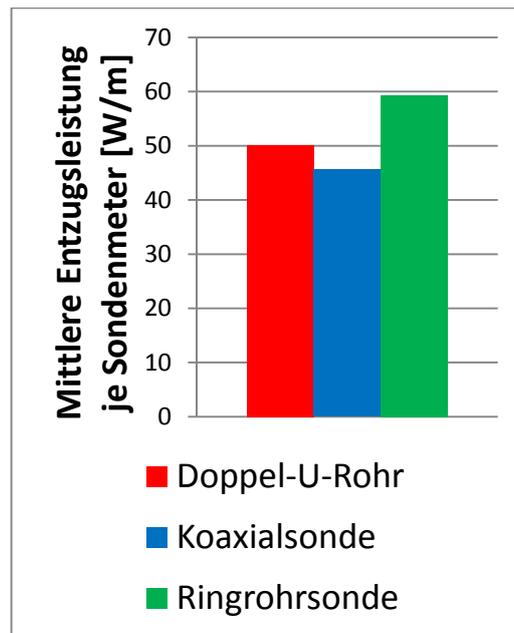


Abbildung 62: Vergleich von Sondentypen anhand der mittleren Entzugsleistung je Sondenmeter

### 3.9.2 EINSATZMÖGLICHKEITEN (HEIZEN UND KÜHLEN, SPEICHERN, ANWENDUNG IN SONDENFELDER USW.)

Die Einsatzmöglichkeiten der oberflächennahen Geothermie und damit auch der Ringrohrsonde sind insbesondere für die Versorgung beim Heizen und Kühlen von Gebäuden von Interesse. Dabei hat die oberflächennahe Energie den Vorteil, dass sie im Erdreich nicht nur die Wärme entziehen, sondern, dass sie Überschusswärme auch speichern kann. In unserer Region steht besonders im Sommer übermäßig Wärme zur Verfügung, die im Winterhalbjahr gut zu nutzen wäre. Um die Verluste zu vermeiden, kann mit geeigneten Anordnungen der Sonden in größeren Sondenfeldern eine Speicherung mit einer vertretbaren Verlustrate erfolgen. Für diese Anwendungsfälle sind unter Beachtung der geologischen Verhältnisse bereits große Sondenfelder errichtet worden. Diese werden mit Erfolg häufig in Verbindung mit Solaranlagen oder Abwärmennutzungen betrieben. Die Einspeicherung von Wärme und der Wärmeentzug aus diesen Sondenfeldern werden stark von dem Wärmetauscher in den Sonden und der Betriebsweise des Speichers beeinflusst. Mit der Ringrohrsonde steht der wohl gegenwärtig effizienteste Wärmetauscher zur Verfügung. Er hat insbesondere bei Betriebsweisen mit häufigen Ein- und Ausspeisungen einen großen Vorteil. In einem Sondenfeld mit einer ausschließlich saisonalen Betriebsweise fällt allerdings der Vorteil von ca. 30 % der Ringrohrsonde gegenüber Doppel-U-Sonde infolge der Sondeninterferenz auf 15 % Leistungsvorteil ab. Die Untersuchung von kurzfristigeren Speicherzyklen verspricht größere Vorteile und sollte noch untersucht werden.

### 3.10 WEITERENTWICKLUNG UND AUSBLICK

Gegenwärtig werden in Deutschland ca. 20.000 Erdwärmesonden pro Jahr eingebaut.

In dem Projekt wurde die Herstellung von Erdwärmesonden bis zu einer Teufe von maximal 150 m bearbeitet. Bei dieser Sondenlänge sind die konstruktiven und fertigungstechnischen Grenzen erreicht.

Die Versorgung von besonders dicht besiedelten Gebieten und von großen Objekten führt zu einem Defizit im oberflächennahen Energievorrat bis 100 m Tiefe. Aus diesem Grund wird es erforderlich, die Sonde für die Wärmegewinnung für größere Teufen auszulegen. Hierzu sind Entwicklungen notwendig, die der mechanischen Beanspruchung der Ringrohrsonden auch in größeren Teufen widerstehen. Die mechanische Beanspruchung der Erdwärmesonden in größeren Teufen kann durch Materialsubstitution, durch Ersatz des Polyethylens, durch das belastbarere Polyamid oder von Kunststoffverbundrohren mit Stahlarmierung erfolgen. Gegenwärtig sind Sonden mit solchen Rohre für lange U-Rohr-Sonden bekannt, die den mehrfachen Druckbelastungen widerstehen. Gerade bei den sehr aufwendig hergestellten tieferen Bohrungen steigt die Bedeutung des effizienten Wärmeentzuges aus dem Erdreich. Tiefere Bohrungen erschließen Erdschichten mit höheren Temperaturen. Die Ringrohrsonde ist besonders gut geeignet, die energetischen Verluste bei dem Transport aus größeren Teufen zu reduzieren. Die mit den Außenrohren an der Bohrlochwand aufgenommene Wärme wird über das Zentralrohr nach oben geleitet. Der Verfüllbaustoff übernimmt dabei in Abhängigkeit seiner Wärmeleitfähigkeit eine Isolierfunktion, so dass ein Wärmetausch zwischen den Außenrohren und dem Zentralrohr eingeschränkt wird.

Typ der Erdwärmesonde	Länge in m	JAZ (2014)	CO <sub>2</sub> -Vermeidungsfaktor in g/kWh	CO <sub>2</sub> -Vermeidung pro Haushalt und Jahr in t
<b>Dp.-U- Rohrsonde</b>	ca. 100	3,3	108	1,43
<b>Ringrohrsonde</b>	ca. 100	4,3	141	1,86
<b>Ringrohrsonde</b>	ca. 400	5,0	163	2,15
<b>Ringrohrsonde</b>	ca. 600	6,5	212	2,80

Tabelle 8: CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei Nutzung von Erdreichwärmepumpen (mit verschiedenen Sondentypen Doppel-U-Rohr und Ringrohr) aus verschiedenen Teufen

Es ist deshalb nicht nur die Verfügbarkeit der Erdwärme im oberflächennahen Bereich von Interesse, sondern auch die Erschließung der Schichten mit höheren Temperaturen. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass sich die solare Regeneration mit zunehmender Teufe verringert.

Neben der mechanischen Druck- und Zugbelastung sind die hydraulischen Druckverluste auf die längeren Strömungswege einzustellen. Es ist deshalb notwendig, dass die Dimensionen der Ringrohrsonde angepasst werden. Dabei ist es sinnvoll, die U-Rohr-Sonden für größere Teufen mit DN40-PE-Rohren als Vorbild zu nehmen.

Ebenso sind Entwicklungen notwendig, die Ringrohrsonden in Verbindung mit anderen erneuerbaren Energien zu optimieren. Hier bietet sich besonders die Kurzzeitspeicherung der Wärme in der Übergangszeit im Frühjahr und Herbst als Tag-Nacht-Speicherung in Verbindung mit solarer Energie an. Unabhängig von der langfristigen Speicherung wäre das natürlich auch ein Beitrag zur effizienteren Nutzung von erneuerbaren Energien. Bereits vorhandene Anlagenkomponenten für die Wärmeversorgung oder vorgesehene Investitionen können so verbunden werden. Es würden dann die ohnehin vorhandenen Anlagen mit einer höheren Energieeffizienz genutzt werden können.

## 4. FAZIT

Mit dem Projekt wurde nachgewiesen, dass die Ringrohrsonde nach den theoretischen Vorstellungen praktisch hergestellt werden kann. Damit wurde das Ziel erreicht, eine Sonde für die Wärmeengewinnung bereitzustellen, die mit dem annähernd gleichen Materialeinsatz, einen wesentlich höheren Wärmeentzug bei gleicher Sondenlänge und gleichem Bohrl Lochdurchmesser in der praktischen Anwendung erzeugt. Mit der Nutzung des relativ aufwendig hergestellten Bohrloches über den gesamten Umfang ergeben sich auch die Möglichkeiten für eine deutliche Effizienzsteigerung. In diesem Zusammenhang wird mit dieser Entwicklung auch eine Technologie zum sicheren und funktionsfähigem Einbau und Betrieb unter Anwendung der erprobten Techniken erarbeitet.

Die theoretischen Voraussetzungen sind bereits in einer Veröffentlichung in der bbr 12-2013 zusammengefasst und versprechen ein größeres Potential im Energiegewinn. Diese Erkenntnisse waren der Anlass für dieses Projekt. Das neue Herstellungsverfahren der Verklebung der Ringrohre mit dem Gewebeschauch ermöglicht eine weitere Effizienzverbesserung gegenüber den angenommenen Bedingungen aus der o.g. Veröffentlichung. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde die Fertigungstechnologie überarbeitet, die eine qualitätsgerechte Herstellung gewährleistet. Die deutlich kompliziertere Bauform der Ringrohrsonde mit 11 Zirkulationsrohren erfordert eine gesteuerte Fertigungsstrecke, die eine zuverlässige Herstellung für Sonden bis zu einer Länge von ca. 150 m zulässt.

Im Rahmen der bisherigen Bearbeitung wurde die Gleichwertigkeit für das Qualitätskriterium "Systemdurchlässigkeit" belegt (siehe Vortrag Wagner Geotherm 2017). Mit den ersten Musterprodukten wurden einsatzfähige Sonden hergestellt und auf ihren praktischen Einsatz geprüft.

Aus den Erfahrungen bei der Fertigung und Anwendung werden die Vor- und Nachteile dargestellt und für die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten bewertet. Dabei werden auch die Effizienzkriterien, die Handhabung bei dem Einbau in die Bohrung und die Sicherheiten für den Schutz der Grundwasserleiter sowie die Anbindung an die Wärmepumpe berücksichtigt und diskutiert.

Die technische Ausführung von der Fertigung über den Einsatz in der Bohrung bis zur Inbetriebnahme der Anlage kann aus der Erfahrung unter den anwendungstypischen Bedingungen beurteilt werden.

Die Anwendung der Simulationssoftware ModTherm für die Planung und das Monitoring von Projekten mit Ringrohrsonden wird für Praxisbeispiele besprochen.

Die spezielle Aufgabenstellung für die Herstellung einer hocheffizienten Zirkulationssonde für Sole bzw. Wasser zu schaffen wurde mit der praxistauglichen Ringrohrsonde erreicht. Bei der Ausführung und Anwendung wurden die branchenüblichen Qualitätsstandards eingehalten. Mit der Ausführung von Zentralrohr und koaxial angeordnete Ringrohren wurde erstmalig in einer Erdwärmesonde eine geordnete Verteilung an der Bohrlochwand umgesetzt. Ohne wesentlichen Materialmehreinsatz wurde ein effizienter Wärmetauscher im Bohrloch verfügbar, der für Standardwärmepumpen geeignet ist, bei dem die hydraulischen Druckverluste im Normalbereich liegen und der ohne zusätzlich bohrtechnische Aufwendungen mit einem Einbaudurchmesser nur ca. 100 mm verfügbar ist. Zentrierhilfen oder Abstandshalter sind erforderlich, da das komplette Rohrbündel mit Verfüllrohr im Schutz eines Gewebeschauches eingebaut wird und sich während des Verfüllvorganges bis zu Bohrlochwand entfaltet.

### Zusammenfassende Wertung

- die Ringrohrsonde besitzt eine hohe energetische Effizienz,
- die Ringrohrsonde gewährt eine hohe Sicherheit für den Grundwasserschutz über die gesamte Sondenlänge,

- die Ringrohrsonde gewährleistet geringe Systemdurchlässigkeiten,
- die Ringrohrsonde kann in der notwendigen Konstruktion hergestellt werden,
- die Ringrohrsonde stellt keine besonderen Anforderungen an die Gebäudetechnik, wie Wärmepumpen und Steuerungen und
- die Ringrohrsonde kann mit erprobter Bohrtechnik in Standarderdwärm Bohrungen eingebaut werden.

## LITERATURVERZEICHNIS

Literatur Systemdurchlässigkeit

- [HWM15] HÄFNER, F., WAGNER, R. & MEUSEL, L.: *Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen*. Berlin/Heidelberg. Springer, 2015
- [PKG11] PERSONENKREIS GEOTHERMIE DER AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE: *Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern*. Wiesbaden, 2011
  
- [PKD15] PERSONENKREIS DURCHLÄSSIGKEIT DES SYSTEMS ERDWÄRMESONDE DER AD-HOC-ARBEITSGEMEINSCHAFT HYDROGEOLOGIE: *Empfehlungen für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde*. Mainz, 2015
- [TRE15] TRESKATIS, CH.: *Abdichtung von Erdwärmesonden: Problemstellung und Lösungsansätze*. bbr-Zeitschrift Ausgabe 5/15, 2015
- [HWM17] HÄFNER, F.; MEUSEL, L; WAGNER, R.: *Leistungsvergleich von Erdwärmesonden verschiedener Bauart*. bbr-Zeitschrift Ausgabe 5/17, 2017
- [WHH13] WAGNER, R.; HEINEMANN, D.; HÄFNER, F.: *Ringrohrerdwärmesonde - ein System mit optimiertem Wärmeentzug und sicherer Verfülltechnologie*. bbr-Zeitschrift Ausgabe 12/13, 2013
- [KIE16] KIEVERNAGEL, W.: *Die geoKOAX-Erdwärmesonde*. [http://energieforumwest.de/fileadmin/user\\_upload/efw/user\\_upload/content/download/2015/26.01.2015/VA\\_3\\_BFW\\_NRW/3-26.01\\_Kievernagel\\_Geothermie\\_\\_einfachste\\_Realisierung.pdf](http://energieforumwest.de/fileadmin/user_upload/efw/user_upload/content/download/2015/26.01.2015/VA_3_BFW_NRW/3-26.01_Kievernagel_Geothermie__einfachste_Realisierung.pdf), 2016
  
- [BWI19] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI): *Die erneuerbaren Energien*. <http://www.erneuerbare-energien.de>, 2019