

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az.: 35444 von
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Christian Wagner
M.Sc. Robert Staudacher
M.A. Markus Bernhard Lang

Engine & Balsamico Design GmbH
Gewerbering 2
85238 Petershausen
Telefon: 08137 6292238
info@engine-balsamico.de
www.engine-balsamico.de

Petershausen, 19.04.2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | |
|----|--------------|---------|-------------|-----------|
| Az | 35444 | Referat | Fördersumme | 87.200,00 |
|----|--------------|---------|-------------|-----------|

Antragstitel **Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb**

Stichworte Analysegas, Entgasung, Geothermie

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 14 Monate | 29.10.2019 | 31.12.2020 | |

Zwischenberichte

| | | |
|------------------------------|---|---|
| Bewilligungsempfänger | Engine & Balsamico Design GmbH Gewerbering 2 85238 Petershausen | Tel 08137 62 92 238 Fax |
| | | Projektleitung Robert Staudacher |
| | | Bearbeiter Dr.-Ing. Christian Wagner |

Kooperationspartner Prof. Dr. Thomas Baumann
Lehrstuhl für Hydrogeologie
Technische Universität München
Arcisstr. 21, 80333 München

Geothermische Kraftwerksgesellschaft Traunreut mbH
Hochreit 51, 83368 Traunreut-Sankt Georgen

Zielsetzung und Motivation für das Vorhaben

Mit kontinuierlich gewonnenem Analysegas kann u.a. das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht von Thermalwasser bestimmt werden. Eine Berechnung des minimal notwendigen Drucks innerhalb der Thermalwasseranlage zur Vermeidung von Mineralablagerungen führt zu einer optimierten Anlagenregelung. Die hierbei erreichbare elektrische Energieeinsparung resultiert aus einer verminderten Pumpleistung zur Aufrechterhaltung des minimal erforderlichen Systemdrucks. Ebenfalls kann dadurch die Dosierung von Scaling-Inhibitoren bedarfsgerecht eingestellt werden was deren Verbrauch reduziert. Durch die ermöglichte kontinuierliche Thermalwasseranalyse kann effizient auf Veränderungen reagiert werden. Dies erhöht die Anlagensicherheit und beugt ungünstigen Betriebsbedingungen vor.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zu Beginn wurden das Entgasungssystem in einer Laborumgebung und die Herstellung eines Testfluids entsprechend der geothermalen Randbedingungen (Gasbeladung, Druck, Temperatur) realisiert. Neben dem Anlagenbau beinhaltet dies umfangreiche Mess- und Regeltechnik mit dazugehöriger Software und Datenerfassung. An diesem Prüfstand wurden unterschiedliche Entgaser-Varianten evaluiert: Entgaser mit und ohne Membran, unterschiedliche Entgasungs-Druckniveaus und Extraktionsmöglichkeiten. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Randbedingungen festgelegt, Wirbelrohrgeometrien erstellt, Labormuster gefertigt und mehrere Entgasungssysteme untersucht. Die Quantifizierung der Entgasungsleistung im Labor, begleitet durch hydrochemische Berechnungen, führte zu einem robusten Prototyp, der für die reale Anlage geeignet ist. Der Feldtest an einer Geothermieanlage mit Volumenstrommessung und Gaschromatographie demonstrierte die Einsatzbereitschaft des Systems. Auf Basis der Messergebnisse und der Wasseranalysen wurden Modellrechnungen vorgenommen, um die Entgasungseffizienz zu bestimmen.

Ergebnisse und Diskussion

Das im Projekt entwickelte Entgasungssystem dient zur kontinuierlichen Entgasung von Geothermalwasser. Das hier vorgestellte System dient zur Gewinnung von Analysegas, wobei eine Skalierung zur quantitativen Entgasung großer Volumenströme möglich ist.

Gelöste Gase können je nach Systemkonfiguration und eingestellten Drücken zu 76% innerhalb eines Durchlaufs extrahiert werden. Der Aufbau liefert einen kontinuierlichen Gasstrom in Abhängigkeit der Drücke, Temperatur und des Wasservolumenstroms mit reproduzierbarer Effizienz.

Der Wirbelrohr-Entgaser besteht im Wesentlichen aus einem Entgasungsbehälter und einer Kreiselpumpe, die das Druckniveau im Entgasungsbehälter unterhalb des System- und Umgebungsdrucks absenkt. Die Druckabsenkung im Entgasungsbehälter, mit weiteren lokalen Druckminima in den Einströmbereichen, führt zur Bildung von Mikroblasen im Wasser.

Die mittels Strömungsführung erzeugten Zentrifugalkräfte ermöglichen das effiziente Separieren des Gases aus der Flüssigphase. Mit dem kontinuierlich extrahierten Gasstrom wird die nachgeschaltete Gasmessung versorgt. Diese bestimmt den Volumenstrom (automatisierte Gasmessglocke) und die chemische Zusammensetzung (Micro-Gaschromatograph). Mittels Kalibrierung und einer bekannten Entgasungseffizienz lassen sich damit der ursprüngliche Gasgehalt und dessen Zusammensetzung im Geothermalwasser berechnen. Die Ergebnisse der Gaschromatographie bilden die erwartete Gaszusammensetzung gut ab. Die relative Abweichung beträgt 4 - 11 Prozent. Die begleitende Berechnung der Löslichkeit mittels der hydrogeochemischen Modellierungssoftware PHREEQC ermöglicht anwendertaugliche Vorhersagen der Wasserchemie.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vortrag und Projektvorstellung durch Prof. T. Baumann am Geothermiekongress am 21.11.2019 in München

Fazit

Die Anwendbarkeit des entwickelten Entgasungssystems in der Geothermieanlage Traunreut wurde an einem Feldversuch gezeigt. Es konnte ein kontinuierlicher Gasvolumenstrom mit hoher Effizienz (76% aller gelösten Gase wurden extrahiert) entnommen werden. Der Aufbau ist eine geeignete Vorrichtung zur Online-Gasanalyse des Geothermalwassers. Die nachgeschaltete Gasanalyse aus Volumenstrommessung und Gaschromatographie deckt sich mit den berechneten Werten. Folglich ist ein sicherer und effizienter Anlagenbetrieb möglich.

Die Entwicklung des Entgasungssystems bedingte einen mit der Geothermieanlage vergleichbaren Versuchsaufbau im Labor. Die Gasbeladungen konnten im Labor präzise mit Druckluft und Wasser reproduziert werden. Dies war ein wichtiger Meilenstein und ermöglichte die Entwicklung eines geeigneten Entgasungs-Systems für die Geothermie.

Durch die hohe Entgasungseffizienz eignet sich das System auch zur quantitativen Entgasung des Geothermalwassers. Dies eröffnet eine Begleitgasnutzung zur Gewinnung zusätzlicher Rohstoffe.

Das entwickelte Entgasungssystem mit Gasmengenanalyse und nachgeschalteter Analyse der Gaszusammensetzung zur Online-Thermalwasseranalyse kann mit kleinen Anpassungen an die jeweiligen Druckverhältnisse an jeder Geothermieanlage eingesetzt werden.

Eventuell auftretende Scaling Vorkommnisse können erst mit zukünftigen Langzeittests im realen Einsatz vorhergesagt werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Projektkennblatt | 2 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 5 |
| Bezeichnungen und Begriffe..... | 6 |
| Zusammenfassung | 7 |
| 1. Aufgabenstellung des Projekts und Einsatzmöglichkeiten des Entgasungssystems | 8 |
| 2. Übersicht Verfahren zur Entgasung von Flüssigkeiten | 12 |
| 3. Auslegung, Entwicklung und Optimierung des Entgasungssystem | 13 |
| 3.1. Wirbelrohr-Entgaser mit Membran..... | 15 |
| 3.2. Wirbelrohr-Entgaser membranlos über Umgebungsdrucks..... | 17 |
| 3.3. Wirbelrohr-Entgaser membranlos unter Umgebungsdruck mit Vakuum..... | 21 |
| 4. Berechnung der Extraktion von Gasen aus Geothermalwasser am Beispiel GK Traunreut | 25 |
| 5. Beschreibung der Testumgebung und des Prüfstandsbaus im Labor | 28 |
| 6. Feldtest – Entgasung an der Geothermalanlage | 31 |
| 7. Fazit..... | 36 |
| Literaturverzeichnis | 37 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Geothermieranlage Traunreut [https://www.geothermie-traunreut.de/fotos-neu/] | 8 |
| Abbildung 2: Anlagenschema Geothermieranlage Traunreut [https://www.geothermie-traunreut.de/geothermie-kraftwerk/]..... | 9 |
| Abbildung 3: Entgasung im Bypass zur Analysegasgewinnung | 10 |
| Abbildung 4: Entgasung im Hauptstrom zur Begleitgasnutzung | 10 |
| Abbildung 5: Wirbelrohr mit hyperbolischer Geometrie | 14 |
| Abbildung 6: Wirbelrohr-Entgaser mit Kunststoffmembran | 15 |
| Abbildung 7: Wirbelrohr-Entgaser mit Keramikmembran..... | 16 |
| Abbildung 8: Wirbelrohr-Entgaser mit Schwimmerventil - Verfahrensschema..... | 17 |
| Abbildung 9: Wirbelrohr-Entgaser mit Schwimmerventil am Prüfstand..... | 19 |
| Abbildung 10: Entgasungseffizienz über Druckdifferenz des Wirbelrohr-Entgasers mit Schwimmerventil | 20 |
| Abbildung 11: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Verfahrensschema..... | 22 |
| Abbildung 12: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Frontansicht | 23 |
| Abbildung 13: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Detailansicht | 23 |
| Abbildung 14: Gas-Volumenstrommessung mittels Gasmessglocke..... | 24 |
| Abbildung 15: Wirbelrohr-Entgaser – Gesamtaufbau mit Messtechnik..... | 24 |
| Abbildung 16: Tank, Sensorik und Umwälzung | 29 |
| Abbildung 17: Kaltwassersatz (Wärmepumpe) mit Mischer und Zwischenspeicher . | 29 |
| Abbildung 18: Verfahrensschema der Testumgebung im Labor | 30 |
| Abbildung 19: Versuchsaufbau im Feldtest an der Geothermieranlage..... | 32 |
| Abbildung 20: Extrahierte Gasmenge im Feldtest | 32 |
| Abbildung 21: Micro-GC im Feldtest..... | 34 |
| Abbildung 22: Relative Gaskonzentrationen; Gasanalyse durch Prof. Baumann (Lehrstuhl für Hydrogeologie, TUM) mit Elster GCM-Box I (Elster GmbH, Mainz-Kastel), HSA-Säule..... | 34 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Wasseranalyse, Auszug der gelösten Gase | 26 |
| Tabelle 2: Henry-Konstanten der Hauptkomponenten, nach [Sander2015] | 27 |
| Tabelle 3: Randbedingungen der Laborumgebung | 30 |
| Tabelle 4: Zusammensetzung des Geothermalwassers (Analyse von 2019) mit zusätzlicher CO ₂ Injektion..... | 33 |
| Tabelle 5: Berechnete Zusammensetzung des extrahierten Gases | 34 |
| Tabelle 6: Relative Gaskonzentrationen; Gasanalyse durch Prof. Baumann (Lehrstuhl für Hydrogeologie, TUM) mit Elster GCM-Box I (Elster GmbH, Mainz-Kastel), HSA-Säule | 35 |
| Tabelle 7: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Gaszusammensetzung | 35 |

Bezeichnungen und Begriffe

| | |
|----------|--|
| IEP | Innovative Energie für Pullach GmbH |
| GKT | Geothermische Kraftwerksgesellschaft Traunreut mbH |
| ORC | Organic Rankine Cycle |
| GC | Gaschromatographie |
| NI / Nml | Normliter / Normmilliliter nach ISO 2533 |
| Scaling | Mineralablagerungen in Rohrleitungen und anderen Bauteilen |
| Nml/kg | Gasgehalt in Normmilliliter je kg Wasser |

Zusammenfassung

In Geothermieanlagen werden Thermalwässer aus großen Tiefen gefördert. Das Ausfallen gelöster Mineralien und Gase muss vermieden werden, um die Funktionsfähigkeit der Anlage zu gewährleisten. Hierfür sind Kenntnisse über die Inhaltsstoffe des Geothermalwassers essenziell. Eine kontinuierliche Bestimmung der im Wasser gelösten Gase in Milligramm Gas pro Kilogramm Wasser ist Ziel dieses Projekts.

Der Gasgehalt und dessen Zusammensetzung im Wasser beeinflusst u.a. das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und bestimmt den notwendigen minimalen Anlagendruck an der Oberfläche. Die kontinuierliche Bestimmung dieses Gleichgewichtes erlaubt eine anpassende Regelung des Anlagendrucks und führt damit zu einer deutlichen Energieeinsparung durch Verringerung der Pumpleistung sowie zu erhöhter Anlagensicherheit. In bestimmten Geothermieanlagen werden zusätzliche Scaling Inhibitoren, wie bspw. CO₂ vor der Förderpumpe als Schutz vor Ablagerungen in den Wasserstrom injiziert. Die Zudosierung richtet sich ebenfalls nach dem Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und kann durch dessen Messung bedarfsgerecht angepasst werden.

Der im Laufe des Projekts entwickelte Wirbelrohr-Entgaser dient zur kontinuierlichen Entgasung von Flüssigkeiten. Gelöste Gase konnten an der Geothermieanlage Traunreut im Bypass-Betrieb im ersten Durchlauf zu 76% extrahiert werden. Der Aufbau liefert einen kontinuierlichen Gasstrom in Abhängigkeit der Drücke, der Wassertemperatur und des Wasservolumenstroms mit reproduzierbarer Effizienz.

- Kontinuierlicher Gasstrom
- Kalibrierbare Effizienz Nl_{Gas}/kg_{Wasser}
- Analyse-/Begleitgasnutzung

Der Wirbelrohr-Entgaser besteht im Wesentlichen aus einem Entgasungsbehälter und einer mehrstufigen Kreiselpumpe, die den Sogdruck im Entgasungsbehälter unterhalb des System- und Umgebungsdrucks absenkt. Die Druckabsenkung im Entgasungsbehälter mit weiteren lokalen Druckminima in den Einströmbereichen führt zur Bildung von Mikroblasen im Wasser. Die mittels Strömungsführung erzeugten Zentrifugalkräfte ermöglichen das effiziente Separieren des Gases von der Flüssigphase.

Mit dem kontinuierlich extrahierten Gasstrom wird die nachgeschaltete Gasmessung versorgt. Diese bestimmt den Massenstrom (automatisierte Gasmessglocke) und die chemische Zusammensetzung (GC). Mittels Kalibrierung und bekannter Entgasungseffizienz lässt sich damit der ursprüngliche Gasgehalt und dessen Zusammensetzung im Geothermalwasser berechnen.

1. Aufgabenstellung des Projekts und Einsatzmöglichkeiten des Entgasungssystems

Geothermieranlagen fördern heiße Wässer meist aus großen Tiefen. In Deutschland sind ca. 38 Anlagen mit Bohrtiefen > 400 m in Betrieb. Sie liefern insgesamt ca. 350 MW thermische und 41 MW elektrische Leistung, [Geothermie2021].

In der Anlage der IEP in Pullach (Region München) werden hierfür ca. 5.400 l/min aus Tiefen von 3300 bis 4000 m bei einer Temperatur von 107 °C gefördert.

Die Anlage der Geothermischen Kraftwerksgesellschaft (GKT) in Traunreut fördert 11.100 l/min Geothermalwasser mit 114 °C aus ca. 4500 m, vgl. Abbildung 1.



Abbildung 1: Geothermieranlage Traunreut [<https://www.geothermie-traunreut.de/fotos-neu/>]

An der Oberfläche wird dem geförderten Fluid Energie über Wärmetauscher bis zu einer Resttemperatur von ca. 55 °C entzogen. Anschließend wird das Fluid über eine separate Tiefenbohrung wieder in die poröse Gesteinsschicht zurückgefördert, um den Wasserkreislauf zu schließen.

Die Anlage in Traunreut stellt ca. 12 MW thermische Leistung für das Fernwärmenetz und ca. 5 MW elektrische Leistung bereit. Die genutzte Erdwärme ist als Ressource nahezu unerschöpflich und trägt als umweltfreundliche, nahezu CO₂ freie Alternative zum Klima- und Naturschutz bei.

Das Geothermalwasser ist üblicherweise mit verschiedenen Stoffen verunreinigt, welche durch den hohen Druck und der Temperatur aus dem Gestein in der Tiefe in Lösung gehen. Neben einer Vielzahl an Gasen spielt Kalk - in meist geringerem Maße Dolomit - eine besondere Rolle. Dieser kann bei Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts ausfallen, die Wärmetauscherflächen und Pumpenschaufeln zusetzen (Scaling), den Wirkungsgrad der Anlage mindern und aufwändige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten nach sich ziehen, vgl. [Schröder2009].

Um den Kalk in Lösung des Geothermalwassers zu halten, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Die IEP in Pullach hält dafür den Geothermalwasserkreislauf auf einem erhöhten Druckniveau von ca. 18 bar an der Oberfläche.
- Daher wird die Beimischung bestimmter Stoffe (Scaling Inhibitoren) eingesetzt, wie die CO₂ Injektion vor der Pumpe in der Förderbohrung. Damit ist es möglich das Druckniveau des Thermalwasserkreises deutlich (auf ca. 8 bar) zu senken.

Das erhöhte Druckniveau verursacht prozessbedingt eine höhere Pumpleistung, welche sich im elektrischen Energiebedarf der Anlage niederschlägt. Die Injektion des Kohlenstoffdioxids wiederum verursacht zusätzliche Kosten und verändert zudem die Löslichkeitseigenschaften des Thermalwassers in der Tiefe nach dem Zurückfördern auf der Injektionsseite.

Die Integrationsmöglichkeiten der Entgasung in eine Geothermieanlage werden anhand des Anlagenschemas der Geothermieanlage Traunreut nachfolgend skizziert.

Bei der GKT wird die Erdwärme in das Fernwärmenetz eingespeist und in elektrische Energie mittels ORC-Zyklus umgewandelt, vgl. Abbildung 2.

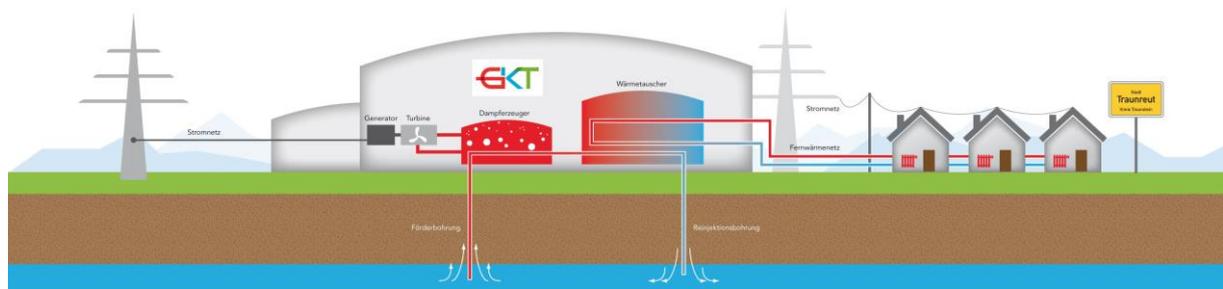


Abbildung 2: Anlagenschema Geothermieanlage Traunreut [<https://www.geothermie-traunreut.de/geothermie-kraftwerk/>]

Die Entgasungstechnik wird vorerst nur innerhalb des Thermalwasserkreises eingesetzt. Dieser besteht vereinfacht aus einer Förderbohrung mit Förderpumpe in der Tiefe, Wärmetauschern an der Oberfläche und der Injektionsbohrung.

Das Entgasungssystem kann im Bypass, mit einem Durchsatz von ca. 15 l/min, zum Thermalwasserkreislauf nach den Wärmeübertragern installiert werden, vgl. Abbildung 3. Hier liefert es kontinuierlich Analysegas (ca. 1000 Nml/min) für eine nachgeschaltete Gasanalyse bzw. Gaschromatografie.

Mit der ermittelten CO₂-Menge kann das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt und so der Anlagendruck bis zur Grenze der Scaling-Bildung reduziert werden. Dies verringert unmittelbar den elektrischen Leistungsbedarf der Förderpumpe.

Weiter wird teilweise in der Förderbohrung vor der Förderpumpe CO₂ injiziert. Dies verschiebt das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und schützt die gesamte Anlage vor

Ablagerungen. Hier kann eine permanente Gasanalyse den tatsächlichen Bedarf bestimmen und so die Injektionsmenge auf ein Minimum reduzieren.

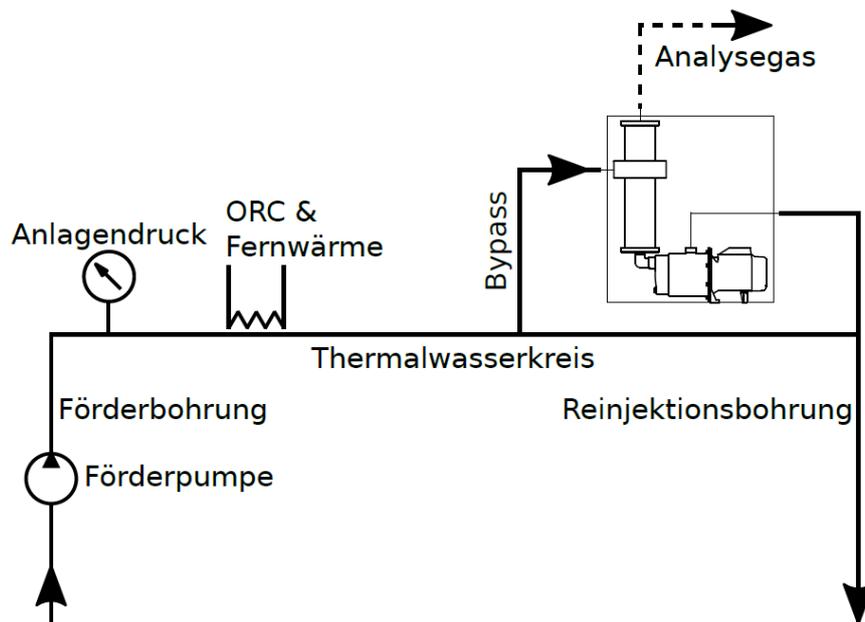


Abbildung 3: Entgasung im Bypass zur Analysegasgewinnung

In einer größeren Dimension bzw. durch Parallelisierung des Entgasungssystems wird es möglich den gesamten Thermalwasserstrom (ca. 11,1 m³/min an der GKT) auf ein gewünschtes Level zu entgasen, vgl. Abbildung 4.

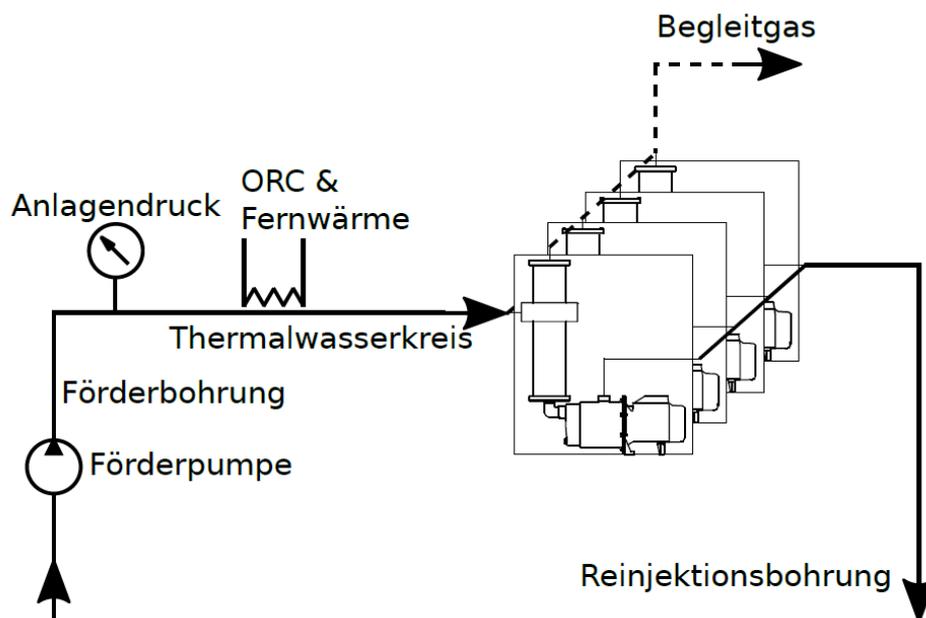


Abbildung 4: Entgasung im Hauptstrom zur Begleitgasnutzung

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Damit wird es möglich alle oder auch nur bestimmte Gase aus dem Wasser zu entfernen und diese neben der Analyse auch einer Nutzung zuzuführen. So kann das Injizierte CO₂ wieder extrahiert werden, um einer Veränderung des Thermalwassers auf der Injektionsseite vorzubeugen. Weiter verspricht die Begleitgasnutzung die Möglichkeit der Methangewinnung, da dies mit etwa 30 Nml/kg insgesamt ca. 20 Nm³/h (bei 185 l/s Wasser) für die GKT ergibt. Bei anderen Anlagen im süddeutschen Molassebecken kann der Methangehalt deutlich höher sein.

Für den wirtschaftlichen Betrieb einer quantitativen Entgasung muss eine Turbine zur Energierückgewinnung in Reihe vor dem Entgaser geschaltet werden.

Das hier vorgestellte Entgasungssystem zielt darauf ab, einen kontinuierlichen Gasstrom aus einem gasbeladenen Fluid zu extrahieren. Innerhalb des Förderprojektes wird die Entgasungstechnik so weit entwickelt, dass kontinuierlich Analysegas zur Erfassung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts bereitgestellt wird. Dieses Verfahren kann zur Druckregelung des Thermalwasserkreislaufes verwendet werden und führt zu erheblichen elektrischen Energieeinsparungen.

Die zur Zielerreichung notwendigen Schritte führen zu folgender zeitlicher Gliederung:

- Aufbau einer Laborumgebung mit Testfluid entsprechend den geothermischen Randbedingungen (Gasbeladung, Druck, Temperatur)
- Evaluierung unterschiedlicher Entgaser-Varianten: Mit Membran und membranlos
- Evaluierung unterschiedlicher Druckniveaus (über und unter Umgebungsdruck) und Extraktionsmöglichkeiten
- Randbedingungen festlegen, Geometrien auslegen, Labormuster fertigen, Teststand und Messtechnik aufbauen, Labormuster testen, Quantifizierung der Entgasungsleistung im Labor, Membranwerkstoffe testen
- Entwicklung und Aufbau des Versuchsstandes zum Einsatz an der Geothermieanlage; Veränderte Randbedingungen, Fertigung, Montage, Messtechnik, Software, Sicherheit
- Feldversuch, Messung und Auswertung sowie Bestimmung der Entgasungseffizienz
- Validierung der Ergebnisse und Verwertbarkeit

2. Übersicht Verfahren zur Entgasung von Flüssigkeiten

Allgemein ist es in vielen technischen Anwendungen notwendig Gase aus Fluiden zu extrahieren. Diese reichen von Kraftwerken im Gigawatt-Bereich, bei welchen beispielsweise das Speisewasser entgast wird, um korrosiven Sauerstoff und alle Gase zu entfernen, die den sicheren und langfristigen Betrieb beeinträchtigen bis hin zur Erzeugung von Reinwasser für die Halbleiterindustrie.

Technisch etablierte Verfahren zur Entgasung von Flüssigkeiten sind thermische, chemische und solche mit Membranen.

Beim Membranverfahren strömt auf der einen Membranseite das zu entgasende Medium, auf der anderen Seite liegt ein geringerer Druck an und gegebenenfalls wird dort ein Stripgas geführt. Die Poren der Membran sind so beschaffen, dass Gasmoleküle passieren können, Moleküle der Flüssigkeit allerdings nicht oder nur kaum. Aufgrund des Druck- bzw. Konzentrationsunterschiedes kommt es zur Entgasung der Flüssigkeit.

Nachteil von Membrantechnologien sind die Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen, hohen Temperaturen und eine geringe chemische Beständigkeit. Diese Faktoren beeinträchtigen die Langzeitstabilität bei anspruchsvollen Bedingungen und folglich die Anwendbarkeit unter Bedingungen wie bei Geothermieanlagen.

Am Lehrstuhl für Hydrogeologie der Technischen Universität München (TUM) werden derzeit Membranverfahren erprobt. Neben den hohen Temperaturen und der mechanischen Stabilität stellen diverse Stoffe im Thermalwasser wie Öle und Partikel unterschiedlicher Größe dabei die Herausforderung für das Entgasungsverfahren dar.

Physikalisch können Flüssigkeiten durch Temperaturerhöhung oder Druckabsenkung (die Löslichkeit ist im Wesentlichen temperatur- und druckabhängig) entgast werden. Aus energetischen Gründen wird bei geschlossenen wasserführenden Niedertemperaturanlagen hauptsächlich die Entgasung durch Druckabsenkung verwendet. Die weit verbreitete Vakuum-Sprührohr-Entgasung ist ein Verfahren, bei dem die Flüssigkeit in einen Vakuumbehälter fein versprüht wird. Das entstehende Gas/Dampfgemisch wird über eine Vakuumpumpe abgeführt. Zusätzliche Brüdenkondensatoren dienen zur Verringerung des Ansaugvolumenstroms der Vakuumpumpe, [Hydrogroup2018].

Nachteil der Sprührohr Entgasung sind die geringen Durchmesser in den Sprühdüsen, welche durch Ablagerungen (Scaling) bei Betrieb mit Geothermalwasser nur eine geringe Betriebsdauer aufweisen.

Eine kontinuierliche Sprühentgasung mittels Gasseparator wurde von [Schröder2009] an einer Geothermieanlage eingesetzt. Durch Abnutzungserscheinungen kommt es hier zu Totalausfällen der Entgasungsanlage.

Durch die Stadtwerke München gab es ebenfalls bereits Anstrengungen das Wasser einer Geothermianlage zur Analysegasgewinnung im Batch-Verfahren zu entgasen.

Der hier vorgestellte Wirbelrohr-Entgaser ist eine Art Kombination aus Hydrozyklon- und Vakuum-Entgaser in einer kontinuierlichen Bauweise. Mehrere Niederdruckzonen führen zur Nukleation und Blasenbildung gelöster Gase aus dem Wasser. Hohe Zentrifugalkräfte bewirken eine effiziente Separation dieser Mikroblasen zu einer „Gas-Säule“ in der Mitte des Behälters. Aus dieser wird das abzuscheidende Gas extrahiert. Die Entwicklungsschritte zu dieser äußerst zufrieden stellenden Lösung werden im Nachfolgenden erläutert.

3. Auslegung, Entwicklung und Optimierung des Entgasungssystem

Das im Rahmen dieses Förderprojekts entwickelte Entgasungssystem ist eine vielversprechende technische Lösung zur kontinuierlichen Entgasung. Nach dem Stand der Technik kann der Wirbelrohr-Entgaser als kombinatorische Lösung aus Hydrozyklon-Abscheider und Niederdruck-Entgasung verstanden werden.

Zunächst wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten am Ranque-Hilsch-Wirbelrohr (RHVT) am Institut für Wasserchemie der TUM die Problemstellung der Entgasung von Geothermalwasser durch Prof. Haisch und Prof. Baumann an die Bewilligungsempfänger herangetragen. In diesem Kontext ermöglichte das Institut für Wasserchemie (IWC) in der Gruppe von Prof. Haisch dem Team als Gastforscher die Mitbenutzung der Räumlichkeiten und erste Labormuster zur Entgasung wurden ausgearbeitet.

Die Arbeiten am Wirbelrohr-Entgaser resultieren aus Überlegungen zur Strömungsoptimierung des RHVTs. Davon abgeleitet startete die Entwicklung zur Entgasung. Mit Hilfe eines Innovationsgutschein Bayern (2017-4716-FI-12) wurde das „proof of principle“ für die Entgasung mittels Wirbelrohr erbracht. Dies zeigte sich darin, dass Gase aus Flüssigkeiten in Zyklonen aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen Wandung und Zentrum separiert werden können. Die Herausforderung war es die freiwerdenden Gase zu extrahieren und das Verfahren für eine kontinuierliche Betriebsweise zu entwickeln.

Die Entwicklungsarbeit ist wissenschaftlich eingebettet in den Seedfunding-Antrag der Geothermie-Allianz Bayern zum Thema Gasmonitoring. Prof. T. Baumann und Prof. C. Haisch unterstützten das Team wissenschaftlich bei der erfolgreichen Prototypentwicklung des Wirbelrohr-Entgasers. Am Deutschen Geothermie Kongress 2019 wurden Zwischenergebnisse erstmals vorgestellt.

Es wurden verschiedene Labormuster des Wirbelrohr-Entgasers bis Mitte 2020 entworfen und getestet. Das Ziel war es die optimale Entgasungsleistung für die vorliegenden Randbedingungen zu erreichen. Dadurch entstehen einige Zielkonflikte zwischen der zu entnehmenden Gasmenge, dem benötigten Wasservolumenstrom und dem Energiebedarf zur Druckabsenkung und anschließenden Druckerhöhung. Weiter wird mit dem Analysegas auch Wasser entnommen, dessen Menge möglichst

gering ausfallen soll. Über all dieser technischen Herausforderung steht die Anforderung der Echtzeit Gasanalyse, weshalb das Verfahren kontinuierlich ablaufen muss.

Druckabsenkung einer Lösung unterhalb des Sättigungsdruckes führt zur Freisetzung zuvor solvatisierter Gase. Dies führt zur Bildung von Mikroblasen, welche wachsen und agglomerieren bis sie an einer Phasengrenze das Fluid verlassen.

Im Wirbelrohr-Entgaser entstehen die Mikroblasen im Niederdruckgebiet des Wirbelzentrums. Die vorherrschenden Zentrifugalkräfte separieren diese aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Flüssigkeit und Gas und bewirken eine Wanderung zum Wirbelzentrum. Dort wird das abzuschneidende Gas extrahiert.

Die Druckverteilung im Entgaser hängt maßgeblich von der Geschwindigkeitsverteilung des Fluids ab. Für die Berechnung gibt es keine geschlossene analytische Lösung, so muss auf numerische Verfahren (CFD) oder Experimente zurückgegriffen werden. Aufgrund der hohen Turbulenzen und Rückströmungen innerhalb des Wirbelzentrums gestaltet sich die Strömungsberechnung als schwierig und bedeutet für die Anwendung von Software hohe Rechenzeit bei der Simulation.

Die Geometrischen Dimensionen und das Design des optimalen Wirbelrohr-Entgasers werden infolgedessen experimentell bestimmt.

Dazu wurde eine experimentelle Geometriestudie begonnen um den optimalen Wirbelkörper zur Gastrennung zu ermitteln, vgl. Abbildung 5. Die entscheidende Messgröße zur Bewertung der unterschiedlichen Konturen des Wälzbehälters ist der Druck im Wirbelzentrum bei gleichbleibenden Randbedingungen. So wurde der tangentielle Einlauf während der Versuchsreihe unverändert belassen.

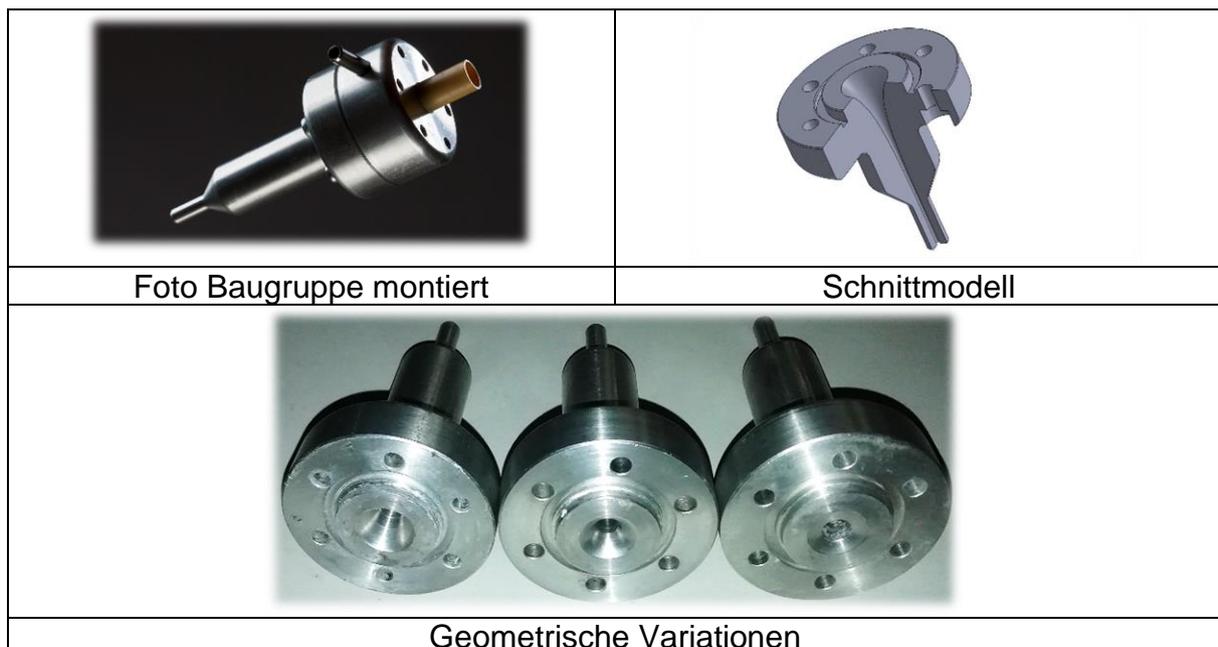


Abbildung 5: Wirbelrohr mit hyperbolischer Geometrie

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Als erster möglicher Ansatz, das freiwerdende Gas entlang der Rotationsachse des Wirbelrohrs zu extrahieren, wurde ein Membranstab zunächst aus semipermeablem Kunststoff, später aus einem keramischen Werkstoff getestet.

3.1. Wirbelrohr-Entgaser mit Membran

Zu Projektbeginn wurden Wirbelrohr-Entgaser mit Membranen getestet.

Hierfür wurde ein membranbasiertes Konzept angedacht, welches Wasser und Gas im Wirbelzentrum separiert. Im ersten Versuch wurde das Wirbelrohr im 3D-Druckverfahren erstellt und als Membran ein semipermeabler Kunststoffschlauch mit Stützhülse eingesetzt, vgl. Abbildung 6.

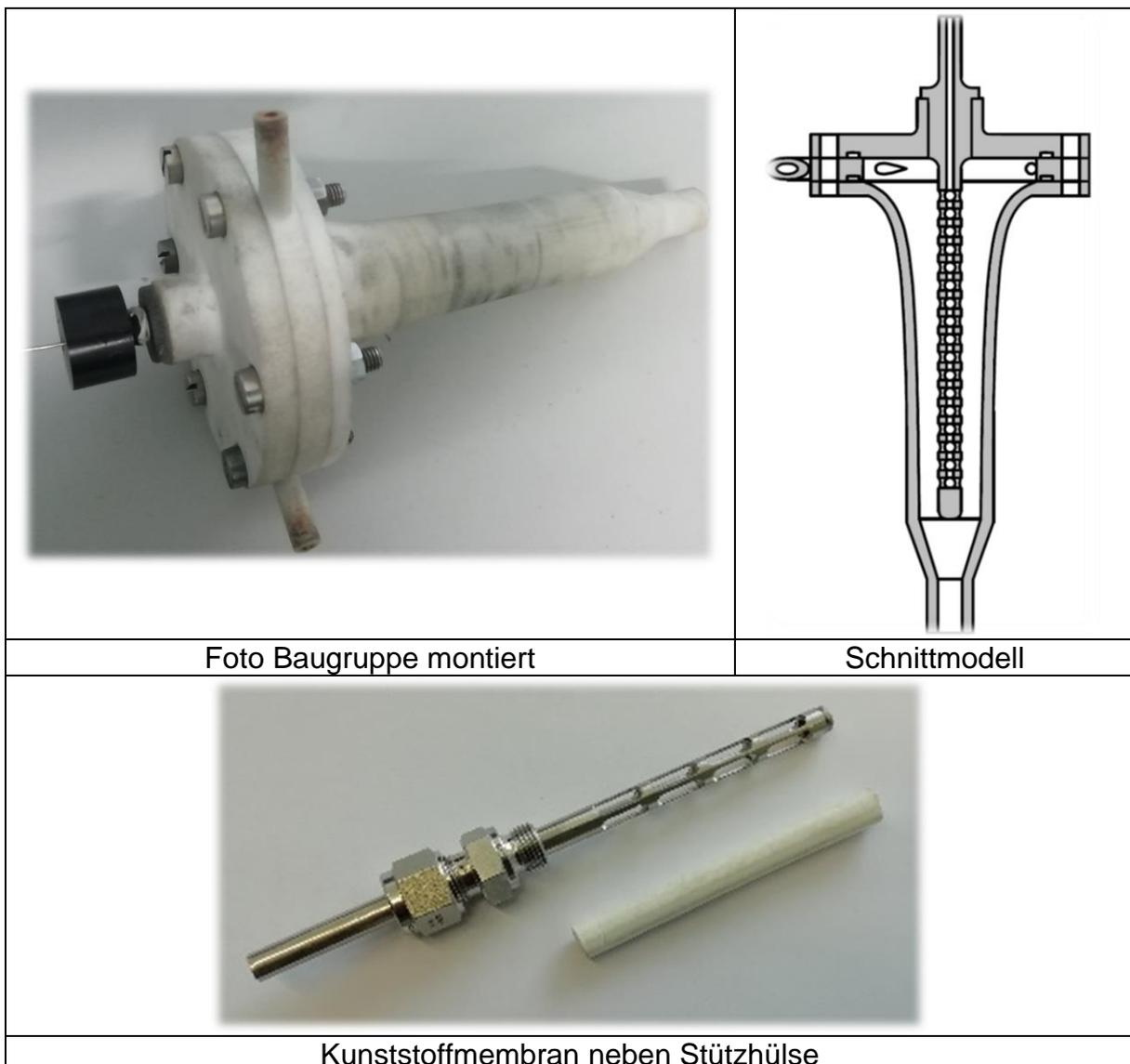


Abbildung 6: Wirbelrohr-Entgaser mit Kunststoffmembran

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Da der Differenzdruck zwischen Wirbelrohrzentrum und Umgebungsdruck nicht ausreichend groß ist, dass Gas mit entsprechendem Volumenstrom passiert, konnte diese Membran nicht eingesetzt werden.

Für eine höhere Variabilität der Porengröße für eine höhere Gasdurchlässigkeit wurde ein Prototyp konstruiert, der verschiedene stabförmige Keramikmembranen zulässt.

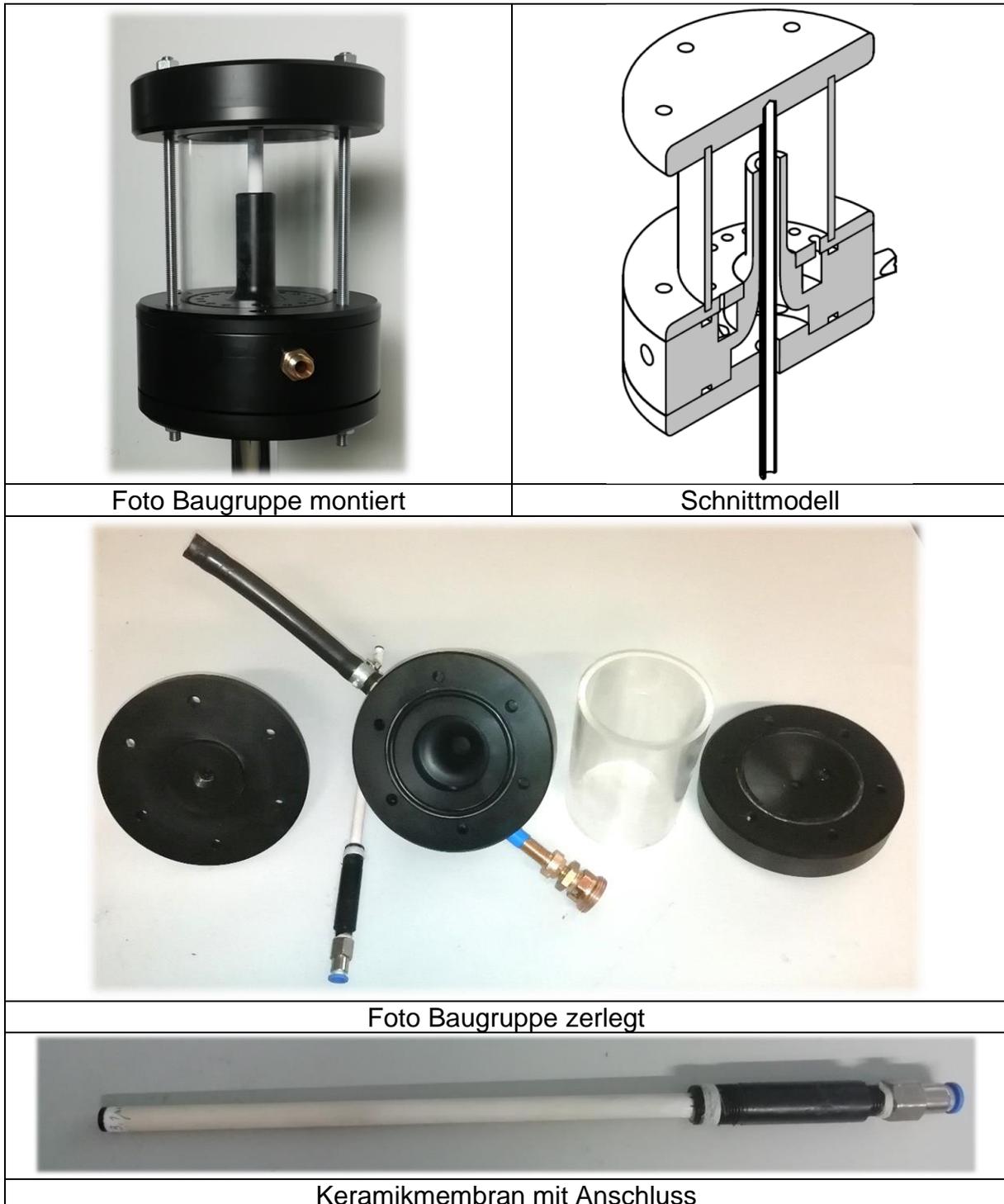


Abbildung 7: Wirbelrohr-Entgaser mit Keramikmembran

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Fazit Wirbelrohr-Entgaser mit Membran

Es konnte kein Membranwerkstoff erfolgreich getestet werden, der bei geringer Wasserdurchlässigkeit einen entsprechend hohen Gasvolumenstrom passieren lässt. Die grobporigen Membranen sind ausreichend gasdurchlässig, führen aber zu hohen Wasser Leckage Mengen. Die feinporigen Membranen im Test extrahieren für die Gasmessung zu wenig Analysegas. Ein Mittelmaß, das im benötigten Druckbereich funktioniert, konnte nicht gefunden werden. Folglich wird dieser Ansatz verworfen und ein membranloses Konzept entwickelt.

3.2. Wirbelrohr-Entgaser membranlos über Umgebungsdrucks

Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu einem kontinuierlichen Entgaser ohne Membran, vgl. Abbildung 8. Das freiwerdende Gas aus dem Wirbelzentrum steigt bei diesem Verfahren aufgrund des Dichteunterschieds gegenüber dem Wasser im Entgasungsbehälter auf, sammelt sich dort und wird in kurzen Zeitabständen über das Luftauslassventil an die Umgebung bzw. zur Gasmessung abgegeben.

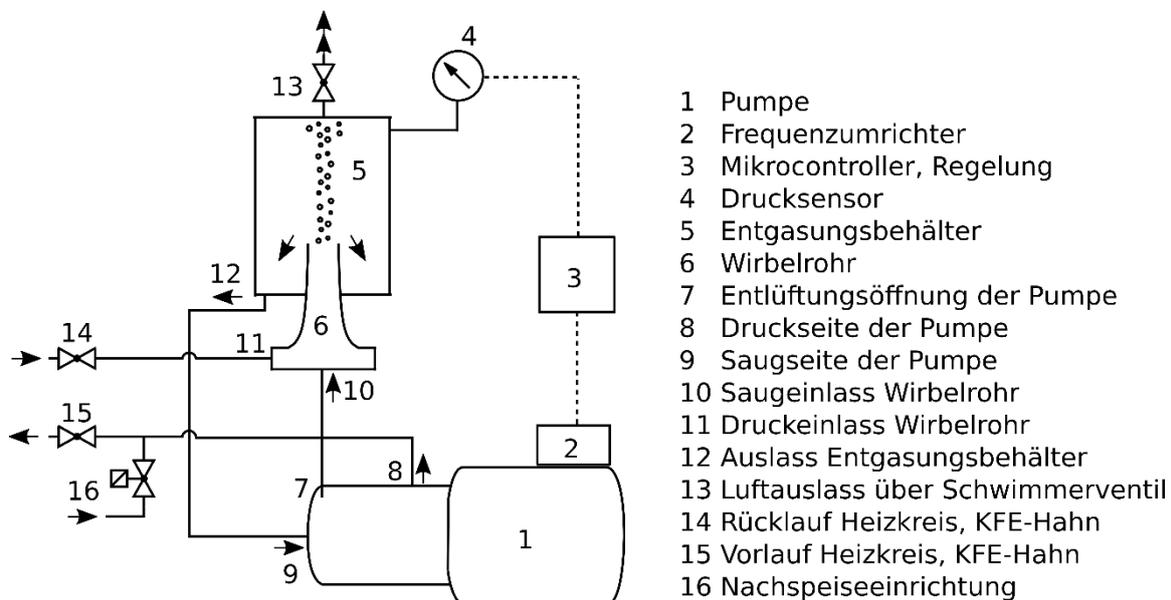
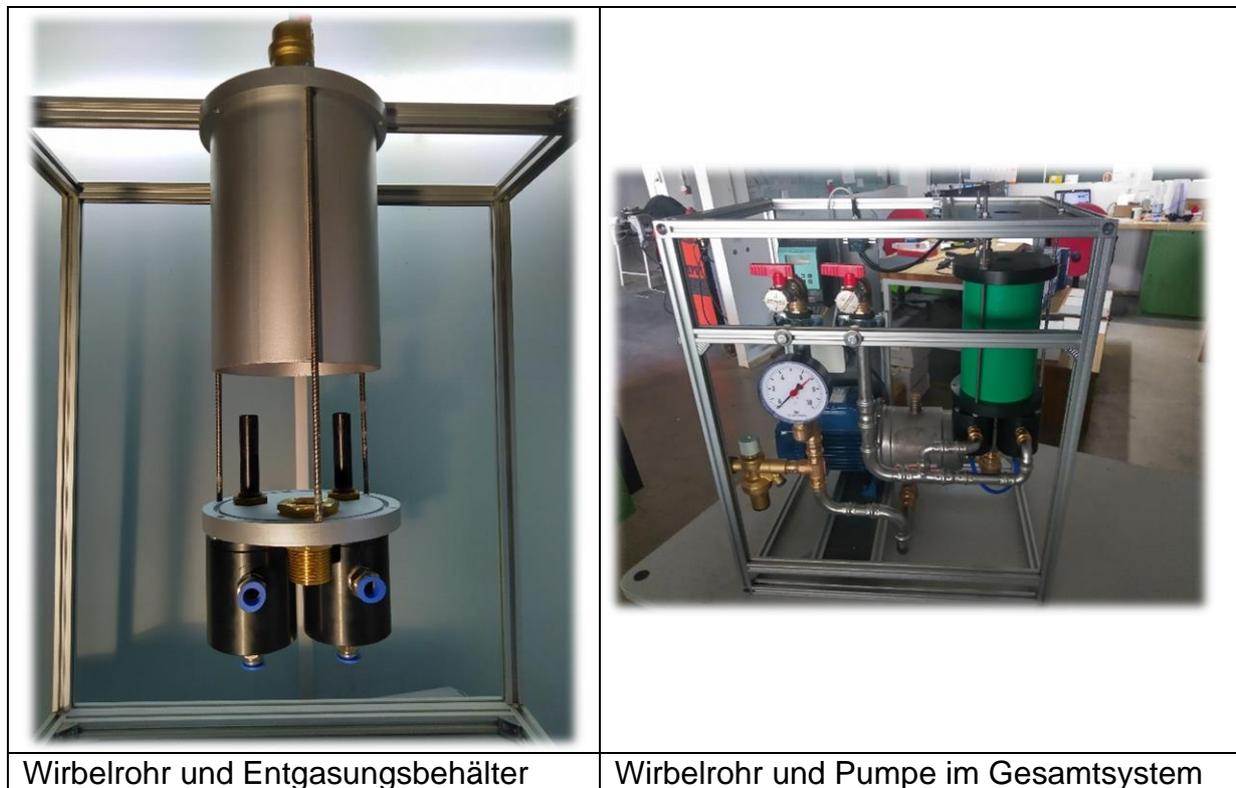


Abbildung 8: Wirbelrohr-Entgaser mit Schwimmerventil - Verfahrensschema

Die Besonderheit an diesem Verfahren ist das integrale Zusammenspiel aus mehrstufiger Kreiselpumpe und Wirbelrohr. Nachfolgend wird die Funktion stichpunktartig erläutert:

- Die Pumpe (1) ist grundsätzlich drehzahlregelt, wobei als Führungsgröße der Druck im Entgasungsbehälter (5) auf 0,05 – 0,1 bar über dem Umgebungsdruck gehalten wird
- So können Gasblasen über den Luftauslass über ein Schwimmerventil (13) kontinuierlich an die Umgebung abgeführt werden
- Gasblasen entwickeln sich sowohl im Wirbelzentrum bei (6), als auch an der Saugseite der Pumpe (9/7)
- Durch die Blende auf der Saugseite (10) des Wirbelrohrs, was eine charakteristische Eigenschaft von entsprechend ausgelegten Wirbelrohren darstellt, fließt ein Volumenstrom von der Entlüftungsöffnung der Pumpe (7) in den Entgasungsbehälter
- Dadurch werden freie Gase aus der Pumpe entfernt und diese dadurch für einen stabilen Betrieb permanent entlüftet
- Der Kreislauf beginnt am Einlass des Wirbelrohrs (11); anschließend fließt das Medium über den Auslass des Entgasungsbehälters (12) zur Saugseite der Pumpe (9) und der Kreislauf wird über die Druckseite der Pumpe (8) Richtung Entnahmestelle des Geothermalwassers geschlossen

Abbildung 9 zeigt das Gesamtsystem Wirbelrohr-Entgaser mit Gas-Volumenstrom Messung, Sensorik und Regelung:



Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb



Prüfstand mit Testumgebung im Hintergrund

Abbildung 9: Wirbelrohr-Entgaser mit Schwimmerventil am Prüfstand

Mit diesem Versuchsaufbau wurden Vorversuche im Labor durchgeführt und die Entgasungseffizienz bestimmt. Die Messdaten werden mit einem Datenerfassungssystem von National Instruments erfasst und die Regelung der Pumpendrehzahl mit LabVIEW realisiert.

Abbildung 10 zeigt die bestimmte relative Entgasungseffizienz des Wirbelrohr-Entgasers mit Schwimmerventil über der Druckdifferenz (Tankdruck – Entgasungsbehälter) aufgetragen für unterschiedliche Wassertemperaturen bei einem Tankdruck (Gleichgewichtszustand) von $6,1 \text{ bar abs}$.

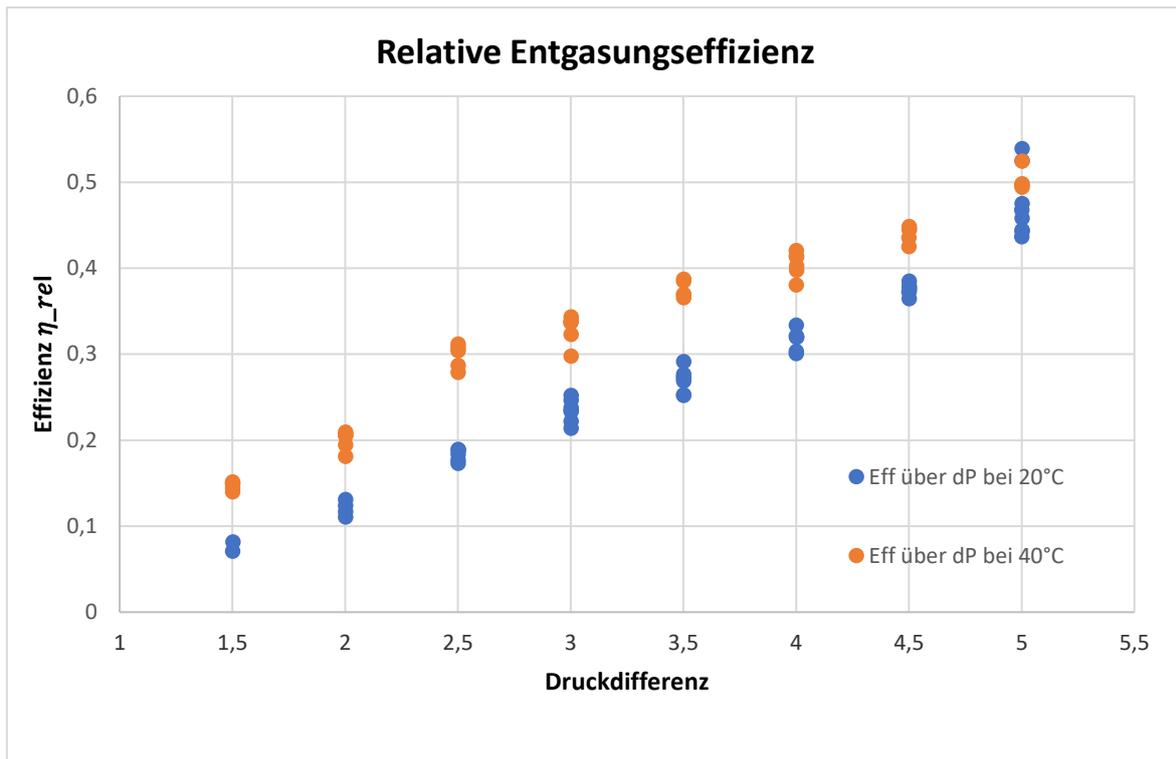


Abbildung 10: Entgasungseffizienz über Druckdifferenz des Wirbelrohr-Entgasers mit Schwimmerventil

Diese Entgasungseffizienz bestimmt sich aus dem gemessenen Gasvolumenstrom $\dot{V}_{Gas,m}$ zum theoretisch freiwerdendem $\dot{V}_{Gas,th}$ bei gegebenem Δp im Gleichgewichtszustand.

$$\eta_{rel} = \frac{\dot{V}_{Gas,m}}{\dot{V}_{Gas,th}}$$

Die Berechnung der Gaskonzentrationen und des theoretisch freiwerdenden Gasstroms ($\dot{V}_{Gas,th}$) im Gleichgewichtszustand wird mittels des Software-Tools PHREEQC [PHREEQC2020] durchgeführt mit den Lösungseigenschaften des örtlichen Trinkwassers.

Fazit Wirbelrohr-Entgaser mit Schwimmerventil

Dieser Aufbau ist zur Entgasung unproblematischer Fluide (geringer Verschmutzungsgrad hinsichtlich Öle, Schaum und Schwebstoffe) bis zu einem Entgasungsdruck von ca. 1,1 bar abs geeignet. Hierbei werden relative Effizienten von bis zu 54 % gemessen, vgl. Abbildung 10. Für eine weitere Effizienzsteigerung muss der Entgasungsdruck weiter abgesenkt werden. Um ein Entgasungs-System auch deutlich unter Umgebungsdruck anbieten zu können, mussten weitere Entwicklungsanstrengungen in Kauf genommen werden.

3.3. Wirbelrohr-Entgaser membranlos unter Umgebungsdruck mit Vakuum

Nach den Laborversuchen des Wirbelrohr-Entgasers mit Schwimmerventil wird dieser vor Einsatz in der Geothermalanlage grundlegend überarbeitet. Es werden folgende Schwachstellen behoben:

- Der Druck im Entgasungsbehälter muss immer oberhalb des Umgebungsdruckes liegen und zusätzlich den Widerstand des Schwimmerventils überwinden. Damit ist es ausgeschlossen das Fluid auf Entgasungsdrücke unter 1 *bar abs* im Gleichgewicht zu entgasen. Diese technische Grenze ist eine deutliche Einschränkung im Einsatzbereich des Gerätes.
- Das verwendete Schwimmerventil zur Gas-Flüssig Trennung ist ein mechanisch bewegtes Bauteil. Verschmutzungen im zu untersuchenden Fluid führen zu Fehlfunktionen des Ventils.
- Die Regelung des Systems auf einen gewünschten Entgasungsdruck im Entgasungsbehälter ist sehr aufwendig. Die Mindestanforderungen dafür sind eine drehzahlgeregelte Pumpe, empfindliche und schnelle Drucktransmitter und eine elektronische Steuerung.

Die Weiterentwicklung substituiert das Schwimmerventil und ein Absenken des Druckniveaus im Entgasungsbehälter unter Umgebungsdruck ist möglich. Die Extraktion freiwerdender Gase aus dem Entgasungsbehälter bei einem Druckniveau unterhalb des Umgebungsdruckes kann nur über eine Vakuumpumpe realisiert werden.

Viele am Markt erhältliche Vakuumpumpen für kleine Volumenströme erzeugen entweder kein besonders niedriges Druckniveau, verunreinigen das abgesaugte Gas mit Öl oder dürfen keinesfalls Wasser ansaugen. Um dennoch ein hohes Vakuum mit einer robusten Anlage zu erzeugen wird auf eine handelsübliche Wasserstrahlpumpe zurückgegriffen, welche in einem gasdichten Sekundärkreis betrieben wird. Mit diesen ist es möglich Vakuum bis 16 mbar absolut (bei 12 °C Wassertemperatur) je nach Wassertemperatur und Fließdruck zu erzeugen. In der verbauten doppelten Ausführung ist eine Saugleistung realisierbar, mit der ein Gasvolumenstrom von bis zu 15 l/min extrahiert werden kann.

Der in Abbildung 11 dargestellte Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe stellt die vorerst letzte Entwicklungsstufe dar und wird im Feldtest zur Analysegasgewinnung eingesetzt.

Die Flüssigkeitspumpe (Mehrstufige Kreiselpumpe) (1) saugt Wasser (3) aus dem Entgasungsbehälter (5) bei niedrigem Ansaugdruck (0,1 - 0,2 bar abs.). Dieser ist beschränkt u.a. durch die Pumpenbauart. Beim Verlassen der Pumpe auf der Druckseite (2) hat das Wasser im Idealfall den Systemdruck, ansonsten werden mehrere Pumpen hintereinandergeschaltet (zwei im Einsatz an der GKT). Nach der Volumenstrom-, Druck- und Temperaturmessung fließt das Wasser zurück in den

Kreislauf (11). Über den Vorlauf (12) wird der Wirbelrohr-Entgaser mit Wasser aus dem Kreislauf versorgt. Dieses strömt nach einer Druckmessung (4) in den Drallerzeuger (6) des Wirbelrohrs, wodurch Druck abgebaut wird und sich das Fluid in Rotation versetzt. Es entsteht ein Wirbel im Entgasungsbehälter (5). Die Zentrifugalkräfte separieren das Fluid effizient von den freiwerdenden Gasen im Niederdruckgebiet und erzeugen eine Gas-Säule im Zentrum des Entgasungsbehälters. Über eine Öffnung an der Deckeloberseite wird das Gas mittels einer Vakuumpumpe (8) abgesaugt (7). Aus Robustheitsgründen (gegenüber Wassereintrag, Verschmutzung, Ablagerungen etc.) wird hier auf eine Wasserstrahlpumpe (Ejektor) zurückgegriffen. Diese wird von einer separaten Pumpe in einem geschlossenen gasdichten Sekundärkreislauf betrieben, aus welchem das Gas mit einem geringen Überdruck (ca. 1 mbar rel.) entweicht. Bevor das Gas der Analyse zugeführt werden kann, muss es noch getrocknet und gekühlt werden (9). Nachgeschaltet befindet sich die Volumenstrommessung (10) und die spezifische Analyse der Gaszusammensetzung (z. B. Gaschromatographie).

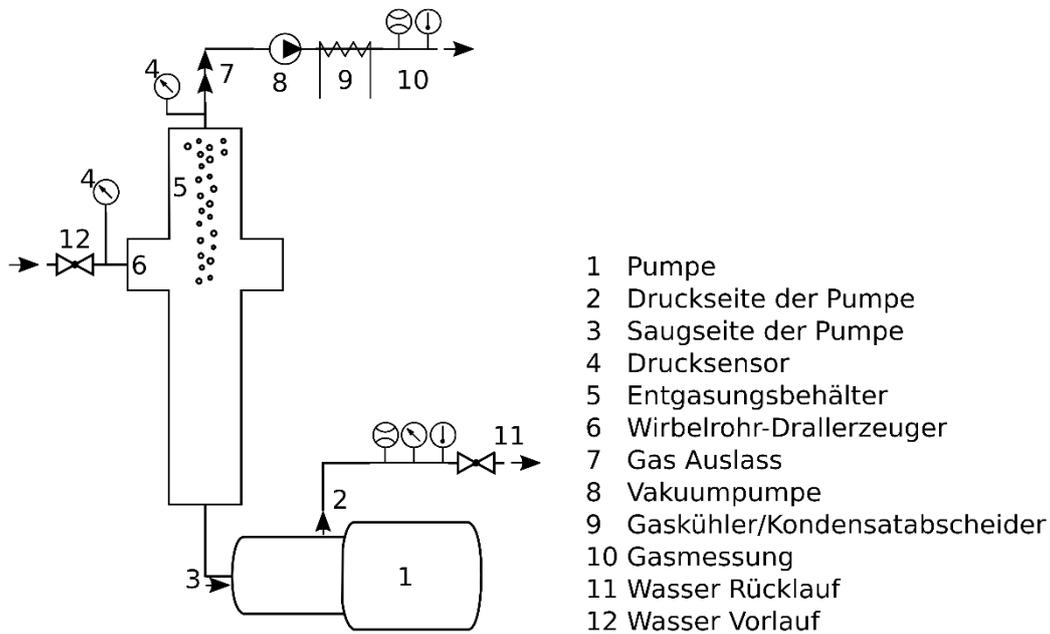


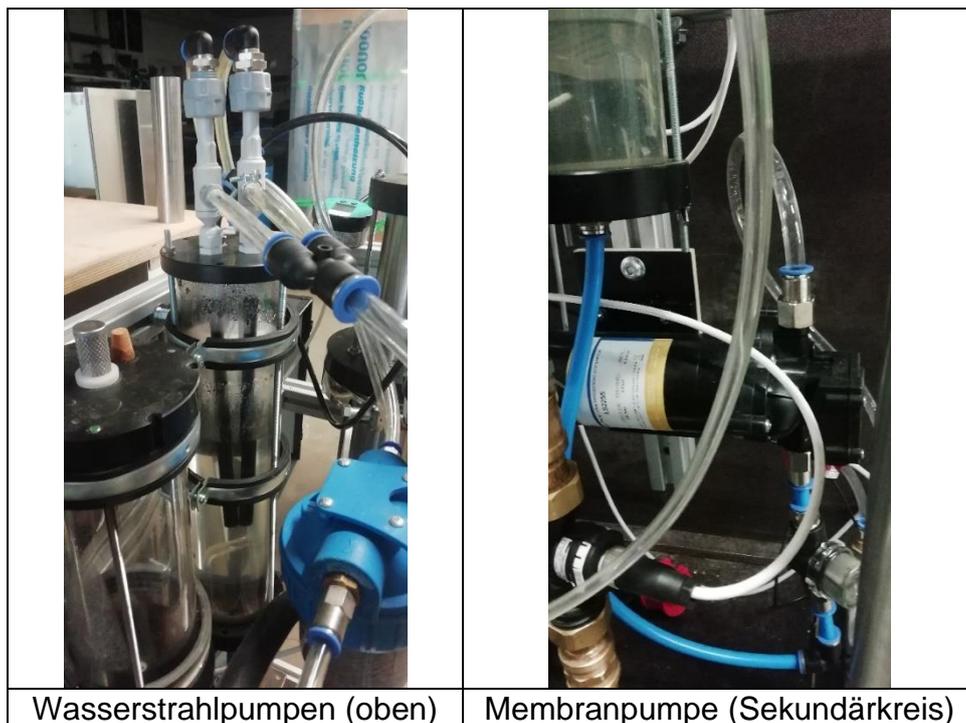
Abbildung 11: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Verfahrensschema

Abbildung 12 zeigt den Edelstahl Entgasungsbehälter (rechts) mit der 1. Kreislumppe (unten) und dem Sekundärkreis (Mitte) zur Vakuumerzeugung.



Abbildung 12: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Frontansicht

Abbildung 13 zeigt links oben die Beiden verwendeten Wasserstrahlpumpen. Diese erzeugen ein Vakuum von 16 mbar absolut (bei 12 °C Wassertemperatur) und fördern einen Gas-Volumenstrom von 15 l/min. Angetrieben werden sie von einer Membranpumpe (rechts), welche Wasser in einem gasdichten Sekundärkreis pumpt.



Wasserstrahlpumpen (oben)

Membranpumpe (Sekundärkreis)

Abbildung 13: Wirbelrohr-Entgaser mit Vakuumpumpe - Detailansicht

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Abbildung 14 zeigt die zur Gas-Volumenstrom Messung verwendete Gasmessglocke. Das Gas strömt auf der Oberseite ein und verdrängt das Wasser in einen Ausgleichsbehälter. Ein Ultraschall-Distanzsensord (Fa. Baumer UR18.DA0.2) misst den Abstand der Wasseroberfläche zum Deckel. Über den Durchmesser wird daraus das Volumen des eingeschlossenen Gases bestimmt. Nach einer vorgegebenen Füllmenge öffnet ein Motorkugelhahn den Auslass und das Gas entweicht. Die Dauer bis zum erneuten Erreichen des Füllstands führt zur Berechnung des Gasvolumenstroms. Über eine zusätzliche Druck und Temperaturmessung wird das gemessene Gasvolumen auf Normliter nach ISO 2533 umgerechnet.



Abbildung 14: Gas-Volumenstrommessung mittels Gasmessglocke

Abbildung 15 zeigt den gesamten Aufbau von Oben.

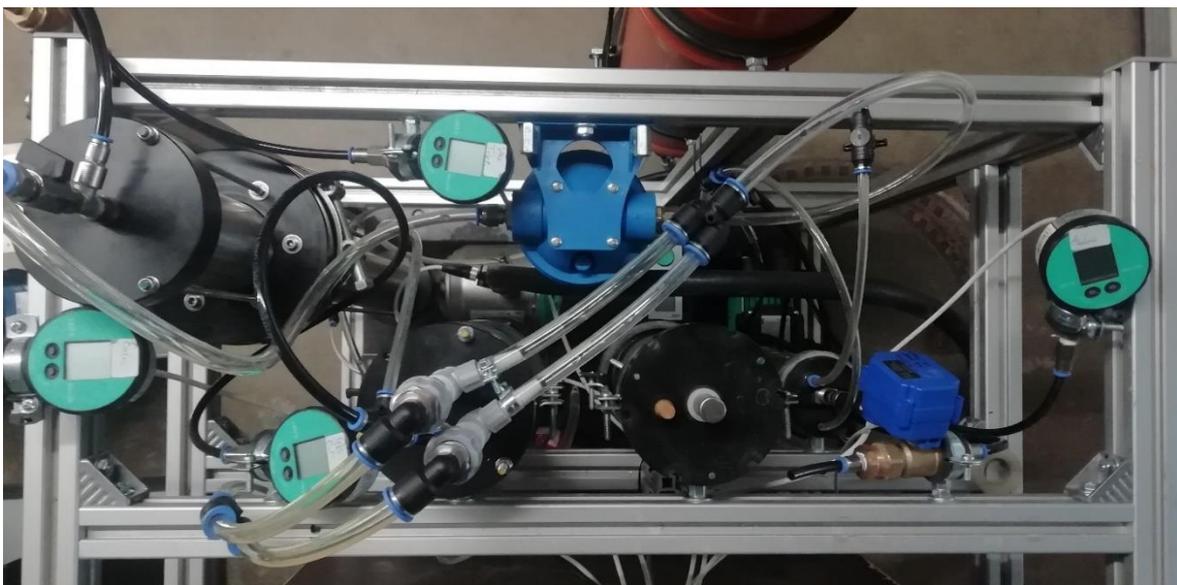


Abbildung 15: Wirbelrohr-Entgaser – Gesamtaufbau mit Messtechnik

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

4. Berechnung der Extraktion von Gasen aus Geothermalwasser am Beispiel GK Traunreut

Eine Lösung ist ein einphasiges Gemisch aus einem Lösungsmittel und einem oder mehreren darin gelöster Stoffe. Die Löslichkeit gibt die Menge an, die bei einer bestimmten Temperatur und Druck in einem Lösungsmittel aufgenommen wird. Bei Gasen nimmt die Löslichkeit mit sinkender Temperatur und steigendem Druck im Allgemeinen zu [Kurzweil2020].

Zur Bestimmung des Löslichkeitsverhaltens von Gasen in Flüssigkeiten wird üblicherweise das Henry-Gesetz verwendet. Es beschreibt die Proportionalität zwischen dem Partialdruck eines Gases über und der Konzentration des Gases in der Flüssigkeit. Die Henry-Löslichkeitskonstante H^{cp} ist definiert als:

$$H^{cp} = \frac{c_l}{p}$$

mit der Konzentration des Gases in der Flüssigphase c_l [$\frac{mol}{m^3}$] und dem Partialdruck des Gases p [Pa].

Die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit wird beschrieben durch:

$$\frac{\partial \ln(H^{cp})}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{-\Delta_{sol}H}{R}$$

Integration führt auf:

$$H^{cp}(T) = H_0^{cp} \exp\left(\frac{-\Delta_{sol}H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

mit der Henry-Löslichkeitskonstante $H^{cp}(T)$ bei der Temperatur T [K].

Die Konstanten H_0^{cp} , die Lösungsenthalpie $\Delta_{sol}H$ und die Gaskonstante R sowie der Term $\frac{-\Delta_{sol}H}{R}$ sind tabelliert für die Bezugstemperatur $T_0 = 298,15$ K, nach [Sander2015].

Damit kann die Konzentration der Gasphase in der Flüssigkeit im Gleichgewichtszustand berechnet werden.

Sind mehrere Gase mit unterschiedlichen Löslichkeiten beteiligt, werden numerische Berechnungsmethoden, mittels PHREEQC verwendet.

In einem beispielhaften Geothermalwasser sind folgende Gase gelöst:

| | | |
|---------------------|---------------|------------|
| Wasserstoff | Nml/kg | 0,044 |
| Sauerstoff | Nml/kg | <0,01 |
| Stickstoff | Nml/kg | 20,8 |
| Kohlenstoffdioxid | Nml/kg | 54,6 |
| Methan | Nml/kg | 31,75 |
| Ethan | Nml/kg | 0,1314 |
| Propan | Nml/kg | 0,0036 |
| Butan | Nml/kg | 0,0007 |
| Pentan | Nml/kg | <0,00022 |
| Ethen | Nml/kg | <0,00011 |
| Propen | Nml/kg | <0,00011 |
| Helium | Nml/kg | <0,0547 |
| Argon | Nml/kg | 0,5 |
| Schwefelwasserstoff | Nml/kg | 0,04 |
| Summe Gase | Nml/kg | 108 |

Tabelle 1: Wasseranalyse, Auszug der gelösten Gase

Um Ablagerungen vorzubeugen werden zusätzlich $20 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ CO₂ vor der Förderpumpe injiziert. Dieses soll durch Entgasung dem Wasser vor der Reinjektionsbohrung wieder entzogen werden.

Hierfür wird das gesamte Thermalwasser nach den Wärmetauschern bei einem Druck von 9 bar absolut ($9 * 10^5 \text{ Pa}$) und einer Temperatur von 65 °C (338,15 K) dem Entgasungssystem zugeführt. Ziel ist eine Absenkung des CO₂ Gehaltes von $74,6 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ auf die ursprünglichen $54,6 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$.

Es werden nur die Hauptkomponenten betrachtet. Weiter wird das Gasgemisch als ideal angesehen. Mit der zusätzlichen CO₂ Injektion von $20 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ ergibt sich eine Gesamtkonzentration von $128 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ an gelösten Gasen im Wasser.

Die Zusammensetzung der gelösten Gase wird vereinfacht zu:

- Kohlenstoffdioxid CO₂ $75 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}} = 3,08 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$
- Methan CH₄ $32 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}} = 1,31 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$
- Stickstoff N₂ $21 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}} = 0,86 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$

mit den tabellierten Werten der Henry-Konstanten bei $T_0 = 298,15 \text{ K}$:

| Stoff | H_0^{cp} [mol/(m ³ Pa)] | $\frac{-\Delta_{sol}H}{R}$ [K] |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Kohlenstoffdioxid CO ₂ | $3,4 * 10^{-4}$ | 2400 |
| Methan CH ₄ | $1,4 * 10^{-5}$ | 1600 |
| Stickstoff N ₂ | $6,4 * 10^{-6}$ | 1300 |

Tabelle 2: Henry-Konstanten der Hauptkomponenten, nach [Sander2015]

Umgerechnet auf die vorherrschende Wassertemperatur von $T = 338,15 \text{ K}$:

- CO₂ $H_{CO_2}^{cp}(T) = 1,31 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{Pa}}$
- CH₄ $H_{CH_4}^{cp}(T) = 7,42 * 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{Pa}}$
- N₂ $H_{N_2}^{cp}(T) = 3,82 * 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{Pa}}$

Daraus bestimmen sich die Partialdrücke mit:

$$p = \frac{c_l}{H^{cp}}$$

und den Konzentrationen c_l zu:

- CO₂ $p_{CO_2} = \frac{3,08 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{1,31 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{Pa}}} = 2,34 * 10^4 \text{ Pa} = 0,234 \text{ bar}$
- CH₄ $p_{CH_4} = \frac{1,31 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{7,42 * 10^{-6} \text{ mol}/(\text{m}^3 \text{Pa})} = 1,77 * 10^5 \text{ Pa} = 1,77 \text{ bar}$
- N₂ $p_{N_2} = \frac{0,86 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{3,82 * 10^{-6} \text{ mol}/(\text{m}^3 \text{Pa})} = 2,24 * 10^5 \text{ Pa} = 2,24 \text{ bar}$

Der Sättigungsdruck, bei dem das Wasser Gasblasen bildet, ergibt sich als Summe der Partialdrücke:

$$p = p_{CO_2} + p_{CH_4} + p_{N_2} = 4,24 \text{ bar}$$

Eine Reduktion des CO₂ auf $55 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ führt zu einem Partialdruck von $0,172 \text{ bar}$.

Werden $20 \frac{\text{Nml}}{\text{kg}}$ ($0,89 \frac{\text{mmol}}{\text{kg}}$) CO₂ aus dem Wasser entfernt ist nach Gleichgewichtsreaktionen, berechnet mit [PHREEQC2020], dafür ein Entgasungsdruckniveau von $0,84 \text{ bar abs.}$ notwendig.

Fazit:

Um die injizierten $20 \frac{Nml}{kg}$ aus dem Geothermalwasser zu entfernen muss der gesamte Volumenstrom auf $0,84 \text{ bar}$ um $\Delta p = 8,16 \text{ bar}$ entspannt werden.

Bei einem Wasservolumenstrom von $185 \frac{l}{s}$ werden dabei $724 \frac{Nl}{min}$ (Gasgehalt im Wasser von $65 \frac{Nml}{kg}$) an Gas frei:

$$\begin{aligned} - \text{CO}_2 & 20 \frac{Nml}{kg} & = & 222 \frac{Nl}{min} \\ - \text{CH}_4 & 26 \frac{Nml}{kg} & = & 292 \frac{Nl}{min} \\ - \text{N}_2 & 19 \frac{Nml}{kg} & = & 211 \frac{Nl}{min} \end{aligned}$$

Die bei der Entspannung des Wassers auf das Entgasungsniveau nutzbare Leistung ist $P = \Delta p * \dot{V} = 151 \text{ kW}$. Wird die Entspannung über eine Turbine in den Entgasungsbehälter realisiert, kann die gewonnene Leistung direkt zur anschließenden Druckerhöhung auf das Ausgangsniveau verwendet werden. Als zusätzliche elektrische Leistung werden nur die Wirkungsgradverluste der Strömung, Pumpe und Turbine benötigt.

5. Beschreibung der Testumgebung und des Prüfstandsbaus im Labor

Zur Herstellung eines Testfluids besteht die Aufgabe darin Wasser bei gegebenem Druck und Temperatur vollständig mit Luft zu sättigen. Dazu wurde ein 500 Liter Edelstahltank verwendet, vgl. Abbildung 16. Nach der Befüllung mit Wasser (ca. 250 l) wird zur Begasung Druckluft über einen Belüfter am Behälterboden eingebracht, bis das gewünschte Druckniveau erreicht ist. Über ein einstellbares Ventil wird der Druck konstant gehalten. Das Wasser wird am Tankboden abgesaugt und mittels Hochdruckpumpe im oberen Bereich des Behälters versprüht. Dieser Kreislauf sorgt für die Anreicherung des Wassers mit Luft. Ein Kaltwassersatz (Wärmepumpe) mit Mischer und Wärmetauscher dient der Temperaturhaltung des Wassers im Tank, vgl. Abbildung 17. Diese kann von $5-80 \text{ °C}$ frei gewählt werden. Nach ausreichender Wartezeit, wenn zur Druckhaltung keine Luftzugabe mehr nötig ist, ist das Sättigungsgleichgewicht erreicht.

Zusätzlich wird das Erreichen des Sättigungsgleichgewichtes mittels Sauerstoffmessgerät der Firma Mettler Toledo (SevenGo pro – dissolved oxygen) sichergestellt.

Abbildung 16 zeigt den gedämmten Edelstahltank, in dem sich am Boden die Belüftungseinheit befindet.



Abbildung 16: Tank, Sensorik und Umwälzung

Abbildung 17 zeigt den Kaltwassersatz, der reversibel auch als Wärmepumpe funktioniert, mit einem Mischer und Zwischenspeicher. Dadurch ist es möglich das Wasser im Edelstahltank die Temperatur auf ± 1 K genau einzustellen.



Abbildung 17: Kaltwassersatz (Wärmepumpe) mit Mischer und Zwischenspeicher

In Abbildung 18 ist das Verfahrensschema mit Sensorik dargestellt. Der Aufbau diente während der Prototypenentwicklung als Testumgebung.

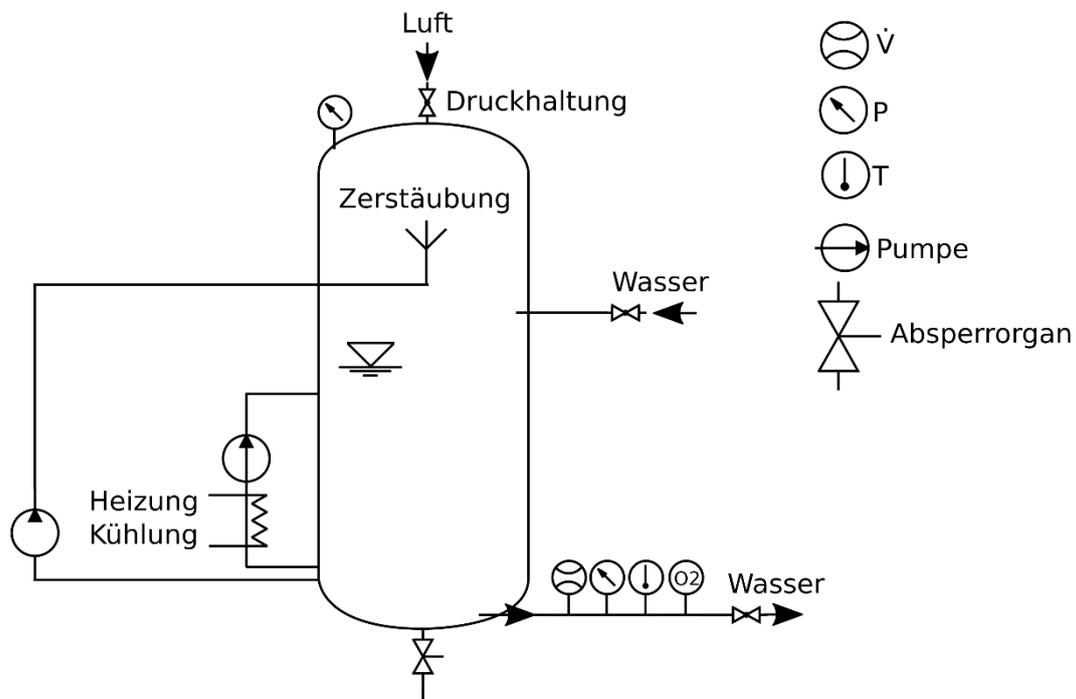


Abbildung 18: Verfahrensschema der Testumgebung im Labor

In diesem Versuchsaufbau können folgende Randbedingungen eingestellt werden, die sich an der Geothermal-Anlage orientieren:

| Bezeichnung | Bereich | Einheit |
|-------------------------|------------|-------------|
| Sättigungsdruck im Tank | 1,5 – 10 | bar absolut |
| Einlassdruck Entgaser | 1,5 – 10 | bar absolut |
| Volumenstrom Testfluid | 5 – 30 | l/min |
| Temperatur | 5-80 | °C |
| Gasbeladung | 12-250 | Nml/kg |
| Volumenstrom Gas | 0,05 – 1,5 | NI/min |

Tabelle 3: Randbedingungen der Laborumgebung

Je nach Druck und Temperaturniveau lassen sich unterschiedliche Gasbeladungen realisieren. Im Versuchsaufbau reichen diese von $12 - 250 \frac{Nml}{kg}$.

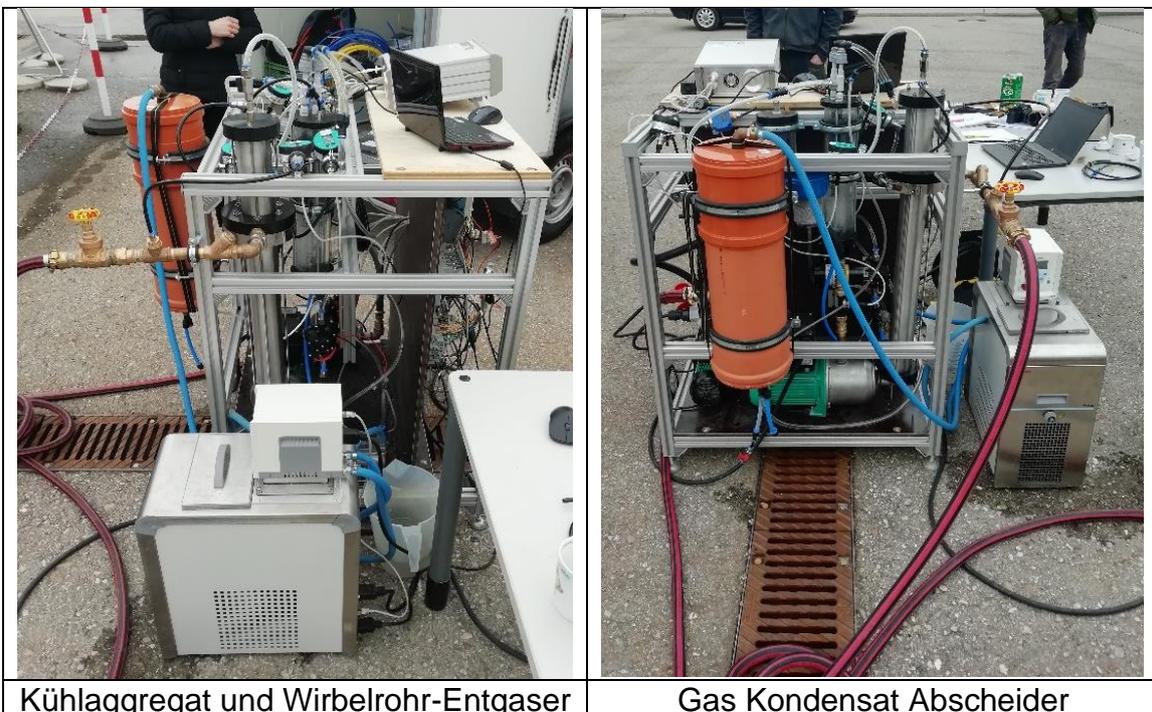
Die Gasbeladungen des Geothermalwassers in Traunreut von $100 - 130 \frac{Nml}{kg}$ lassen sich im Versuchsaufbau damit nahezu vollständig abbilden.

Die erfolgreiche Herstellung des Testfluids in diesem Gasbeladungsbereich war ein wichtiger Meilenstein im Projekt.

6. Feldtest – Entgasung an der Geothermianlage

Die Zielsetzung, eine kontinuierliche Bestimmung der im Wasser gelösten Gase, wird anhand eines Feldtests am Geothermiekraftwerk überprüft. Die Gaschromatographie und Analyse der Ergebnisse werden begleitet von Prof. Thomas Baumann der Technischen Universität München.

Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau auf der Freifläche der Geothermianlage. Das Geothermalwasser wird nach den Wärmetauschern vor der Reinjektionsbohrung im Bypass entnommen und stromabwärts wieder zugeführt. Der vorliegende Anlagendruck an der Entnahmestelle beträgt $8,8 \text{ bar abs}$ bei einer Temperatur von 65 °C .



Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb



Versuchsaufbau mit Druckerhöhungspumpen
 Abbildung 19: Versuchsaufbau im Feldtest an der Geothermieanlage

Das Geothermalwasser strömt über ein Drosselventil und den Drallerzeuger in den Entgasungsbehälter. Im stabilen stationären Betrieb am Testtag wird dort das Wasser auf einen Druck von 0,34 *bar abs* entspannt. Der Wasservolumenstrom beträgt hierbei $13,08 \frac{l}{min}$. Der extrahierte Gasvolumenstrom bestimmt sich nach dem Auskondensieren des Wasserdampfes bei 13,6 °C zu $1,227 \frac{Nl}{min}$. Umgerechnet auf den Geothermalwasserstrom ergibt das eine mittlere Extraktionsmenge von $95,71 \frac{Nml}{kg}$, vgl. Abbildung 20:

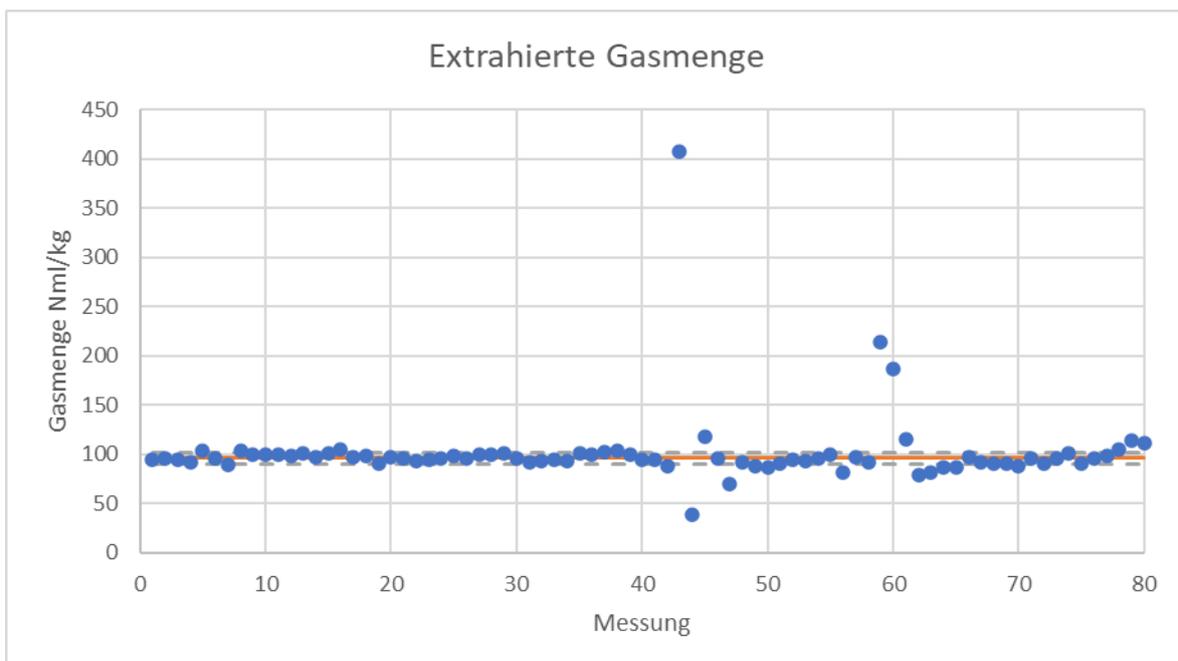


Abbildung 20: Extrahierte Gasmenge im Feldtest

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

Während des Feldversuchs wurden zusätzlich $35 \frac{mg}{L}$ ($17,8 \frac{Nml}{kg}$) CO_2 in die Förderbohrung injiziert. Damit ergibt sich eine theoretische Gaszusammensetzung wie in Tabelle 1: Wasseranalyse, Auszug der gelösten Gase, Seite 26 dargestellt. Nachfolgende Tabelle 4 ist identisch bis auf die angepasste CO_2 Konzentration.

| | | |
|---------------------|---------------|--------------|
| Wasserstoff | Nml/kg | 0,044 |
| Sauerstoff | Nml/kg | <0,01 |
| Stickstoff | Nml/kg | 20,8 |
| Kohlenstoffdioxid | Nml/kg | 72,4 |
| Methan | Nml/kg | 31,75 |
| Ethan | Nml/kg | 0,1314 |
| Propan | Nml/kg | 0,0036 |
| Butan | Nml/kg | 0,0007 |
| Pentan | Nml/kg | <0,00022 |
| Ethen | Nml/kg | <0,00011 |
| Propen | Nml/kg | <0,00011 |
| Helium | Nml/kg | <0,0547 |
| Argon | Nml/kg | 0,5 |
| Schwefelwasserstoff | Nml/kg | 0,04 |
| Summe Gase | Nml/kg | 125,8 |

Tabelle 4: Zusammensetzung des Geothermalwassers (Analyse von 2019) mit zusätzlicher CO_2 Injektion

Die Lösung dieser Gase im Geothermalwasser wird mittels [PHREEQC2020] berechnet.

Bei Druckabsenkung auf das Niveau des Entgasungsbehälters als Gleichgewichtszustand ($0,34 \text{ bar abs. } 65^\circ C$) werden nach der numerischen Berechnung $113,9 \frac{Nml}{kg}$ Gas frei (abzüglich des kondensierten Wasserdampfes von $299,1 \frac{Nml}{kg}$). Mit den gemessenen extrahierten $95,71 \frac{Nml}{kg}$ ergibt sich eine relative Entgasungseffizienz von 84% und eine absolute Effizienz von 76%.

Dabei bezieht sich die relative Effizienz auf das Verhältnis der gemessenen Gasmenge zur theoretisch freiwerdenden Gasmenge bei einem definierten Druckniveau. Die absolute Effizienz bezieht sich auf die gemessene Gasmenge zur insgesamt im Fluid gelösten Gasmenge.

Weiter werden die relevanten und analysierten Hauptbestandteile des extrahierten Analyse-gases (Gleichgewicht 0,34 bar abs. 65°C) berechnet:

| | | | | |
|-------------------|--------|-------|--------|----|
| Stickstoff | Nml/kg | 20,66 | Vol. % | 18 |
| Kohlenstoffdioxid | Nml/kg | 62,05 | Vol. % | 54 |
| Methan | Nml/kg | 31,04 | Vol. % | 27 |

Tabelle 5: Berechnete Zusammensetzung des extrahierten Gases

Die Bestandteile werden mit den Messungen aus der GC verglichen. Abbildung 21 zeigt den Messaufbau zur Analyse des extrahierten Gases mittels Micro-GC.

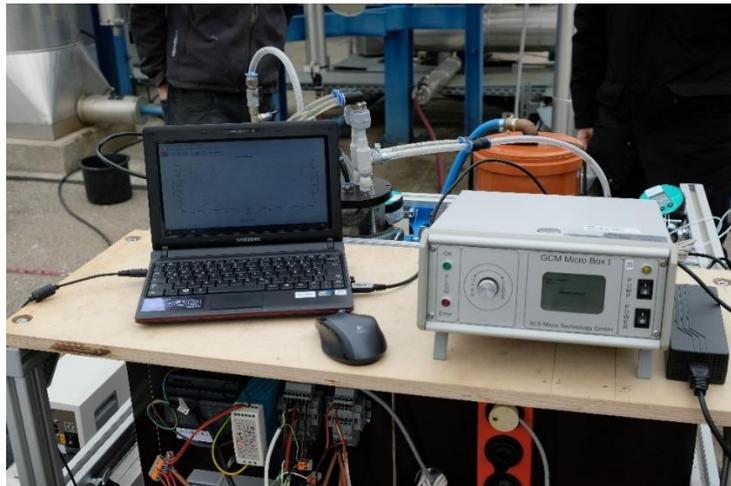


Abbildung 21: Micro-GC im Feldtest

Die Ergebnisse der GC sind in Abbildung 22 und Tabelle 6 dargestellt. Neben der zu untersuchenden CO₂ Konzentration wurden Stickstoff, Methan und Schwefelwasserstoff messtechnisch erfasst.

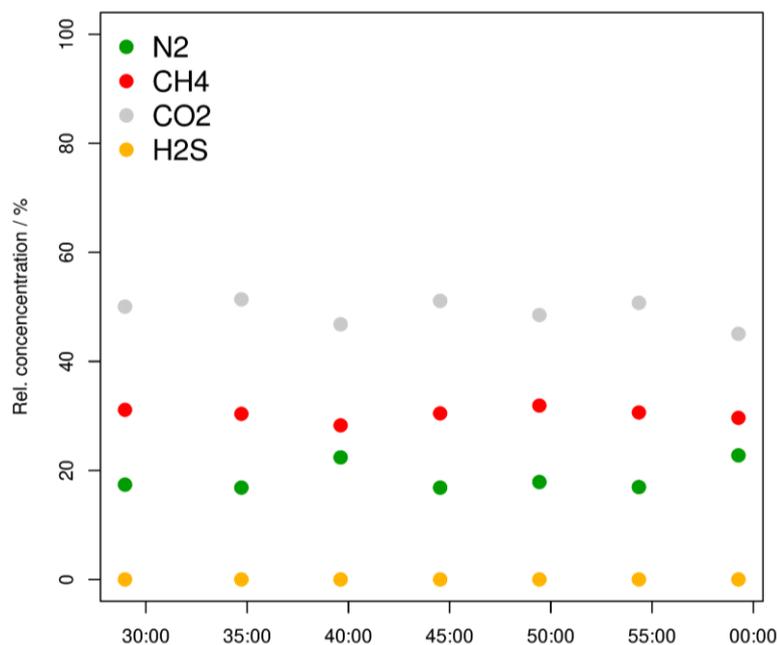


Abbildung 22: Relative Gaskonzentrationen; Gasanalyse durch Prof. Baumann (Lehrstuhl für Hydrogeologie, TUM) mit Elster GCM-Box I (Elster GmbH, Mainz-Kastel), HSA-Säule

Kontinuierlich arbeitende Wirbelrohr-Entgasung von Geothermalwasser zur variablen Druckregelung des Thermalwasserkreislaufs für einen optimierten Anlagenbetrieb

| | | |
|--------------------------------------|--------|------|
| Stickstoff N ₂ | Vol. % | 18,7 |
| Kohlenstoffdioxid CO ₂ | Vol. % | 49,1 |
| Methan CH ₄ | Vol. % | 30,3 |
| Schwefelwasserstoff H ₂ S | Vol. % | 0,01 |

Tabelle 6: Relative Gaskonzentrationen; Gasanalyse durch Prof. Baumann (Lehrstuhl für Hydrogeologie, TUM) mit Elster GCM-Box I (Elster GmbH, Mainz-Kastel), HSA-Säule

Die Gaszusammensetzung des extrahierten Gasstromes wird messtechnisch ermittelt und mit den Werten aus der numerischen Berechnung verglichen. Die Gegenüberstellung in Tabelle 7 zeigt die Übereinstimmung der Hauptkomponenten CO₂, N₂, und CH₄ mit einer maximalen Abweichung von 11%.

| Bezeichnung | Messung | | Berechnung | | Abweichung |
|--------------------------------------|---------|------|------------|----|------------|
| | Vol. % | | Vol. % | | |
| Stickstoff N ₂ | Vol. % | 18,7 | Vol. % | 18 | 4 % |
| Kohlenstoffdioxid CO ₂ | Vol. % | 49,1 | Vol. % | 54 | 10 % |
| Methan CH ₄ | Vol. % | 30,3 | Vol. % | 27 | 11 % |
| Schwefelwasserstoff H ₂ S | Vol. % | 0,01 | Vol. % | - | - |

Tabelle 7: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Gaszusammensetzung

Der Feldversuch zeigt erfolgreich die Anwendbarkeit des entwickelten Wirbelrohr-Entgasers in der Geothermieanlage. Mit einer Effizienz von 84% relativ (76% absolut) werden die gelösten Gase aus dem Wasser extrahiert. Die nachgeschaltete Gasanalyse bildet die berechneten Werte innerhalb einer Abweichung von maximal 11% ab.

7. Fazit

Die Anwendbarkeit des entwickelten Entgasungssystems an der Geothermieranlage wurde in einem Feldversuch gezeigt. Es konnte ein kontinuierlicher Gasvolumenstrom mit hoher Effizienz (76% aller gelösten Gase wurden extrahiert) entnommen werden. Die nachgeschaltete Gasanalyse aus Volumstrommessung und Gaschromatographie bildet die berechneten Werte mit einer Abweichung von 4 – 11 % ab. Der Aufbau ist somit geeignet eine Online-Gasanalyse des Geothermalwassers umzusetzen.

Die Entwicklung des Entgasungssystems bedingt einen mit der Geothermie vergleichbaren Versuchsaufbau im Labor. Die Gasbeladungen vergleichbar zur Geothermie konnten gut im Labor mit Druckluft und Wasser reproduziert werden. Die Drücke und Temperaturen wurden im Prüfstands-aufbau nur teilweise erreicht (max. 10 bar und 80 °C). Dennoch konnten die geothermalen Gasbeladungen im Labor simuliert werden. Dies war ein wichtiger Meilenstein und ermöglichte die Entwicklung des Entgasungssystems für die Geothermie.

Durch die hohe Entgasungseffizienz eignet sich das System auch zur quantitativen Entgasung des Geothermalwassers. Dies eröffnet eine Begleitgasnutzung zur Gewinnung zusätzlicher Rohstoffe.

Das entwickelte Entgasungssystem mit Gasanalyse oder Gaschromatographie zur Online Thermalwasseranalyse kann mit kleinen Anpassungen an die jeweiligen Druckverhältnisse an jeder Geothermieranlage eingesetzt werden.

Eventuell auftretende Scaling Probleme können erst mit zukünftigen Langzeittests im realen Einsatz vorhergesagt werden.

Literaturverzeichnis

[Geothermie2021] <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html>, abgerufen am 25.03.2021

[Schröder2009] „SCHRÖDER, Hartwig; HESSHAUS, A. Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen. Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe S, 2009, 134. Jg“

[Hydrogroup2018] <https://www.hydrogroup.de/einsatzbereiche/industrie-kraftwerke-gewerbe/entgasung.html> Verfahren zur Entgasung, RWT GmbH 01/2018

[Kurzweil2019] KURZWEIL, Peter. *Chemie: Grundlagen, technische Anwendungen, Rohstoffe, Analytik und Experimente*. Springer-Verlag, 2019.

[Sander2015] SANDER, Rolf. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15. Jg., Nr. 8, S. 4399-4981.

[PHREEQC2020] <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>