

# Entwicklung und Erprobung eines Bohrkopfs für Tiefengeothermie basierend auf dem Elektro-Impuls-Verfahren

**Matthias Voigt\*, Steffen Großmann, Joachim Speck, Erik Anders**

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik,  
TU Dresden, Mommsenstraße 10, D-01062 Dresden,  
Tel.: +49 351 463-33080, [voigt@ieeh.et.tu-dresden.de](mailto:voigt@ieeh.et.tu-dresden.de), [www.tu-dresden.de/etieeh](http://www.tu-dresden.de/etieeh)

**Kurzfassung:** Die Geothermie ist neben Wasserkraft eine der wenigen kontinuierlich zur Verfügung stehenden regenerativen Energien. Mithilfe der Stromproduktion solcher Anlagen kann die Grundlast der Elektroenergieversorgung zu großen Teilen abgedeckt werden. Geothermie ist jedoch nur in wenigen Regionen nahe der Erdoberfläche nutzbar. Zumeist sind Bohrungen bis in eine Tiefe von 3000 bis 5000 m notwendig, um Temperaturen von etwa 200 °C zu erreichen. Diese Bohrungen sind sehr zeit- und kostenintensiv, da aufgrund des Verschleißes durch das harte Tiefengestein Bohrmeißel nach etwa 50 h ersetzt werden müssen, wodurch eine Bohrgeschwindigkeit von maximal 1 bis 2 m/h erreicht werden kann. Mit dem Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) können Bohrungen in Tiefengestein verschleißarm durchgeführt werden, wodurch die erreichbare Bohrgeschwindigkeit ansteigt und somit die Kosten erheblich gesenkt werden können.

**Keywords:** Tiefengeothermie, Bohrkopf, Elektro-Impuls-Verfahren

## 1 Motivation

Der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen wird aufgrund des Rückgangs der fossilen Rohstoffe im 21. Jahrhundert eine große Herausforderung darstellen. Neben Wind-, Solar- und Wasserkraftwerken rücken verstärkt auch Geothermieranlagen in den Mittelpunkt. Die Erdwärme hat dabei den Vorteil, dass sie ohne äußere Einflüsse kontinuierlich Energie zur Verfügung stellt und somit zur Abdeckung der Grundlast der elektrischen Energieversorgung eingesetzt werden kann. Die Wirtschaftlichkeit derartiger Kraftwerke ist eng mit der Bohrtechnologie zum Abteufen der benötigten Bohrungen verknüpft. Konventionelles Tiefbohrerquipment entstammt meist der Öl-/Gasindustrie und ist nicht für hochfeste Hartgesteine wie Granit entwickelt worden. Daher muss ein neues Bohrverfahren entwickelt werden, das für diese Anwendung geeignet ist und mit dem Bohrungen kostengünstiger abgeteuft werden können.

### 1.1 Geothermieranlagen

Erdwärme entstammt zum Großteil radioaktiven Zerfallsprozessen im Erdinneren, sowie Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung, wodurch im Erdkern Temperaturen von über 5000 °C erreicht werden. Schätzungen haben ergeben, dass 99 % der Erde heißer als 1000 °C und 99,9 % heißer als 100 °C sind. Um die Geothermie zur Erzeugung elektrischer Energie nutzen zu können, sind Temperaturen von 150 °C bis 200 °C notwendig. Nur in

wenigen Regionen der Erde, wie z.B. im Oberrheingraben, sind diese Temperaturen jedoch in weniger als 2000 m Tiefe zugänglich. Häufig sind Bohrungen von mehr als 3000 m Tiefe vorzunehmen, um diese Temperaturen zu gewährleisten. Geothermianlagen benötigen mindestens zwei Bohrungen zur Erzeugung elektrischer Energie: Über die Injektionsbohrung wird das Wärmeträgermittel in das Tiefengestein befördert. Dort fließt es über Aquifere oder durch Fracken gebrochenes Gestein und erwärmt sich. Über weitere Bohrungen, die Produktions- oder Förderbohrungen, wird das erhitzte Wärmeträgermittel an die Erdoberfläche gepumpt. Über einen Wärmetauscher wird die thermische Energie den Turbinen zugeführt und in elektrische Energie umgewandelt (Bild 1).

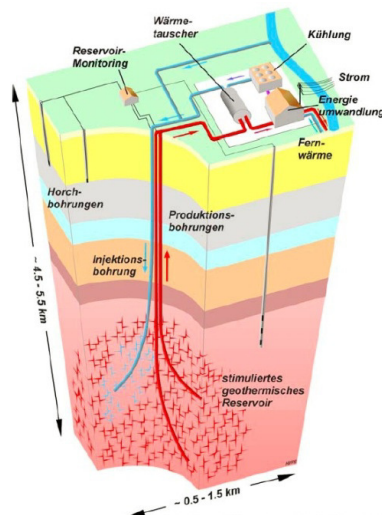


Bild 1: Prinzip eines „Enhanced Geothermal System“ (EGS) [1]

## 1.2 Bohrtechnologische Problematik

Die für die Geothermie notwendigen Bohrungen werden im Allgemeinen mit dem konventionellen Rotarybohren erzeugt. Dabei wird das Gestein durch das Abrollen von Rollenmeißeln (Bild 2) auf der Bohrlochsohle zerstört.

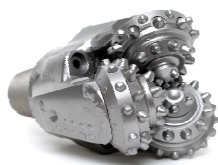


Bild 2: Tri-Cone Rock Bit [2]

Dabei wird ein mechanischer Druck auf die Gesteinsoberfläche ausgeübt, der das Gestein zum Zerbersten bringt. Für Tiefengesteine, wie z.B. Gneis und Granit, ist dazu ein spezifischer Primärenergiebedarf von etwa 700 bis 900 J für 1 cm<sup>3</sup> gelöstes Gestein erforderlich. Gleichzeitig verschleißt der Bohrkopf durch die mechanische Reibung, wodurch die Bohrgeschwindigkeit auf etwa 1 bis 2 m/h sinkt und ein Wechsel des Bohrkopfes nach 50 h notwendig wird. Diese Werkzeugwechsel sind sehr arbeits- und zeitaufwändig und verursachen bei einem Tagessatz von 18.000 € erhebliche Kosten. Für eine Bohrung bis in eine Tiefe von 5000 m fallen Kosten von insgesamt 8 bis 13 Mio. € an, wodurch die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen nicht gegeben ist. Etwa 70 % dieser Kosten entfallen dabei auf zeitabhängige Aufwendungen, wie z.B. Personal, sowie Energie- und Mietkosten der Bohranlage.

Das Ziel muss es demzufolge sein, leistungsfähigere und wirtschaftlichere Bohrtechnologien für Tiefengestein zu entwickeln, um die Wirtschaftlichkeit von Geothermianlagen zu erhöhen.

## 2 Grundlagen des Elektro-Impuls-Verfahrens

Mit dem Elektro-Impuls-Verfahren kann eine Bohrung nahezu verschleißfrei durchgeführt werden. Elektrische Hochspannungsimpulse werden dabei über eine geeignete Elektrodengeometrie auf die Bohrlochsohle geleitet. Es kommt zur Entladung im Gestein, wodurch das Gestein vorgeschädigt und im weiteren Verlauf abgetragen wird (Bild 3). Im Gegensatz zum Rotarybohren wird dabei das Gestein durch die Überwindung der Zugfestigkeit, die nur etwa 10 bis 20 % der Druckfestigkeit beträgt, zerstört. Zu beachten ist dabei, dass die Hochspannungsimpulse eine Steilheit von mehreren kV/ns aufweisen müssen, um einen Durchschlag im Gestein auszulösen (I, blau). Sind die Impulse zu flach, so besteht die Gefahr, dass die Entladung in der umgebenden Bohrspülung (Dielektrikum) stattfindet (II, rot) und somit keine Schädigung des Gesteins hervorruft.

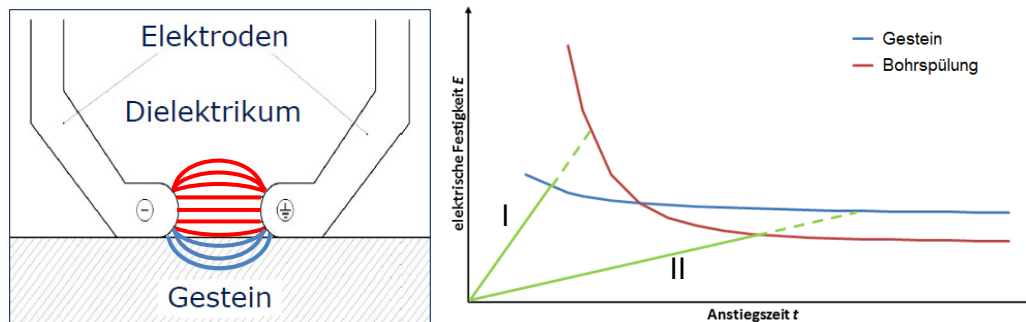


Bild 3: Wirkungsprinzip des EIV und prinzipieller Verlauf der elektrischen Festigkeit von Gestein und Bohrspülung

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass der Bohrkopf mechanisch weniger stark belastet wird als beim Rotarybohren, da der Bohrkopf die Bohrlochsohle nur berührt, sie jedoch nicht mechanisch belastet. Weiterhin kann auf die Rotation des Bohrkopfes verzichtet werden, da die Entladungen gleichmäßig auf der gesamten Bohrlochsohle stattfinden und das Gestein somit vollständig abgetragen wird.

Voruntersuchungen haben ergeben, dass mit diesem Verfahren eine Bohrgeschwindigkeit von mehr als 4 m/h möglich ist. Der spezifische Primärenergiebedarf konnte mit etwa 200 J je 1 cm<sup>3</sup> gelöstes Gestein ermittelt werden.

Berechnungen an einem praxisnahen Beispiel haben ergeben, dass mit dem EIV finanzielle Einsparungen von bis zu 30 % möglich sind. Grundlage dieser Berechnungen ist die Annahme, dass der EIV-Bohrkopf aufgrund des geringen mechanischen Verschleißes etwa 500 h ohne Wartung eingesetzt werden kann und somit der Zeitverlust durch aufwändige Werkzeugwechsel verringert wird. Außerdem kann die Stillstandszeit des Systems aufgrund des verringerten Wartungsaufwandes deutlich minimiert werden, wodurch Personal- und Mietkosten gesenkt werden können.

### 3 Technische Umsetzung – EIV-Bohrkopf

#### 3.1 Energieerzeugung und Impulsspannungsgenerator

Die elektrischen Impulse für das EIV werden durch einen Impulsspannungsgenerator (Marx-Generator) erzeugt. Die zur Aufladung des Marx-Generators notwendige Gleichspannung wird mithilfe eines Mud-Motors (Moineau-Motor) und eines Generators erzeugt. Dieser Mud-Motor wird über die zirkulierende Bohrspülung angetrieben und erzeugt im Generator eine Wechselspannung mit sinusähnlichem Charakter. Diese wird auf Hochspannung transformiert, gleichgerichtet und dem Marx-Generator zugeführt (Bild 4). Die gesamten Komponenten müssen für einen Bohrlochdurchmesser von 12 ¼ " und Temperaturen von etwa 200 °C ausgelegt werden.



Bild 4: Design-Konzept

Die  $n$  Stufen des Marx-Generators werden mit der gleichgerichteten Spannung  $U_1$  gleichzeitig parallel aufgeladen und über Funkenstrecken schlagartig in Reihe geschaltet, so dass ein Impuls mit einem Scheitelwert von etwa  $n \cdot U_1$ , bis zu 400.000 V, am Ausgang des Marx-Generators zur Verfügung steht (Bild 5).

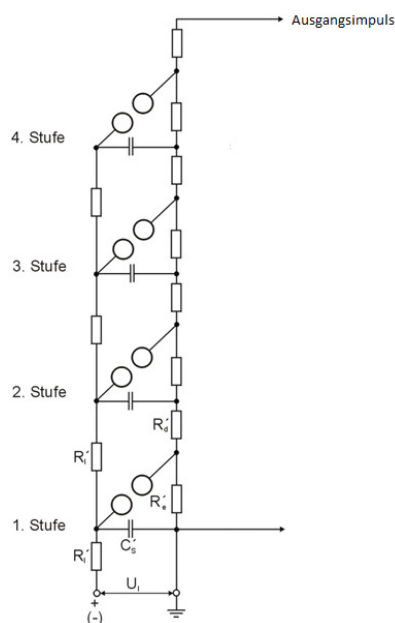


Bild 5: Prinzip-Schaltbild eines Impulsspannungsgenerators (Marx-Generator) mit vier Stufen

Dieser Marx-Generator wird unter Druckgas in einem Druckbehälter montiert. Im Bohrloch herrschen neben hohen Temperaturen auch hohe Drücke von bis zu 1000 bar vor, die durch den Gesteinsdruck und die Flüssigkeitssäule der Bohrspülung entstehen. Um diesem Druck standzuhalten, ist es notwendig, die Behälterwände zu verstärken, wodurch der Bauraum für den Marx-Generator im Inneren auf wenige cm eingeschränkt wird.

Eine der Herausforderungen bei der Entwicklung des Marx-Generators ist die Nutzung von Kondensatoren für die Energiezwischenspeicherung. Diese müssen so ausgelegt werden, dass sie bei Temperaturen von 200 °C, wie sie im Bohrloch vorherrschen, ihre Leistungsfähigkeit bezüglich Kapazität und Hochspannungsfestigkeit beibehalten. Zudem dürfen sie die Bemaßungen des Bauraums im Inneren des Druckbehälters nicht übersteigen.

Nach derzeitigem Stand kommen für den Einsatz im EIV-Bohrkopf nur Glimmer- oder Keramik Kondensatoren infrage.

Um die Einsatzfähigkeit der Kondensatoren zu untersuchen, wurden drei verschiedene Hochspannungs-Hochtemperaturkondensatoren ermittelt und deren Temperaturverhalten untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass Glimmerkondensatoren im Bereich von 30 bis 200 °C eine annähernd temperaturunabhängige Kapazität aufweisen und somit für den Einsatz im EIV-Bohrkopf am besten geeignet sind (Bild 6). Keramik Kondensatoren verlieren bis 200 °C teilweise über 80 % ihrer Kapazität (Keramikkondensator 1).

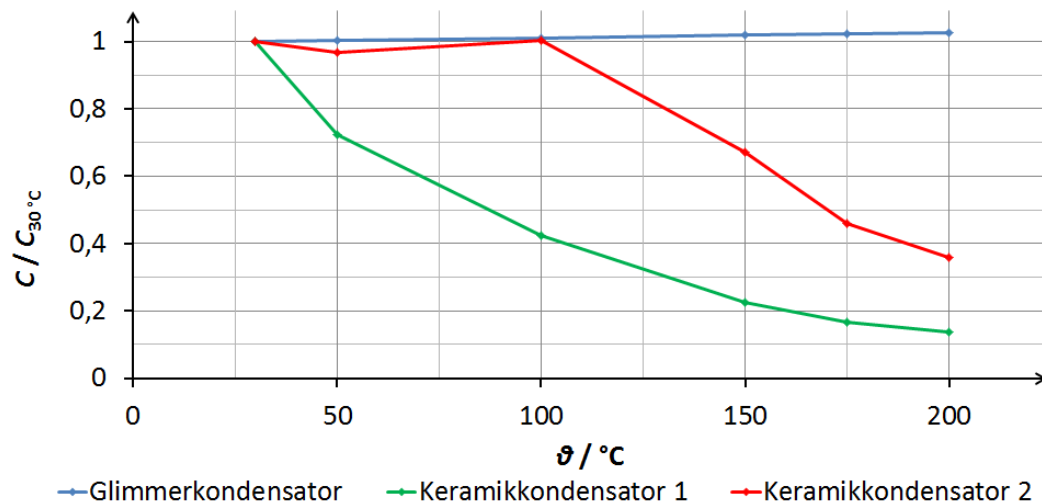


Bild 6: Temperaturabhängigkeit der Kapazität von Hochspannungs - Hochtemperaturkondensatoren

### 3.2 Elektrodengeometrie

Der vom Marx-Generator erzeugte Impuls mit einer Anstiegszeit von wenigen ns wird einer Elektrodengeometrie zugeführt, die die Energie auf die Gesteinsoberfläche leitet (Bild 7).

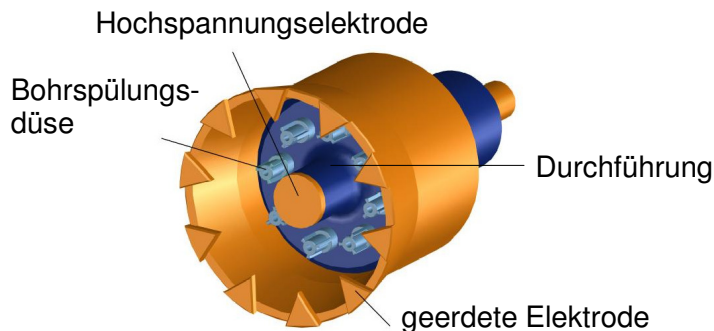


Bild 7: prinzipielle Elektrodengeometrie

Bild 8: Gesteinsabtrag mit 8"-Elektrode

Ist die Potentialdifferenz zwischen Hochspannungselektrode und geerdeter Elektrode ausreichend groß und der Impuls hinreichend steil, so kommt es zum Durchschlag im Gestein und somit zur Vorschädigung bzw. Zerstörung des Gesteins. Der Durchschlag erfolgt dabei stets am Ort der geringsten elektrischen Festigkeit. Diese ist für sehr steile Impulse im Gestein stets geringer als in der Bohrspülung, so dass das Gestein vollständig flächenhaft abgetragen wird und somit prinzipiell keine Rotation des Bohrkopfs notwendig ist.

In den derzeitigen Versuchen werden verschiedene Elektrodengeometrien getestet und hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilt. Dabei konnte bereits nachgewiesen werden, dass mithilfe des EIV ein vollflächiger Abtrag mit einer 8"-Elektrode erfolgt (Bild 8).

### 3.3 Bohrspülung

Das anfallende Bohrklein wird durch die Bohrspülung von der Bohrlochsohle entfernt und an die Erdoberfläche befördert. Die Bohrspülung übernimmt neben dem Transport des Bohrkleins jedoch noch weitere Funktionen: Sie liefert die für das Elektro-Impuls-Verfahren notwendige Energie und treibt damit den Moineau-Motor an. Weiterhin stabilisiert sie durch den Druck der Flüssigkeitssäule das Bohrloch, kühlt die elektrischen und mechanischen Komponenten und dient der Datenübermittlung von der Bohrlochsohle an die Erdoberfläche.

Neben diesen Funktionen werden an die Bohrspülung gewisse Anforderungen gestellt. Es muss gewährleistet werden, dass die Bohrspülung auch mit leitfähigen Partikeln des Bohrkleins eine niedrige elektrische Leitfähigkeit besitzt, so dass die Energie in das Gestein geleitet wird und nicht in die Bohrspülung. Des Weiteren muss sie temperaturbeständig bis zu 200 °C sein.

An der TU Freiberg wurde entsprechend diesen Anforderungen eine ölbasierte, mit Additiven versetzte Bohrspülung entwickelt (Bild 9).



Bild 9: verwendete ölbasierte Bohrspülung

## 4 Verhalten des EIV unter Bohrlochbedingungen

Im Bohrloch herrschen Temperaturen von bis zu 200 °C und Drücke von bis zu 1000 bar vor. Beide Parameter beeinflussen das EIV in unterschiedlichem Maße. Zudem ist die Zusammensetzung des Gesteins entscheidend für die Effizienz des Verfahrens. Dazu wurden Versuche mit Sandstein und Granit bei Temperaturen bis 70 °C und Drücken bis 100 bar durchgeführt (Bild 10, Bild 11).

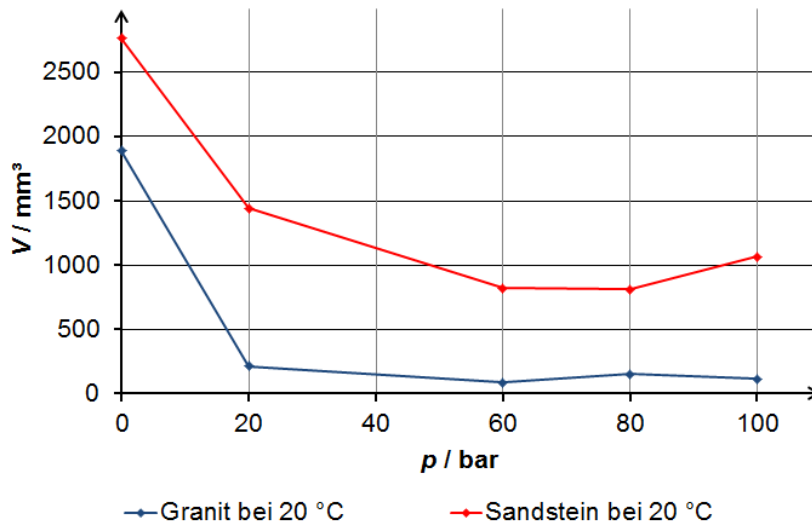


Bild 10: Lösevolumen  $V$  für Granit und Sandstein in Abhängigkeit des Drucks  $p$

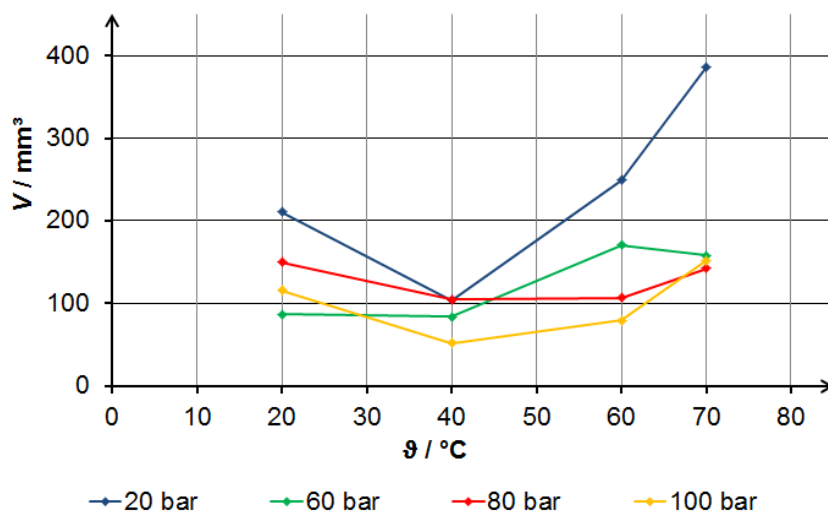


Bild 11: Lösevolumen  $V$  für Granit in Abhängigkeit von Druck  $p$  und Temperatur  $\vartheta$

Es ist ersichtlich, dass poröses Gestein, wie Sandstein, unter gleichen Bedingungen besser zerstört wird als hartes Granit. Zudem ist erkennbar, dass mit steigendem Druck die Löseleistung zu einem gewissen Grad abnimmt und anschließend auf einem Niveau unabhängig vom Druck verharrt. Weiterhin lässt sich feststellen, dass höhere Temperaturen die Zerstörung des Gesteins begünstigen und somit eine größere Löseleistung hervorgerufen wird.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Geothermianlagen sind ein wichtiger Bestandteil der Energieerzeugung im 21. Jahrhundert. Die hohen Fixkosten zum Aufbau solcher Anlagen sind ein entscheidender Faktor, der das Wachstum dieses Energiesektors begrenzt. Allein für eine Bohrung in hartes Tiefengestein bis in 5000 m Tiefe sind 8 bis 13 Mio. € aufzuwenden. Das Hauptproblem dabei ist die Abnutzung des mechanischen Bohrkopfs, so dass dieser nach etwa 50 h ausgewechselt werden muss, wodurch ein maximaler Vorschub von 1 bis 2 m/h erreicht wird. Diese sehr zeitaufwändige Prozedur treibt die Kosten für ein Bohrloch in die Höhe.

Mit dem Elektro-Impuls-Verfahren können diese Kosten um bis zu 30 % reduziert werden, da der EIV-Bohrkopf aufgrund des geringen mechanischen Verschleißes bis zu 500 h ohne Wartung eingesetzt werden kann und somit einen Vorschub von mehr als 4 m/h erreicht. Dabei wird elektrische Energie im Bohrloch erzeugt und einem Marx-Generator zugeführt. Dieser erzeugt Impulsspannungen von bis zu 500.000 V, die mithilfe einer Elektrodengeometrie die Gesteinsoberfläche abtragen.

Alle Komponenten dieses Systems müssen höchsten Anforderungen genügen. Zum einen ist der Bauraum auf einen Durchmesser von 12 ¼" begrenzt, in dem alle Komponenten unterkommen müssen. Zum anderen herrschen im Bohrloch Temperaturen von bis zu 200 °C und Drücke bis zu 1000 bar vor. Dazu wurden unter anderem Untersuchungen an Hochtemperatur-Hochspannungskondensatoren durchgeführt, um deren Eignung für den Einsatz im Marx-Generator nachzuweisen.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zum Gesteinsabtrag in Abhängigkeit der Gesteinsart, der Temperatur und des Drucks durchgeführt. Poröses Gestein, wie z.B. Sandstein, wird mithilfe des EIV besser abgetragen als hartes Gestein, wie beispielsweise Granit. Zudem begünstigen hohe Temperaturen den Gesteinsabtrag, wohingegen hohe Drücke, hervorgerufen durch den Gesteinsdruck und den Druck der Flüssigkeitssäule der Bohrspülung, den Vortrieb behindern.

Das EIV besitzt insgesamt ein großes Potential, die Bohrkosten für Geothermianlagen zu reduzieren und somit den Ausbau der regenerativen Energieanlagen voranzutreiben. Zudem haben praxisnahe Laborversuche die Funktionsfähigkeit des EIV bewiesen.

## 6 Referenzen

- [1] Markus O. Häring, Geothermal Explorers Ltd., 2007
- [2] Straightline HDD, Tri-Cone Rock Bit,  
<http://www.straightlinehdd.com/en/images/tri-cone-00.jpg>