

Elektro Impuls Technologie: Effizienter durchs Hartgestein

Erik Anders, Franziska Lehmann, Matthias Voigt

TU Dresden, TU Bergakademie Freiberg

Keywords: Tiefengeothermie, Tiefbohrtechnik, Elektro-Impuls-Verfahren, Hartgestein, Hochspannung, spezifische Energie

Zusammenfassung

Die Tiefbohrtechnik wird stets vor neue Herausforderungen gestellt. Beim Bohren nach Erdöl oder Erdgas, aber insbesondere beim Abteufen tiefer Geothermalbohrungen müssen oft sehr harte Formationen durchbohrt werden. Die Optimierung der konventionellen Technologien des Rotarybohrens stoßen hier an ihre Grenzen. Rollen- und PDC-Meißel wurden bspw. speziell für das Bohren von Sedimentgesteinen entwickelt und erzielen in besonders abrasiven oder harten Formationen nur unzureichende Bohrgeschwindigkeiten. Hier ist es notwendig, nach neuen Ansätzen für das Gesteinslösen und Bohren zu suchen, mit denen Tiefbohrungen in diesen Formationen wesentlich effektiver und wirtschaftlicher als bisher abgeteuft werden können. Dafür bietet sich die neue Technologie des Elektro-Impuls-Bohrens an. Das Verfahren verwendet im Gegensatz zu herkömmlichen mechanischen Bohrverfahren Hochspannungsimpulse, um das Gestein zu zerstören. Da es im Prinzip kraftlos auf der Bohrlochsohle arbeitet, wird der Verschleiß am Bohrkopf deutlich reduziert. Dies ermöglicht längere Standzeiten des Werkzeuges, reduziert die Anzahl an Roundtrips und damit die unproduktive Zeit der Bohranlage und senkt die Bohrkosten. Im aktuellen vom BMWi geförderten Projekt „Entwicklung und in-situ Erprobung eines EIV-Bohrsystems (ISEB)“ wird ein vollständiges Bohrsystem entwickelt, das als modulare Einheit auf einer konventionellen Bohranlage eingesetzt werden kann. Das Bohrsystem enthält den Bohrkopf mit Elektrode und die benötigte Energieversorgung. Die Bereitstellung der erforderlichen elektrischen Energie erfolgt vollständig in der Bohrgarnitur im Bohrloch. Die Energie dafür wird aus der hydraulischen Energie der Bohrspülung gewonnen. Das Bohrsystem wird für ein 12 ¼“ Bohrloch, 200 °C Bohrlochtemperatur und 1000 bar Umgebungsdruck entwickelt. Vorangegangene Untersuchungen versprechen einen Bohrfortschritt von 1-2 m/h in kristallinem Gestein. Die erwartete Einsatzdauer zwischen zwei Roundtrips liegt bei ca. 350 h. Das ist ein Vielfaches der Standzeiten herkömmlicher Rollenmeißel, die sonst im Hartgestein eingesetzt werden. Im bisherigen Projektverlauf wurden die Einzelkomponenten des Systems entwickelt und im Labor getestet. Darüber hinaus fanden Hochdruckversuche statt, die nachweisen, dass das Elektro-Impuls-Verfahren auch bei 500 bar Druck funktioniert. Derzeit wird ein vollständiger Laborprototyp mit einer Gesamtlänge von 19 m entwickelt, in dem alle Einzelkomponenten integriert sind. Dieser Laborprototyp wird zunächst im Labor und im Anschluss in-situ in einer „echten“ flachen Bohrung im Freiburger Gneis getestet.

1. Einleitung

Das Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) geht einen neuen Weg, um das Gestein aus der Formation zu lösen. Dies lässt höhere Bohrgeschwindigkeiten im Hartgestein erwarten. Der gesteinszerstörende Effekt beruht auf elektrischen Hochspannungsentladungen, die durch das Gestein geleitet werden. Zwei Elektroden stehen in losem Kontakt mit der Bohrlochsohle und sind von einer möglichst gering leitfähigen Bohrspülung umgeben.

Bei einer genügend kurzen Anstiegszeit von unter 120 ns (Bsp. Granit-Wasser; Werte sind gesteins- und bohrfluidabhängig) der elektrischen Spannung bis auf Werte von 600 kV ist die Durchschlagfestigkeit der Bohrspülung höher als die des Gesteins, wodurch die Spannungsimpulse („Blitze“) zwischen den zwei Elektroden durch das Gestein geleitet werden.

Durch die schlagartige Temperatur- und Druckerhöhung im Durchschlagskanal wird die Zugfestigkeit des Gesteins überwunden. Da diese nur ca. 1/10 der Druckfestigkeit beträgt, wird beim Einsatz des EIVs unter normalen Bedingungen eine sehr geringe spezifische Energie von 100 - 200 J/cm³ für die Gesteinszerstörung benötigt, wohingegen für das drehende Bohren (Rotary-Bohren) eine spezifischen Energie von 600 - 950 J/cm³ erforderlich ist [BIELA et. al.]. Abbildung 1 stellt den Wirkmechanismus des EIVs schematisch dar.

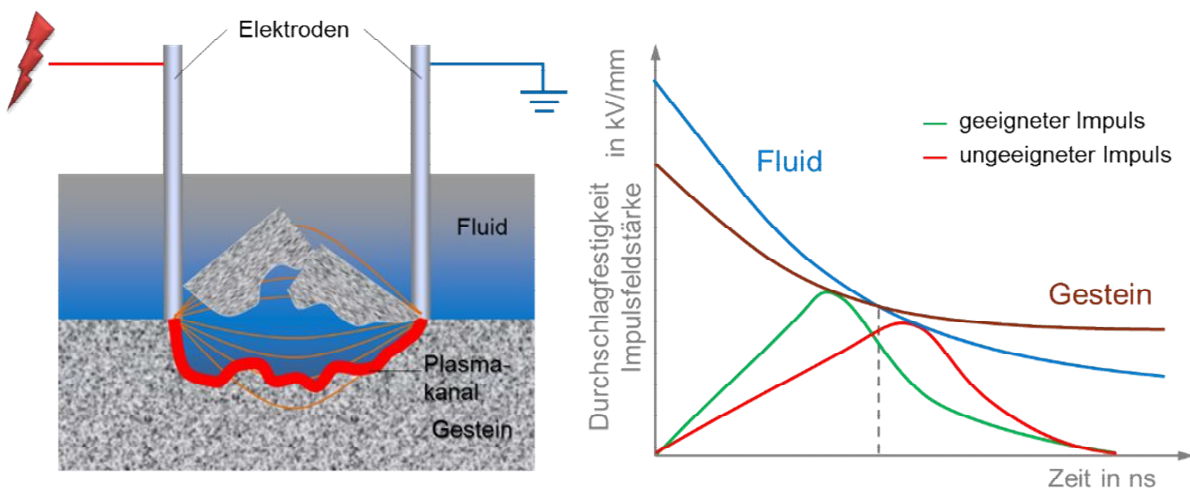


Abb. 1: Schema des EIV-Wirkmechanismus

2. Entwicklungsschritte des EIV-Bohrkopf

Die Entwicklung ist in drei Abschnitte unterteilt. Am Beginn wurde in einer einjährigen Machbarkeitsstudie die prinzipielle Umsetzbarkeit des EIV-Prozesses unter bohrlochähnlichen Bedingungen nachgewiesen. Im Fokus stand dabei eine technische Lösung zu finden, die Temperaturen von bis zu 200 °C in einer geothermischen Bohrung standhält und dabei in ein Bohrloch von 12 ¼“ passt. Zudem wurde bereits der Zerstörungsprozess unter Drücken bis 100 bar und bei Temperaturen bis zu 70 °C sowohl in trockenem als auch in wassergesättigtem Gestein nachgewiesen. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden im nächsten Schritt eine bohrlochtaugliche Stoßspannungsquelle und entsprechende Bohrelektroden entwickelt. Zur Erprobung dieser Komponenten wurde an der TU Dresden ein Versuchsaufbau umgesetzt. Der Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

Der Prototyp der Stoßspannungsquelle wurde für ein 12 ¼“ (311 mm) Bohrloch mit 5000 m Teufe konzipiert. Die Bohrelektrode wurde für eine vertikale Auflast (WOB) von bis zu 50 kN (5 t)

sowie einen Bohrprozess ohne Strangrotation ausgelegt. Sie sind aus einfachem Konstruktionsstahl gefertigt und werden auch nach einer langen Betriebsphase nicht durch die elektrischen Impulse beschädigt. Eine elektrische Erosion ist nicht erkennbar.

Die Elektroden können als elektrische Last angesehen werden, die einen wesentlichen Einfluss auf die Aufbauzeit und das Spannungsmaximum des Impulses haben. Nur mit einer genügend kurzen Impulsanstiegszeit nimmt der Durchschlagskanal den Weg durch das Gestein und nicht durch das Bohrfluid. Deshalb müssen der Impulsgenerator und die Elektroden gut aufeinander abgestimmt sein. Die Auslegung der Systemkomponenten erfolgte durch Berechnungen mit Simulationsmodellen, die ebenfalls an der TU Dresden erstellt wurden. Die Berechnungen wurden mit einer großen Anzahl von praktischen Versuchen verifiziert.

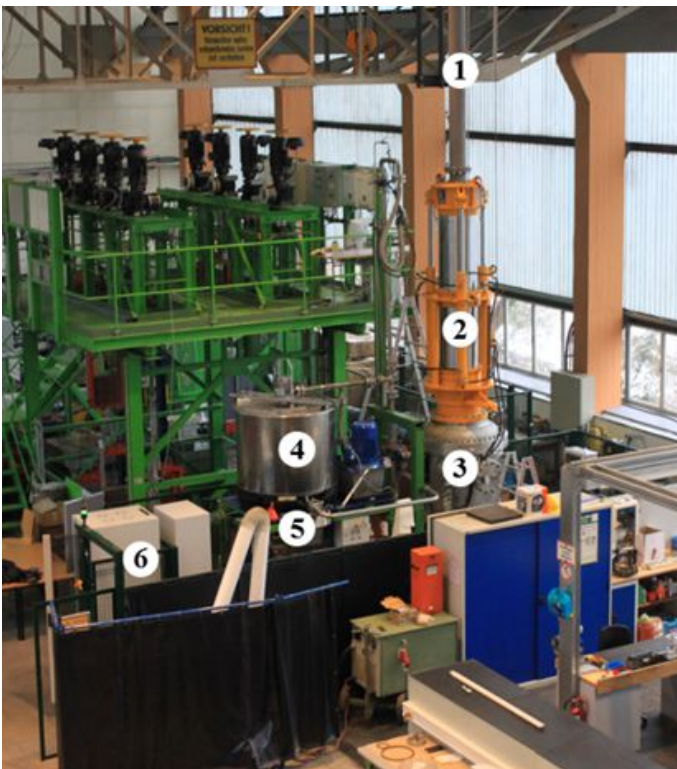


Abb. 2: Teststand in Dresden (1-Laborprototyp, 2-Manipulator, 3-Versuchs-behälter, 4-Spülungstank, 5-Spülpumpe, 6-Steuer- und Messgeräte)

Die einzig praktikable Spannungsquelle, die in der Lage ist, derart schnelle Spannungsimpulse zu liefern, ist ein Impulsspannungsgenerator nach Erwin Otto Marx. Ein solcher Stromkreis beinhaltet Kondensatoren, welche parallel aufgeladen und zur Erzeugung eines Impulses durch Funkenstrecken schnell in Reihe geschaltet werden. Dabei addieren sich die Ladespannungen schlagartig, wodurch ein Hochspannungsimpuls entsteht. Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Laborprototyp verfügt über 12 Stufen, die jeweils mit 40 kV aufgeladen werden. Bei Reihenschaltung addieren sich diese zu einer Ausgangsspannung an der Elektrode von 480 kV.

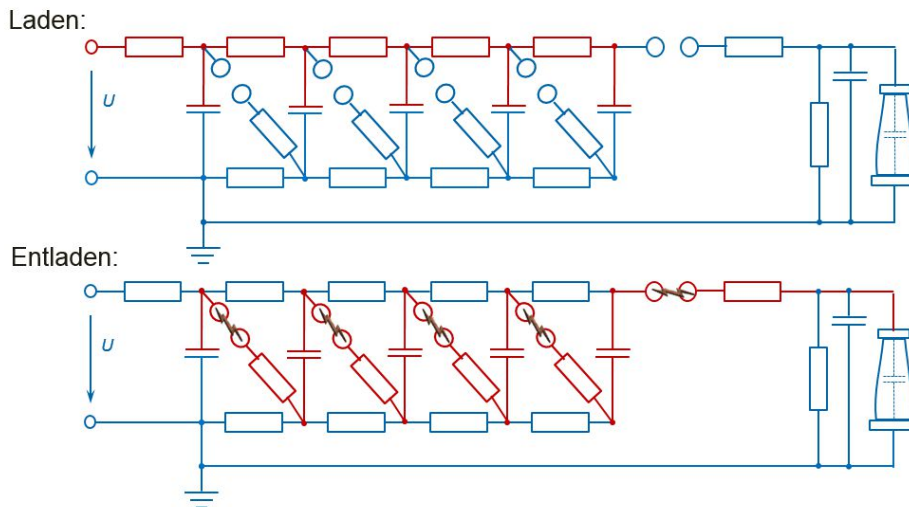


Abb. 3: Prinzip eines Marx-Generators

Eine der größten Herausforderungen stellte die Realisierung der schlanken und temperaturbeständigen baulichen Ausführung des Marx-Generators dar, da dieser für ein 12 ¼" großes und 200 °C heißes Bohrloch geeignet sein soll.

Letztendlich wurde ein Prototyp gebaut und getestet, wobei alle Komponenten eine nachgewiesene Standzeit von mindestens 350 h besitzen. Tabelle 1 stellt die technischen Daten des Bohrkopfes übersichtlich dar.

Tabelle 1: Technische Daten des Bohrkopfes

Gehäuseinnendurchmesser	200 mm
Schaltungsdurchmesser	135 mm
Länge	5500 mm
Ausgangsspannung	480 kV
abgeschätzte ROP	~ 2 m/h
gemessene ROP	0,5 m/h
installierte Leistung	10 kW

Während der ersten Versuche wurde eine Bohrgeschwindigkeit (ROP) von 0,5 m/h in Granit gemessen, wobei eine ölbasische Spülung genutzt wurde. Der Spülungsvolumenstrom am Versuchsstand betrug nur 250 l/min und wurde durch die zur Verfügung stehenden Pumpe begrenzt. Dies liegt deutlich unter in der Tiefbohrtechnik üblichen Volumenströmen. Die Bohrlochsohlenreinigung ist bei diesem Volumenstrom unzureichend. Außerdem konnte die verwendete Spülung nicht aufbereitet werden, was dazu führte, dass das Bohrklein in der Spülung verblieb und mit im Kreislauf gepumpt wurde. Zudem wurde permanent eine Nachzerkleinerung des Bohrkleins beobachtet, wodurch die dafür eingesetzte Energie nicht für das Lösen neuen Bohrkleins verwendet werden konnte. Der Wirkungsgrad des Verfahrens wird damit deutlich herabgesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die tatsächliche Bohrgeschwindigkeit bei höherem Volumenstrom und guter Spülsaufbereitung deutlich über den gemessenen 0,5 m/h liegen kann. Das Ergebnis des Bohrversuchs, das erstellte Bohrloch in der Granitprobe, wird in Abbildung 4 gezeigt. Diese Entwicklung bildet die Grundlage für den anschließenden Entwicklungsabschnitt hin zu einem EIV-Bohrsystem.



Abb. 4: Bohrloch 12 1/4'' in Granitprobe nach dem Bohrversuch

3. Bohrsystementwicklung

Bei der Entwicklung des EIV-Bohrsystems wurde angestrebt, dass es mit dem derzeit verwendeten Equipment der konventionellen Tiefbohrtechnik kompatibel sein muss. In Anbetracht der bereits existierenden Werkzeuge und Funktionseinheiten der Tiefbohrtechnik wird eine neue Bohrtechnologie nur dann eingesetzt werden, wenn es möglich ist, diese in den Bohrprozess auf einer Bohranlage zu integrieren. Das Ziel des EIV-Systems ist es, ohne Kabel in oder an dem Bohrstrang auszukommen und somit keine Sonderausrüstung auf der Bohranlage zu benötigen. Die einzige Möglichkeit dies zu erreichen, besteht darin die benötigte elektrische Energie und die Hochspannungsimpulse untertage zu erzeugen.

Somit bestand der nächste Schritt nach der Entwicklung des Bohrkopfes darin, auch die gesamte Stromerzeugung für den Impulsgenerator nach untertage zu verlegen und ein komplettes Bohrsystem zu entwickeln, dass in den Bohrstrang integriert werden kann. Das Konzept des Systems ist in Abbildung 5 dargestellt.

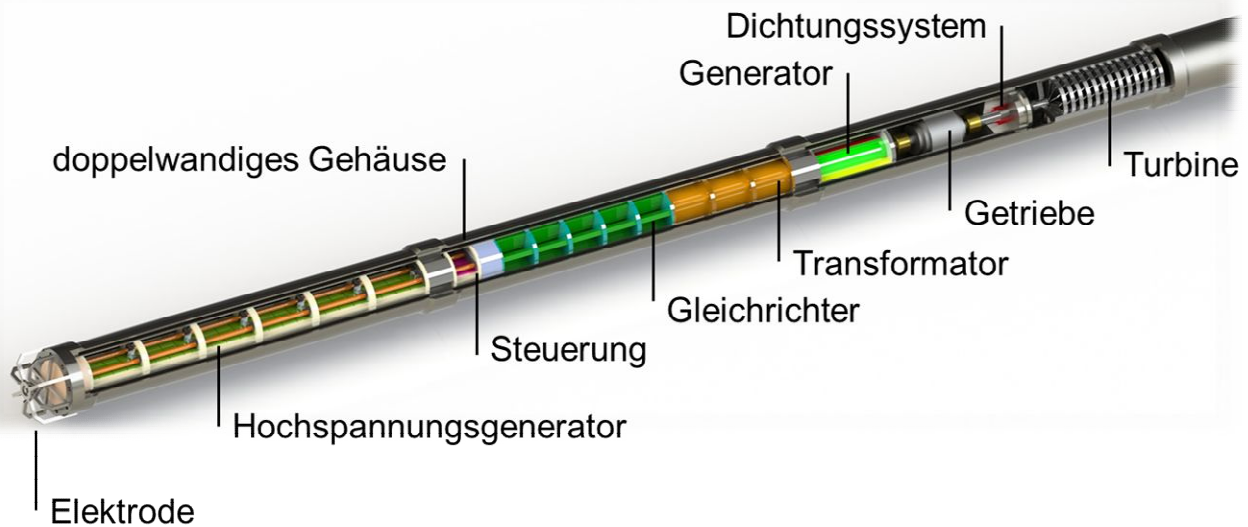


Abb. 5: Konzept des EIV-Bohrsystems

Das System ist in mehrere Hauptkomponenten unterteilt. Das erste ist das Bohrkopfsegment bestehend aus Elektrode und Impulsspannungsgenerator. Das zweite und dritte Segment dient der Energiebereitstellung und besteht zum einen aus Steuerung, Gleichrichter und Transformator und zum anderen aus Generator, Getriebe und Bohrmotor. Alle drei Segmente haben je eine Länge von ca. 10 m (30 ft). Dies ergibt eine Gesamtlänge für das EIV-Bohrsystem von ca. 30 m.

Im aktuellen Projekt wurden im ersten Schritt der Impulsgenerator und die Elektroden überarbeitet, damit das System mit wasserbasierten Spülungen betrieben werden kann. Das bedeutet, dass die Elektroden ihr elektrisches Verhalten ändern und mehr Energie benötigt wird, um einen elektrischen Impuls zu erzeugen. Die elektrischen Parameter des neuen Impulsgenerators sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Schaltdurchmesser ist kleiner als der des ersten Prototyps und hat gleichzeitig eine höhere Impulsenergie. Unter Berücksichtigung der Verwendung eines anderen Spülungsfluides wird dennoch weiterhin die gleiche Bohrgeschwindigkeit abgeschätzt wie vormals.

Tabelle 2: Technische Daten des neuen Bohrkopfes

Gehäuseinnendurchmesser	200 mm
Schaltdurchmesser	128 mm
Länge	8000 mm
Ausgangsspannung	> 600 kV
erwartete Bohrgeschwindigkeit	~ 2 m/h
Leistung	12,5 kW

Ausgehend von der installierten Leistung des Impulsspannungsgenerators wurden die anderen Energieversorger dimensioniert. Der Impulsspannungsgenerator besitzt eine Ausgangsleistung von 12,5 kW. Für den Wirkungsgrad der Elektrode wird der ungünstige Fall angenommen, dass sich nur jeder zweite Impuls durch das Gestein entlädt. Für die anderen Komponenten wurde der Wirkungsgrad soweit möglich berechnet oder nach allgemein gültigen Kennwerten abgeschätzt. Es ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von ca. 26 % für das EIV-Bohrsystem. Das heißt, es muss an der Turbine eine hydraulische Leistung von 24 kW zur Verfügung gestellt werden. Im Vergleich zu drehenden Bohrverfahren, die einen Wirkungsgrad von 10 - 15 % erreichen, ist dies eine deutliche Steigerung.

Das EIV-Bohrsystem wird von einem elektrischen Generator versorgt, welcher wiederum von einer Turbine angetrieben wird. Der Generator ist für Arbeitstemperaturen bis zu 200 °C ausgelegt. Um

die benötigte Eisenmenge zu reduzieren, erzeugt der Generator eine Ausgangsfrequenz von 200 Hz. Direkt hinter dem Generator ist ein Transformator installiert.

Dieser konvertiert die niedrige Wechselspannung des Generators in eine Hochspannung. Ein nachgeschalteter Gleichrichter konvertiert die Ausgangswechselspannung des Transformators in eine Ladegleichspannung.

Das Energiebereitstellungssegment beinhaltet neben den elektrischen Komponenten eine Kontroll- und Messeinheit. Diese ist einerseits für die Triggerung der Impulse zuständig, andererseits überwacht sie die Funktion des Impulsspannungsgenerators. Dafür werden jeweils Druck und Temperatur an kritischen Stellen im System, sowie in der Funkenstrecke des Impulsspannungsgenerators gemessen und aufgezeichnet. Sie ist außerdem in der Lage mit einem konventionellen MWD-Tool zu kommunizieren, wenn ein solches in der Bohrgarnitur verbaut ist. Die Kennwerte des Energiebereitstellungssegmentes sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Technische Daten des Energiebereitstellungssegments

1. Gehäuseinnendurchmesser	6. 200 mm
2. Schalungsdurchmesser	7. 178 mm
3. Länge	8. 8200 mm
4. Ausgangsspannung	9. 40 kV DC
5. Installierte Leistung	10. 24 kW

4. Erprobung unter Bohrlochbedingung

Weiterhin wurden Hochdruckversuche durchgeführt. Im Bohrloch herrschen aufgrund des Anhand der Ergebnisse der vorangegangenen Tests sollte die Druckabhängigkeit bei der Einhaltung definierter Impulsparameter weiter untersucht werden. Dabei sollte eine unveränderte Löseleistung auch bei höheren Drücken bis 500 bar nachgewiesen werden. In dem aktuellen Projekt wurde eine Hochdruckmesszelle aufgebaut. Mit dieser können, ähnlich zu den Versuchen in der Machbarkeitsstudie, Drucktests bis 500 bar mit verschiedenen Fluiden durchgeführt werden. In Abb. 6 sind die spezifischen Löseenergien für die Versuchsreihen mit Granit und den Fluiden Wasser und Öl dargestellt.

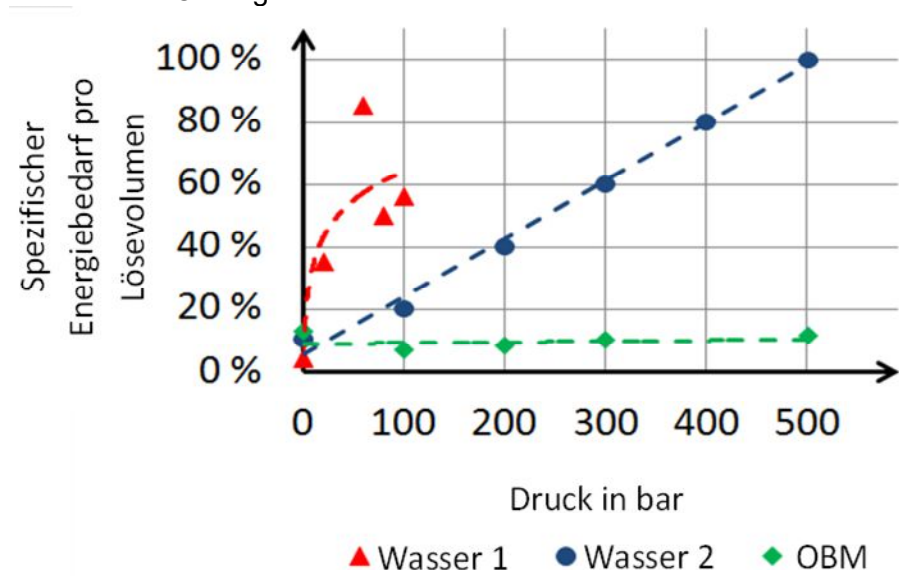


Abb. 6: Löseenergie bei verschiedenen Drücken und Fluiden

Die Kurve „Wasser 1“ beschreibt dabei die Referenz aus der Machbarkeitsstudie. Dabei zeigte sich ein enormer Anstieg des Energiebedarfs nach Erhöhung des Drucks. „Wasser 2“ zeigt ebenfalls

Versuche mit Wasser nach einer ersten Anpassung der Impulsparameter mit Hilfe der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Versuchen. Der Energiebedarf bei höheren Drücken konnte reduziert werden. Er war aber im Verhältnis zur konventionellen Tiefbohrtechnik immer noch zu hoch. Neben der Reduzierung des Energiebedarfs war es ein Erfolg, dass ein im Gegensatz zu den ersten Versuchen linearer Zusammenhang von Druck und Energiebedarf erreicht werden konnte. Das bedeutet, dass durch die Änderung der Impulsparameter maßgeblich auf den Löseprozess eingewirkt werden kann.

Im nächsten Schritt wurde das Umgebungsfluid Wasser durch eine ölbasische Spülung „OBM“ ausgetauscht und die Impulsparameter weiter angepasst. Der Verlauf zeigt, dass der Einfluss des Druckes auf die Löseleistung nahezu eliminiert werden konnte. Das heißt, wird das EIV mit einer ölbasischen Spülung in der Tiefbohrtechnik betrieben, dann kann es mit den gefundenen Impulsparametern konkurrenzfähig zur konventionellen Tiefbohrtechnik sein. Da der Einsatz einer ölbasischen Spülung nicht immer möglich ist, muss das EIV auch unter Verwendung einer wasserbasischen Spülung funktionieren. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können die Impulsparameter jetzt weiter angepasst werden, um die Druckunabhängigkeit auch für Wasser zu erreichen. Mit den bisherigen Anpassungen konnte dazu schon ein wichtiger Schritt getan werden.

5. Bohrtests in Freiberg

Der Höhepunkt der 3,5-jährigen Projektlaufzeit war ein in-situ-Test des Gesamtsystems in einer flachen Probebohrung in Hartgestein im Herbst 2017 auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg.

Die Gesamtdauer des Feldtestes betrug neun Wochen. In der ersten Woche wurde der Bohrplatz nach den Anforderungen vorbereitet und durch einen Zaun abgesichert. Der erste Bohrlochabschnitt wurde konventionell erstellt und durch ein zementiertes Standrohr abgesichert. Der Aufbau der von der TU Dresden selbst konstruierten und selbst gefertigten Bohranlage (Abbildung 4) über dem bereits vorhandenen Bohrloch nahm die ersten drei Wochen in Anspruch.



Abb. 7: Bohranlage auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg

In der vierten und fünften Woche wurden zuerst die Bohranlage selbst und das erste Segment mit dem Marxgenerator in Betrieb genommen. Es konnte Bohrklein aus der Formation gelöst werden und durch die Spülung (Leitungswasser) aus dem Bohrloch gefördert werden. Ein technischer Defekt unterbrach dann die Tests. Der Ausbau, die Reparatur des Defekts und der Einbau des Marx-Generators benötigte zwei Tage. Die Tests wurden fortgesetzt, bis ein weiterer Defekt auftrat und das erneute Ausbauen erforderlich machte. Durch die technischen Probleme und wetterbedingte Unterbrechungen konnte an insgesamt nur sieben Tagen getestet werden. Es wurden insgesamt 8 cm gebohrt. In der neunten Woche wurde die Bohranlage vollständig abgebaut und die Wiese, auf der sich der Bohrplatz befand, wurde wiederhergestellt.

Sowohl die Bohranlage selbst, als auch der Prototyp des Marxgenerators konnten erfolgreich in Betrieb genommen werden. Die Bohranlage funktionierte ohne Probleme. Beim Marxgenerator traten verschiedene technische Probleme auf. Allerdings konnten die Fehlerursachen festgestellt werden. Derzeit werden die Fehler an der TU Dresden behoben, so dass diese beim nächsten Einsatz nicht wieder auftreten.

Die erreichte Bohrtiefe ist alles in allem nicht zufriedenstellend. Es können so keine Aussagen über Bohrgeschwindigkeiten, spezifische Energien und Standzeiten getroffen werden, was das ursprüngliche Ziel der Versuche war. Die Durchführung eines weiteren Feldtestes ist demnach zwingend erforderlich.

6. Fortführung der Tests

Der Prototyp des EIV-Bohrsystems befindet sich derzeit an der TU Dresden und wird dort überarbeitet. Die Bohranlage konnte in der Zwischenzeit auf dem Firmengelände der Firma Homilius Bohren und Umwelttechnik in Bobritzsch wieder aufgebaut werden. Die Firma hat sich bereit erklärt, ihr Gelände über einen längeren Zeitraum zur Verfügung zu stellen, so dass dort ein neuer Versuch über einen längeren Zeitraum möglich sein wird, so dass auch auf technische Probleme besser reagiert werden kann. Ziel wird es sein, im vor Ort anliegenden Gneis mehrere Meter am Stück zu bohren, um so die Bohrgeschwindigkeit und die spezifische Energie nachzuweisen.



Abb. 8: Bohranlage am gegenwärtigen Standort nahe Freiberg

Bei einem erfolgreichen Abschluss dieser Feldtests, ist es geplant eine weitere Projektphase anzuschließen. In dieser soll der Prototyp weiterentwickelt und Fragen, wie bspw. die Richtungssteuerung oder Rotation, beantwortet werden. Außerdem soll ein weiterer Feldtest mit einer größeren Bohrtiefe angestrebt werden.

7. Fazit, Ersparnis und Ausblick

Im Rahmen des Entwicklungsprojektes wurde erstmals eine an die Dimensionen eines realen Bohrlochs angepasster EIV-Prototyp umgesetzt und getestet. Neben der Dimension wurde zudem erstmals mit Leitungswasser gearbeitet und somit ein wichtiger Schritt weg von ölbasierenden Spülungen hin zu wasserbasierenden Bohrspülungen gemacht.

Die jetzigen Arbeiten haben das hohe Kosteneinsparungspotential des EIV-Systems für die Tiefbohrtechnik gezeigt. Des Weiteren zeigen die neuen Aspekte unter Hochdruckbedingungen, dass das EIV-System hinsichtlich des Energieverbrauchs mit konventionellen Bohrmeißeln mithalten kann. Das Bohrsystem wird neben der Kostenersparnis noch weitere Vorteile für die Bohrindustrie bringen. Vom Prinzip her benötigt es keine Meißelandruckkraft, was das Bohren längerer horizontaler Abschnitte erleichtert. Mit einem noch kleineren Durchmesser wird es außerdem möglich sein, bereits existierende Bohrlöcher zu vertiefen. Ein anderer technischer Vorteil besteht in der geringen dynamischen Stimulation des Bohrloches. Mit konventionellen

Meißeln wird eine hohe Drehmoment- und Vibrationsbelastung in die BHA eingetragen. Das EIV-System benötigt dagegen keine Strangrotation und bringt nur geringe Vibrationen aufgrund der Turbinenrotation mit sich.

Ausgehend vom jetzigen Projektstand gibt es zwei Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung des EIV-Systems. Besonders für Explorations- und Richtbohraufgaben muss der Werkzeugdurchmesser noch weiter verkleinert werden. Erste Konzepte für den Impulsgenerator für 8½“- und sogar 5“-Bohrlöcher liegen bereits vor und werden in den nächsten Projektphasen weiter entwickelt. Zusätzlich sollen Konzepte entwickelt werden, mit denen es möglich ist das EIV-Bohrsystem zu rotieren und eine Richtungssteuerung zu ermöglichen.

Ein weiterer wichtiger Schritt wird es sein, den Prototypen in weiteren Feldversuchen zu testen, um Daten unter Bohrlochbedingungen und in verschiedenen geologischen Formationen zu gewinnen. Bis jetzt wurden die meisten Versuche an Granit durchgeführt, da dieses Gestein die höchste Anforderung an das EIV stellt. Es wurden aber auch bereits andere Gesteine im kleineren Maßstab getestet. Diese Gesteine waren verschiedene Typen von Gneis und Granit, Ton, Sandstein, Marmor, Erz, Kalkstein und sogar Salz. Versuche im größeren Maßstab könnten helfen, den Prozess weiter zu verstehen und zu optimieren.

8. Danksagung

Die Autoren danken dem BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Bauer Maschinen GmbH, Werner Industrielle Elektronik e. Kfm., Bitsz Electronics GmbH, Geothermal Engineering GmbH, ILEAG e.V. und Baker Hughes INTEQ GmbH für die fachliche und finanzielle Unterstützung und die hervorragende Kooperation während der gesamten Projektlaufzeit.

Quellenangaben

BIELA, J.; et. al.: Solid State Modulator for Plasma Channel Drilling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, 4, S. 1093–1099, 2009

Erik Anders, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
erik.anders@tu-dresden.de

Franziska Lehmann, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg
franziska.lehmann@tbt.tu-freiberg.de