

# 836

## Forschungsbericht

Elektro-Impuls-Verfahren zur Aufwältigung eines mit Scale verengten Bohrloches



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben (21674 BR) der Forschungsvereinigung DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e.V., Große Elbstraße 131, 22767 Hamburg wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

DGMK und Autor(en) haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Die DGMK übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind.

Alle Rechte vorbehalten

Als Manuskript gedruckt

© DGMK e.V., Hamburg, 2023

Für Copyright in Bezug auf das verwendete Bildmaterial siehe Quellenangaben in den Abbildungsunterschriften. Abbildungen ohne Quellenangabe sind von den Autoren.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DGMK unzulässig und strafbar.

The work including all its parts is protected by copyright. Any use outside the narrow limits of the German Copyright Law without the consent of the DGMK is prohibited and punishable by law.

Umschlaggestaltung: DIE NEUDENKER®, Darmstadt | DGMK e.V., Hamburg

Titelfotografie: TU Dresden, Stiftungsprofessur für Baumaschinen

ISSN 0937-9762

ISBN 978-3-947716-56-2

<https://www.dgmk.de>



## DGMK-Forschungsbericht 836

### Elektro-Impuls-Verfahren zur Aufwältigung eines mit Scale verengten Bohrloches

#### Kurzfassung

Das Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) beruht auf der zerstörenden Wirkung von Hochspannungsimpulsen, die durch einen Feststoff geleitet werden. Es wird seit mehreren Jahren für das Abteufen von Bohrungen, die Gewinnung und auch die Aufbereitung von Erzen an der TU Dresden und der TU Freiberg erforscht. Mit der Aufwältigung von Förderbohrungen für Geothermie aber auch Öl- und Gas soll nun ein neues Anwendungsfeld erschlossen werden. Das technische Problem, welches hierbei gelöst werden soll, ist die Entfernung von Ablagerungen, sogenannten Scales. Diese treten auf, da mit der Produktion der gewünschten Thermalwässer auch Begleitstoffe gefördert werden. Diese Stoffe fallen aus und lagern sich an der Wand der Förderrohre an und reduzieren so die mögliche Förderleistung. Zur Entfernung dieser Scales wurden chemische, mechanische oder auch kombinierte Verfahren entwickelt. Es gibt jedoch eine Vielzahl an Szenarien, wo die bekannten Verfahren limitiert sind und die Aufwältigung nur durch enormen finanziellen und technischen Aufwand möglich ist.

An dieser Stelle setzt das EIV an, bei dem die Scales ohne mechanische Wechselwirkung gelöst werden können. In einem ersten Entwicklungsschritt wurde ein Prototyp für die Entfernung von Scales in einer 4 ½" Rohrtour entwickelt und im Labor erprobt. Dazu wurden mit Hilfe von realen Probekörpern und mit im Labor hergestellten Scales Versuche zur Bestimmung der Impulsparameter durchgeführt, sowie auch die notwendige Stoßspannungsschaltung auf den gewünschten Durchmesser verkleinert.

---

Berichtsumfang:	68 Seiten, 66 Abbildungen, 9 Tabellen
Laufzeit:	01.03.2021 - 31.05.2023
Projektbearbeiter:	Prof. Dr. M. Reich, Prof. Dr. Moh'd M. Amro, Dr. C. Freese, S. Klein, TU Bergakademie Freiberg: Institute for Drilling Technology and Fluid Mining  Prof. Dr. F. Will, E. Anders, M. Voigt, TU Dresden: Professur für Baumaschinen
Projektbegleitung:	Aqua2Power Sales GmbH - G. Johne BITSz electronics GmbH - Dr. S. Schmidt DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH - H. Bültemeier ExxonMobil Production Deutschland GmbH - M. Dahms Fangmann Energy Services GmbH & Co. KG - Dr. N. Lummer Geothermal power plant company Traunreut mbH - A. Utz H. Anger's Söhne GmbH - U. Schindler Pfalzwerke geofuture GmbH - J. Uhde Thomas Werner Industrial Electronics e. Kfm. - A. Lienert Wintershall Dea GmbH - Dr. O. Czuprat ILEAG e. V. - M. Hohmuth
Projektkoordination:	Dr. Susanne Kuchling, DGMK e.V., Hamburg
DGMK-Fachausschuss:	Bohr- und Komplettierungstechnik
Veröffentlichung:	Hamburg, November 2023



## DGМК-Research Report 836

### Electro-impulse method for the workover of a scale-narrowed borehole (EVA)

#### Abstract

The electrical impulse method (EIV) is based on the destructive effect of high-voltage impulses that are conducted through a solid material. It has been researched for several years at TU Dresden and TU Freiberg for drilling boreholes, the mining and processing of ores. A new field of application is now to be opened up with the reconditioning of production wells for geothermal energy as well as oil and gas. The technical problem to be solved is the removal of deposits, called scales. These occur because the production of the desired thermal waters also involves the extraction of accompanying substances. These substances precipitate and accumulate on the wall of the delivery pipes, thus reducing the possible production rate. Chemical, mechanical or even combined processes have been developed to remove these scales. However, there are a large number of scenarios where the known methods are limited and the clean-up is only possible with enormous financial and technical effort.

With the EIV-tool the scales can be solved without mechanical interaction. In a first development step, a prototype for the removal of scales in a 4 ½" pipe was developed and tested in the laboratory. To this end, tests were carried out to determine the impulse parameters using real test specimens and scales produced in the laboratory, and the necessary impulse voltage circuit was scaled down to the desired diameter.

---

Length of the report:	68 pages, 66 figures, 9 tables
Duration:	01.03.2021 - 31.05.2023
Research Scientists:	Prof. Dr. M. Reich, Prof. Dr. Moh'd M. Amro, Dr. C. Freese, S. Klein, TU Bergakademie Freiberg: Institute for Drilling Technology and Fluid Mining  Prof. Dr. F. Will, E. Anders, M. Voigt, TU Dresden: Professur für Baumaschinen
Project Advisors:	Aqua2Power Sales GmbH - G. Johne BITSz electronics GmbH - Dr. S. Schmidt DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH - H. Bültemeier ExxonMobil Production Deutschland GmbH - M. Dahms Fangmann Energy Services GmbH & Co. KG - Dr. N. Lummer Geothermal power plant company Traunreut mbH - A. Utz H. Anger's Söhne GmbH - U. Schindler Pfalzwerke geofuture GmbH - J. Uhde Thomas Werner Industrial Electronics e. Kfm. - A. Lienert Wintershall Dea GmbH - Dr. O. Czuprat ILEAG e. V. - M. Hohmuth
Project Coordination:	Dr. Susanne Kuchling, DGMK e.V., Hamburg
DGMK-Technical Commitee:	Drilling and Completion
Published:	Hamburg, November 2023

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	4
1 Stand der Forschung und Entwicklung.....	6
1.1 Aufwältigung (Workover).....	6
1.2 Ablagerungen (Scales).....	8
1.3 Elektro-Impuls-Verfahren.....	10
1.4 Bohrsystem DEISY.....	10
1.5 Voruntersuchungen.....	12
2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.....	13
2.1 AP 1 – Grundlagen.....	13
2.1.1 Beschaffung von Proben und Analyse.....	14
2.1.2 Grundlagenversuche.....	17
2.2 AP 2 – Herstellung und Analyse von Scales.....	21
2.2.1 Recherche zum Thema Scales Züchten.....	21
2.2.2 Züchten und Herstellung von Scale-Proben im Labor.....	22
2.2.3 Analyse der Scale-Proben.....	29
2.3 AP 3 – Bestimmung der EIV-Parameter der verschiedenen Scales.....	34
2.3.1 Versuchsprogramm und Versuchsaufbau.....	34
2.3.2 Versuchsauswertung.....	37
2.3.3 Durchschlagverhalten von Scales.....	39
2.4 AP 4 – Auslegung und Dimensionierung der Elektrode.....	40
2.4.1 Umsetzung und Erprobung des Funktionsmusters.....	43
2.4.2 Praxistests bei Partnern.....	45
2.5 AP 5 – Dimensionierung des Impulsspannungsgenerators.....	49
2.5.1 Randbedingungen für die Umsetzung.....	50
2.5.2 Auslegung der Schaltung.....	51
2.5.3 Auswahl und Qualifizierung der Kondensatoren.....	53
2.5.4 Konstruktion der Schaltung und Umsetzung des Prototyps.....	56
2.6 AP 6 – Untersuchung zum Abtrag vollflächiger Scales in einem Rohr.....	61
2.7 AP 7 – Entwicklung Gesamtkonzept.....	65
2.7.1 Spannungsversorgung mittels Wireline und Grainacher.....	66
2.7.2 Spannungsversorgung mittels Spülung.....	68

## Zusammenfassung

Bei der Produktion von Thermalwässern, Trinkwasser sowie Erdöl und Erdgas aus Bohrungen werden in der Regel neben den gewünschten Rohstoffen auch Begleitstoffe zutage gefördert. Diese können in gelöster Form (Ionen, Schwermetalle, Gase etc.), gasförmig ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  etc.) oder aber als Feststoff (Paraffine, Asphaltene, mineralische Feststoffe etc.) vorliegen. Darüber hinaus kommt es bei der Errichtung und der Erstbefüllung von Salzkavernen durch starken Temperaturabfall zu Salzablagerungen. Das Salz kristallisiert an der Wand des Rohres aus und verengt bzw. verstopft das Rohr. Da jeder Eingriff in den Untergrund eine Änderung der physikochemischen Bedingungen mit sich bringt, sind bei der Produktion fluider Rohstoffe sowohl Korrosionserscheinungen als auch die Ansammlung von Ablagerungen, sogenannten Scales, ein stets präsent, weltweites Problem ([1], [2], [3], [4], [5]). Das Auftreten dieser Phänomene betrifft dabei meist alle unter- und obertägigen Anlagenteile, welche mit dem zu fördernden Fluid in Berührung kommen. Neben der Beeinträchtigung der Funktionsweise dieser Anlagenteile ist auch eine signifikante Minimierung ihrer Lebensdauer zu beobachten. Zudem treten in Bohrlochnähe Ablagerungen innerhalb des Förderhorizonts auf. In Summe kann dadurch die Förderrate einer Bohrung soweit beeinträchtigt werden, dass die Wirtschaftlichkeit der Förderung gefährdet ist. Wird beispielsweise der mittel- und nordeuropäische Raum betrachtet, so gehören Scales in Öl- und Gas-Bohrungen der Nordsee zu den am häufigsten auftretenden Problemen während der Produktion [6]. Die verursachten Probleme und die damit verbundenen Kosten dieser Scales können dabei dramatisch sein. So ist bei einer Bohrung im Millerfeld der Nordsee die Produktion innerhalb von 24 h von  $4770 \text{ m}^3/\text{d}$  auf  $0 \text{ m}^3/\text{d}$  zurückgegangen [7]. Allein durch die verminderte Produktionsleistung verliert die Öl- und Gasindustrie mehrere hundert Millionen US-Dollar jährlich [8].

Bis heute sind die Möglichkeiten zur Beseitigung von Scales und den damit verbundenen Problemen begrenzt und teilweise sehr ineffektiv. Die derzeitigen Methoden zum Entfernen von Scales beinhalten chemische und mechanische Verfahren. Diese Verfahren haben in Abhängigkeit vom Ort des Auftretens der Scales und deren physikochemischen Eigenschaften jeweils ihre eigenen spezifischen Einsatzgebiete. Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) als mineralisches Scale kann beispielsweise unter Einsatz von Salzsäure relativ zügig entfernt werden. Andere mineralische Scales, wie beispielsweise Baryt ( $\text{BaSO}_4$ ) oder Galenit ( $\text{PbS}$ ), sind jedoch sowohl gegenüber chemischen als auch mechanischen Verfahren weitaus widerstandsfähiger und oftmals sehr schwer zu entfernen. Zudem sind teer- oder wachsartige Scales in Kohlenwasserstoffbohrungen chemisch kaum zu beseitigen.

Oft bestehen Scales jedoch nicht ausschließlich aus einer einzelnen Komponente, was die Wirksamkeit der angewendeten Verfahren noch weiter herabsetzen und sogar verhindern kann. Akkumulierte, widerstandsfähige Schichten aus impermeablen Scales können den kompletten Verschluss einer Bohrung verursachen. Dies hat meist zur Folge, dass die Produktion für ein Workover unterbrochen werden muss, um die Scales zu entfernen. Workover ist die Intervention in eine in Betrieb befindliche Bohrung, bzw. eine Arbeitsmethode zur Durchführung von bestimmten Operationen mittels Spezialausrüstungen (Workover-Anlage) in der Bohrung. Solche Operationen können z. B. eine Säuberung der Steigrohre von Ablagerungen wie Paraffin, Korrosionsprodukten und Scales, oder Regulierung und Absperrung des Förderstromes sein. Ist der Teil des Förderstrangs nicht vor Ort zu reinigen, muss dieser entweder ausgebaut und obertägig bearbeitet werden oder es muss sogar ein kompletter Austausch erfolgen. In bestimmten Fällen ist eine chemische Entfernung der Scales aus Genehmigungsgründen untersagt, z. B. an einigen Geothermiebohrungen.



Da Scales innerhalb kürzester Zeiträume eine erhebliche Beeinträchtigung des Förderprozesses verursachen können, sowie eine nicht unwesentliche Erhöhung des Rohreigengewichts nach sich ziehen, ist eine Weiterentwicklung der vorhandenen Methoden bzw. die Entwicklung neuer Methoden zur schnelleren und effektiveren Entfernung von Scales unumgänglich. Ein gänzlich neuer Ansatz zum Entfernen mineralischer Scales stellt dabei das Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) dar. Beim EIV werden Hochspannungsentladungen genutzt, um Scales zu lösen. Ursprünglich wurde dieses Verfahren für die Tiefbohrtechnik entwickelt, um im Hartgestein zu bohren. In dem vom BMWi geförderten Projekt „Entwicklung und in-situ Erprobung eines EIV-Bohrsystems (ISEB)“ wurde ein komplettes Bohrsystem auf Basis des EIV entwickelt. Die zur Erzeugung der Hochspannungsimpulse benötigte elektrische Energie wird komplett im Bohrloch unter Nutzung der hydraulischen Energie der Bohrspülung produziert, wodurch das Bohrsystem mit konventioneller Bohrausrüstung kompatibel ist. Die EIV-Technologie lässt sich auch für Aufwältigungsarbeiten einsetzen, muss jedoch dafür angepasst werden. Da nicht die Bohrlochsohle, sondern die Innenfläche der Verrohrung (Casing/Tubing) zu bearbeiten ist, müssen die Elektroden konstruktiv neugestaltet werden. Zudem muss die Stromerzeugung nicht komplett im Bohrloch erfolgen, da es beim Workover möglich ist, ein Stromversorgungskabel in das Bohrloch mitzuführen, wodurch wiederum die Ladespannung obertägig zur Verfügung gestellt werden kann. Lediglich die Hochspannungsimpulse müssen im Bohrloch erzeugt werden, da diese nicht über weite Strecken transportiert werden können. Dies bedeutet eine deutliche Vereinfachung des EIV-Systems im Vergleich zum bereits entwickelten Bohrsystem.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass das EIV zum Entfernen von Scales eine sehr gute Ergänzung zu bestehenden Verfahren darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen nicht nur, dass das Verfahren prinzipiell funktioniert, sondern sich auch in bestehende Anlagentechnik und Prozesse integrieren lässt. Der umgesetzte Prototyp bildet eine sehr gute Ausgangsbasis für die Fortführung der Entwicklungsarbeiten. Diese müssen insbesondere darauf abzielen, Erfahrungen in längeren Probekörpern zu sammeln, um die Leistungsfähigkeit und Standfestigkeit des Verfahrens zu ermitteln und zu steigern. Dazu sind Versuche bei Partnern aus der Industrie unabdingbar. Nur so lassen sich die ökonomischen und technischen Fragestellungen lösen, um den Prototyp in eine kommerzielle Anwendung zu überführen.

Neben diesen Fragen war es zudem notwendig, die Grenzen des Prozesses zu ermitteln. Das bedeutet, dass eine Erprobung an anderen Scales zur Ermittlung von Lastannahmen und zur Identifizierung von möglicherweise nicht bearbeitbaren Scales erfolgen musste. Zudem musste eine maximale Impulswiederholrate unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens der Schaltung bzw. des elektrischen Verhaltens des Prozessraums herausgearbeitet werden.

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Projekts und der vielfachen Anwendungsmöglichkeit sollte es das Ziel sein, in einem nächsten Entwicklungsschritt das EIV-Reinigungswerkzeug hin zu einem anwendungsnahen Prototyp zu entwickeln.

Des Weiteren haben sich aus den Ergebnissen der Forschungsarbeiten verschiedene weitere Einsatzszenarien ergeben, die ebenfalls ein hohes Potenzial zur wirtschaftlichen Anwendung haben. Zum einen ist das die Reinigung von komplexen Geometrien in obertägigen Anlagenteilen, wie Wärmetauscher, Ventilen, Rohrleitungen oder Filtern. Dort können durch die Zuführung der Impulse mittels flexibler Kabel auch Scales in schwer zugänglichen Bereichen gelöst werden. Weiterhin ist denkbar die Impulsspannungsquellen mit geringer Leistung und Reinigungselektroden an kritischen Bereichen der Pumpengehäuse (vor allem bei Geothermiebohrungen) dauerhaft zu installieren, die bei Bedarf zugeschaltet werden um beginnende Ablagerungen zu entfernen.

Ein weiterer möglicher Anwendungsfall ist die Entfernung von Ablagerungen als Alternative zu konventionellen Strahlverfahren (Wasser, Sand, Eis) in Aufbereitungsbetrieben. Der Vorteil wäre hier, der staubfreie Prozess durch die Verwendung von Wasser als Dielektrikum und der geringere Materialaufwand bei den Strahlmedien.

Weiterhin ist das Verfahren auch zum Entfernen von Anhaftungen an Werkzeugen und Vorrichtungen geeignet. Als Bsp. sind hier Tellermühlen oder Mischeinrichtungen zu nennen, die zum Teil auch sehr komplexe Geometrien aufweisen und nur schwer mit mechanischen Werkzeugen zugänglich sind.

## Summary

During the production of thermal water, drinking water, oil and gas from wells, accompanying substances are usually produced in addition to the desired raw materials. They are in dissolved (ions, heavy metals, gases, etc.), gaseous (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, etc.) or solid form (kerosenes, asphaltenes, mineral solids, etc.). In addition, salt deposits occur during the construction and initial filling of salt caverns due to a high drop in temperature. The salt crystallizes on the wall of the pipe and narrows or blocks the pipe. Since every intervention in the subsurface causes a change in the physicochemical conditions, both corrosion phenomena and the accumulation of deposits, called scales, are an ever-present global problem in the production of fluid raw materials ([1], [2], [3], [4], [5]). The occurrence of these phenomena usually affects all underground and surface system components that come into contact with the pumped fluid. In addition to the impairment of the functionality of these system components, a significant minimization of their service life can also be observed. In addition, deposits occur within the production horizon near the borehole. All in all, this can impair the production rate of a well to such an extent that the economic viability of production is jeopardized. In Central and Northern Europe, for example, scaling in North Sea oil and gas wells is one of the most common problems during production [6]. The problems caused by these scales and the associated costs can be dramatic. For example, production from a well in the Miller field in the North Sea fell from 4770 m<sup>3</sup>/d to 0 m<sup>3</sup>/d within 24 hours [7]. The oil and gas industry loses several hundred million US dollars a year due to the reduced production alone [8].

To date, the options for eliminating scales and the associated problems are limited and sometimes very ineffective. Current methods for removing scales include chemical and mechanical methods. These methods have their own specific applications depending on where the scales grow and their physicochemical properties. Calcite (CaCO<sub>3</sub>) as a mineral scale, for example, can be removed relatively quickly using hydrochloric acid. However, other mineral scales, such as barite (BaSO<sub>4</sub>) or galena (PbS), are far more resistant to both chemical and mechanical processes and are often very difficult to remove. In addition, tar or waxy scales in hydrocarbon wells are almost impossible to remove chemically.

However, scales often do not consist exclusively of a single component, which can further reduce and even prevent the effectiveness of the methods used. Accumulated, resistant layers of impermeable scales can cause the complete closure of a well. This usually means that production has to be interrupted for a workover to remove the scales. Workover is the intervention in an operating well, or a working method for carrying out certain operations in the well using special equipment (workover rig). For instance, such operations can be cleaning the riser pipes from deposits such as paraffin, corrosion products and scales, or regulating and shutting off the production flow. If the part of the conveyor line cannot be cleaned on site, it must either be removed and worked on above ground or even completely replaced. In certain cases, chemical removal of the scales is prohibited for licensing reasons, e.g. in some geothermal wells.

As scales can cause a considerable impairment of the pumping process within a very short period of time and result in a not insignificant increase in the weight of the pipe, further development of existing methods or the development of new methods for faster and more effective removal of scales is essential. A completely new approach to removing mineral scales is the electro-impulse process (EIV). With EIV, high-voltage discharges are used to loosen scales. This method was originally developed for deep drilling technology to drill in hard rock. In the BMWi-funded project "Development and in-situ testing of an EIV drilling system (ISEB)", a complete drilling system based on EIV was developed. The electrical energy required to generate the high-voltage pulses is produced entirely in the borehole using the hydraulic energy of the drilling fluid, making the

drilling system compatible with conventional drilling equipment. The EIV technology can also be used for reaming work, but must be adapted for this purpose. As the inner surface of the casing/tubing rather than the bottom of the borehole has to be processed, the electrodes have to be redesigned. In addition, the power does not have to be generated entirely in the borehole, as it is possible to run a power supply cable into the borehole during the workover, which in turn means that the charging voltage can be provided above ground. Only the high-voltage pulses have to be generated in the borehole, because these cannot be transported over long distances. This means a significant simplification of the EIV system compared to the drilling system already developed.

The results of the project show that the EIV for removing scales is a very good addition to existing processes. The findings show that the process works and can be integrated into existing systems and processes. The implemented prototype forms a very good starting point for the continuation of development work. In particular, this must aim to gather experience in longer test specimens in order to determine and improve the performance and stability of the process. Trials with partners from industry are essential for this. Only in this way can the economic and technical issues be resolved in order to transfer the prototype into a commercial application.

In addition to these questions, it was also necessary to determine the limits of the process. This meant that tests had to be carried out on other scales to determine load assumptions and to identify scales that could possibly not be processed. In addition, a maximum pulse repetition rate had to be worked out, taking into account the thermal behavior of the circuit and the electrical behavior of the process space.

Due to the positive results of the project and the many possible applications, the aim should be to develop the EIV cleaning tool into an application-oriented prototype in the next development step.

Furthermore, the results of the research work have led to various other application scenarios that also have a high potential for economic application. One of these is the cleaning of complex geometries in surface plant components, such as heat exchangers, valves, pipelines or filters. By supplying the pulses via flexible cables, scales can also be removed in areas that are difficult to access. It is also conceivable to permanently install the pulse voltage sources with low power and cleaning electrodes in critical areas of the pump housing (especially in geothermal boreholes), which can be switched on as required to remove incipient deposits.

Another possible application is the removal of deposits as an alternative to conventional blasting processes (water, sand, ice) in treatment plants. The advantage here would be the dust-free process due to the use of water as a dielectric and the lower material costs for the blasting media.

The process is also suitable for removing adhesions from tools and devices. Examples include disk mills or mixing equipment, some of which have very complex geometries and are difficult to access with mechanical tools.

# 1 Stand der Forschung und Entwicklung

## 1.1 Aufwältigung (Workover)

Unter dem Begriff Aufwältigung (Workover) wird in der Bohrtechnik die Aufrechterhaltung, Verbesserung oder Wiederherstellung der Förderleistung von Erdöl, Erdgas oder Grundwasser in einem Bohrloch bzw. Brunnen durch invasive Eingriffe verstanden.

Durch diesen Eingriff wird das Bohrloch geometrisch verändert, Einfluss auf die Produktion genommen oder die Möglichkeit geschaffen, Bohrlochmessungen durchzuführen. Bohrungen müssen immer dann aufgewältigt werden, wenn z. B. Bohrlochkopfkomponenten, das Förderrohr, die Rohrtour oder andere untertägige Anlagenteile, wie Tauchpumpen oder Ventile, im Bohrloch repariert oder ausgetauscht werden müssen. Dies kann aufgrund von Materialbeanspruchung, -korrosion oder -beschädigungen nötig sein. So z. B., wenn die Rohrtour, die Kiespackung oder das Filterrohr durch Scales in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt sind. Des Weiteren werden Aufwältigungsarbeiten durchgeführt, um leistungsfähigere Komponenten einzusetzen. Auch wenn sich infolge der Nutzung der Lagerstätte – z. B. bei einer Gaslagerstätte – die Druckverhältnisse ändern, wird von Aufwältigung gesprochen, wenn der Bohrlochdurchmesser durch den Einbau eines schlankeren Förderrohres verringert wird, um die Fördergeschwindigkeit zu erhöhen. Ebenso sind erneute Perforationen oder Abdichtungen der Verrohrungen sowie Weitervertiefungen der Bohrungen unter dem Begriff Aufwältigungsarbeiten zusammengefasst. Um Aufwältigungsarbeiten durchführen zu können, wird meistens der Förderprozess unterbrochen, woraus Produktionsausfall und Kostenerhöhung resultieren. Weitere Kosten entstehen durch den Einsatz von Chemikalien und die Stimulation während der Produktion bzw. deren Neuperforation.

Es gibt verschiedene Arten, Workover-Arbeiten durchzuführen: Wireline, Service-Anlage, Coiled Tubing und Jointed Pipe. Hauptsächlich unterscheiden sich die Arten darin, wie z. B. ein Werkzeug in eine Bohrung hinab und wieder heraus befördert werden kann. Beim Wireline geschieht dies über ein Seil oder Kabel. Das kann eine Slickline (glatter Draht), Braided Line (Stahlseil) oder eine Electric Line (Stahlseil mit elektrischem Kabel) sein. Beim Coiled Tubing handelt es sich um ein auf eine Trommel aufgespultes langes Rohr, an dessen unterem Ende das Werkzeug angebracht wird. Das Jointed Pipe unterscheidet sich zum Coiled Tubing, dass einzelne Rohre (Tubinge, Bohrgestänge) miteinander verschraubt werden müssen. Service-Anlagen sind Anlagen die auf einen speziellen Service abgestimmt sind, wie z. B. bei der Anwendung von chemischen Verfahren. Je nachdem mit welcher Anlage die Workover-Arbeiten durchgeführt werden, müssen entsprechende Vorschriften und Regeln eingehalten werden. Neben den allgemein geltenden Normen für die Tiefbohrtechnik, werden über die BVEG technische Regeln, wie z. B. für Workover-Arbeiten zur „Bohrlochkontrolle – Bohren, Workover, Well Intervention“ oder den „Allgemeiner Leitfaden für Coiled Tubing-Einsätze“ erarbeitet und als Regelwerk zur Verfügung gestellt.

Für die Anpassung des EIV-Bohrsystems an Aufwältigungsarbeiten wurde das Coiled Tubing und Wireline-Verfahren gewählt. Beim Coiled Tubing wird ein langes auf einer Trommel aufgespultes Rohr (Coiled Tubing) in das Bohrloch herabgelassen. Dies bietet den großen Vorteil, dass keine Bohrstangen miteinander verschraubt werden müssen und über das Rohr auch ein Kabel für die Stromversorgung in das Bohrloch eingebracht werden kann. Durch das Rohr lassen sich zudem die benötigten Fluide in das Bohrloch fördern. Eine Rotation des Rohres ist allerdings nicht möglich. Dies ist jedoch für den Einsatz des EIV auch nicht erforderlich, da der vollflächige Abtrag durch ein geeignetes Design der Bohrelektrode erreicht wird.

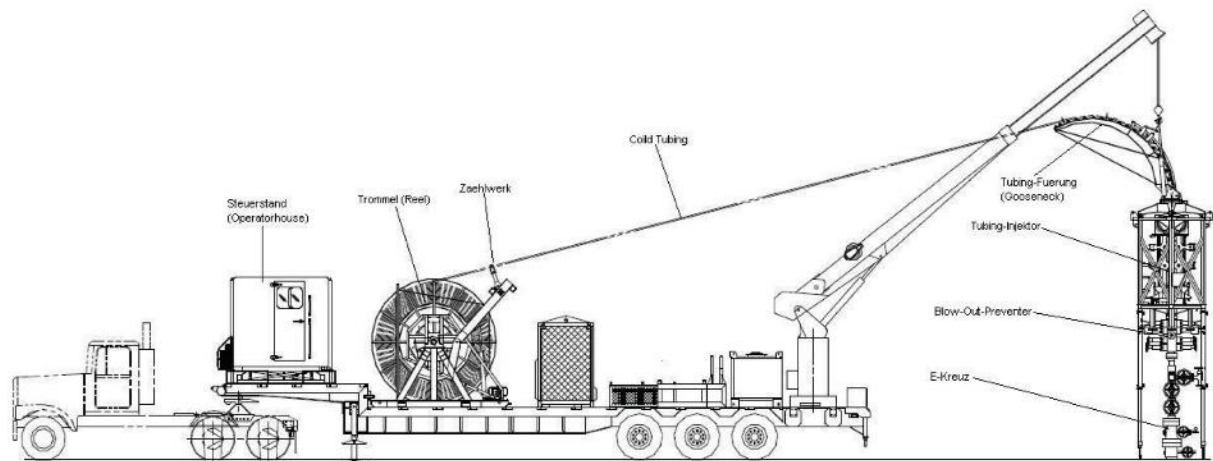


Abbildung 1.1: „Coiled-Tubing“ [9]

Eine typische „Coiled-Tubing“-Anlage ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Eine solche Anlage setzt sich üblicherweise aus dem Steuerstand (Operatorhouse), der Trommel (Reel), dem Coiled Tubing, der Tubing-Fuehrung (Gooseneck), dem Tubing-Injektor (zum Drueken und Ziehen des Tubings), einem Blow-Out-Preventer, einer Energieversorgungseinheit (Power Pack) und hydraulischen Pumpen (Hydraulic Pumps) zusammen. Bei kleinen Anlagen sind all diese Komponenten auf einem LKW verbaut (s. Abbildung 1.1), für große Anlagen werden mehrere LKW benötigt. Allgemein sind diese Anlagen so konzipiert, dass sie sehr mobil sind und schnell auf- und abgebaut werden können.

Neben dem Coiled Tubing ist auch eine Wireline-Lösung möglich. Mit Hilfe einer ausreichend dimensionierten Electric Line würde die Stromversorgung ebenfalls von obertage erfolgen können.



Abbildung 1.2: Methoden zum Entfernen von Scales

Die Abbildung 1.2 stellt die derzeit üblichen Methoden zur Beseitigung von Scales im Bohrloch dar. Die Inhibierung des Lagerstättenfluids dient dabei nicht dem Entfernen von Scales, sondern vielmehr der Prävention von Scales. Alle weiteren Methoden können einzeln oder in bestimmten Kombinationen angewendet werden, um ein Bohrloch von Scales zu befreien. Die genannten Methoden sind jeweils für einen bestimmten Einsatzzweck gut geeignet. Bei besonders harten Ablagerungen stoßen die meisten der Verfahren jedoch an ihre Grenzen. Außerdem können sie das Rohr beschädigen, auf dem sich die Scales befinden. Auch wenn diese Beschädigung minimal und nur an der Rohroberfläche ist, so verringert dieser Eingriff dennoch die Lebensdauer des Rohres.

## 1.2 Ablagerungen (Scales)

Natürlich vorkommende Wässer weisen stets einen Anteil gelöster Stoffe auf. Die Menge und die Zusammensetzung dieser gelösten Stoffe ist dabei im Wesentlichen von folgenden Parametern abhängig [10]:

- Klimaverhältnisse zum Zeitpunkt der Infiltration,
- geologischer Bau bzw. Morphologie des Untergrundes,
- Transportweg und Verweilzeit des Wassers im Untergrund,
- Interaktionen mit bereits vorhandenen Wässern bzw. anstehenden Gesteinen,
- Lithologie der Gesteine im Untergrund.

Wird beispielsweise ein Reservoir betrachtet, welches in seiner ursprünglichen Form vorliegt, so sind alle Phasen – Gestein (fest), Formationswasser & Öl (flüssig), Gas, Begleitgase (gasförmig) – im Gleichgewicht zueinander vorhanden. Die Beschaffenheit unterirdischer Wässer ist somit das Ergebnis chemisch-physikalischer Prozesse in Richtung eines Gleichgewichtszustands und lässt gleichzeitig Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Reservoirs zu. Vereinfacht dargestellt werden bspw. in karbonatisch gebundenen Sandstein-Reservoiren erhöhte Anteile an Calcium und Magnesium im Formationswasser detektiert. Der Gehalt an Barium und Strontium ist in Formationswässern silikatisch gebundener Sandsteine erhöht [6].

Sobald eine Bohrung innerhalb eines Reservoirs abgeteuft wird und die fluiden Phasen in Bewegung gebracht werden, wird das vormals vorhandene Gleichgewicht der Phasen gestört. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um eine Bohrung in einer Erdöl- bzw. Erdgas-Lagerstätte oder um eine Geothermiebohrung handelt. Die beiden wesentlichen Faktoren, welche die Gleichgewichtsverhältnisse stören, sind die Veränderung von Druck und Temperatur. Da die Löslichkeit sowohl organischer als auch anorganischer Stoffe in komplexer Abhängigkeit zu diesen beiden Faktoren steht, treten im Bereich des Bohrlochs Lösungs- und Fällungserscheinungen auf [11]. Typischerweise fördert eine Absenkung der Temperatur Fällungserscheinungen. Derselbe Zusammenhang wird in der Regel auch bei einer Verringerung des Drucks beobachtet. So führt in vielen Fällen eine Verringerung des Drucks um 480 bar (7000 psi) zu einer Reduktion der Löslichkeit um den Faktor 2 [6].

In Folge der Druck-, Temperatur- und pH-Wert-Änderungen treten sowohl unter- als auch obertägig unterschiedlichste Ablagerungen auf [12]. Es wird dabei zwischen Scales als Ablagerungsprodukt anorganischer Stoffe [13] sowie Wachse bzw. Asphaltene als Ablagerungsprodukte organischer Stoffe unterschieden [8]. Ein weiterer Einflussfaktor, der Lösungs- und Fällungserscheinungen maßgeblich beeinflussen kann, ist das Vorhandensein von Gasen sowie damit einhergehende physikochemische Prozesse, wie beispielsweise die Änderung des pH-Werts. Innerhalb der ungestörten Lagerstätte liegen Begleitgase, wie CO<sub>2</sub> oder H<sub>2</sub>S, in der Regel in gelöster Form vor. Da die Löslichkeit von Gasen ebenfalls druck- und temperaturabhängig ist, wird auch dieses Gleichgewicht mit dem Durchteufen einer Formation und vor allem bei der Produktion stark beeinträchtigt. Dabei ist anzumerken, dass der Einfluss des Drucks auf die Löslichkeit von Gasen erheblich höher ist als der Einfluss des Drucks auf die Löslichkeit von Feststoffen [10].

Neben den natürlich vorkommenden Begleitgasen beeinflusst auch Sauerstoff das Fällungsverhalten gelöster Stoffe [14]. Sowohl bei der Produktion aus Erdöl- und Erdgasbohrungen als auch beim Betreiben von Geothermiebohrungen wird Wasser in das jeweilige Reservoir (re-)injiziert. Dieses Wasser hat üblicherweise nicht dieselbe Zusammensetzung, wie das ursprüngliche Formationswasser und beinhaltet zudem einen bestimmten Anteil an Sauerstoff [8].

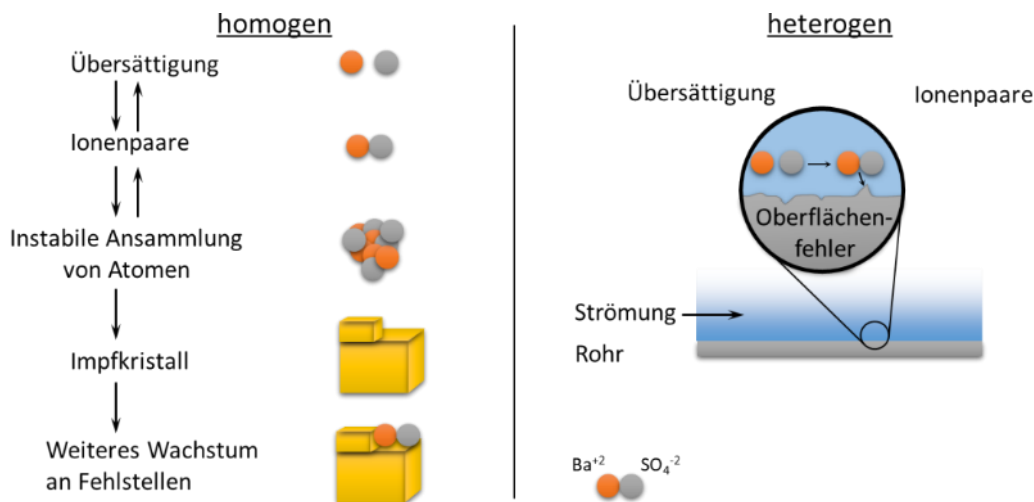


Abbildung 1.3: Homogene und heterogene Entstehung von Scales [6]

Aufgrund des geänderten Chemismus des Wassers werden auch hier Fällungsreaktionen verstärkt. Zudem ist eine korrosive Wirkung des eingebrachten Sauerstoffs nicht auszuschließen. Bei der Ausbildung von Scales lassen sich zwei Bildungsprozesse voneinander unterscheiden – homogene und heterogene Prozesse (s. Abbildung 1.3). Bei einer homogenen Scale-Bildung kommt es zu einer instabilen Anhäufung von Atomen oder Ionen. Diese „Ansammlungen“ wachsen durch weitere Anlagerungen von Ionen zu Impfkristallen heran. Ausgehend von diesen Impfkristallen wächst ein Kristall des entsprechenden Minerals heran. Das Kristallwachstum ist dabei richtungsabhängig und kann durch das Vorhandensein anderer Minerale beeinflusst werden. Bei der heterogenen Scale-Bildung wachsen die Kristalle nicht an einem Impfkristall, sondern an Defekten der Rohroberfläche. Dies kann beispielsweise durch die Oberflächenrauheit, durch Perforationen im Rohr oder an Rohrverbindern der Fall sein. Die Turbulenz der Strömung hat dabei auch einen Einfluss auf die Scale-Bildung.

In einem Produktionsrohr können Scales an den unterschiedlichsten Orten auftreten, wie z. B. an Perforationen, an Rohrübergängen, an der Wand des Rohres, an verlorenen Bauteilen/Werkzeugen in der Bohrung (Fish) oder Sicherheitsventilen. Die Ablagerungen bestehen dabei selten nur aus einem Mineral oder einer Schicht. Oft handelt es sich um komplexe Zusammensetzungen, was die Beseitigung der unerwünschten Ablagerungen oftmals erschwert. Abbildung 1.4 stellt ein solches Vorkommen von Scales innerhalb eines Produktionsrohres dar.

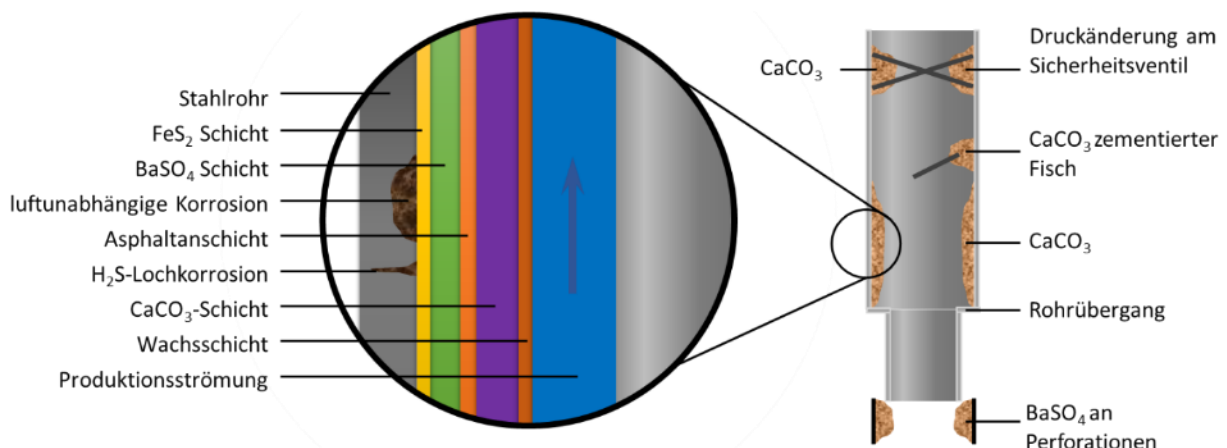


Abbildung 1.4: Ablagerungen in einem Produktionsrohr nach [6]



Raue Bohrlochwandoberflächen begünstigen die Ablagerungen von Scales, was dazu führt, dass bereits vorhandene Scales die Ablagerung von weiteren Scales noch erleichtern und somit an bestimmten Stellen schnell signifikante Querschnittsverengungen entstehen können.

### 1.3 Elektro-Impuls-Verfahren

Das Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) beschreitet einen völlig neuen Weg, um Gestein aus einer Formation zu lösen, und lässt im Vergleich mit konventionellen Bohrverfahren 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 dem Gestein und sind von einem möglichst gering leitfähigen Fluid umgeben. Bei einer genügend kurzen Anstiegszeit von unter 120 ns (Bsp. Granit-Wasser; Werte sind gesteins- und fluidabhängig) der elektrischen Spannung von mehreren 100 kV, ist die Durchschlagfestigkeit des Fluides höher als die des Gesteins, wodurch die Spannungsimpulse („Blitze“) zwischen den zwei Elektroden durch das Gestein geleitet werden (s. Abbildung 1.5).

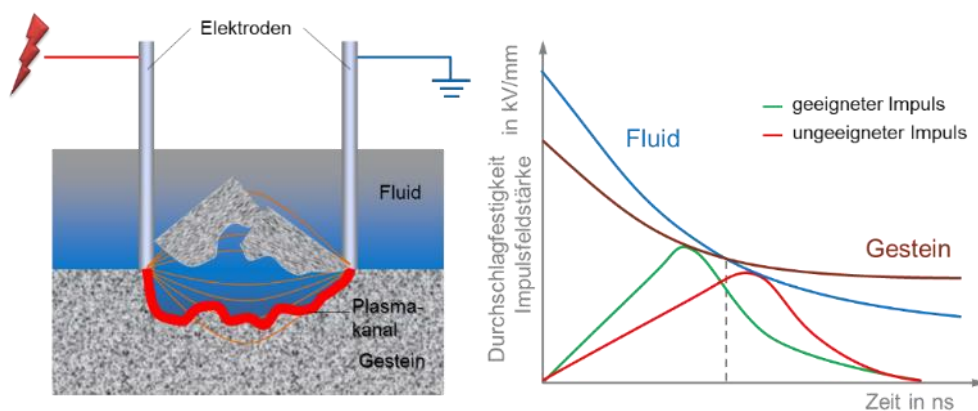


Abbildung 1.5: Schema des EIV-Wirkmechanismus

Durch die schlagartige Temperatur- und Druckerhöhung im Durchschlagkanal wird die Zugfestigkeit des Gesteins überwunden. Da diese je nach Gestein nur ca. 1/5 bis 1/10 der Druckfestigkeit beträgt, wird beim Einsatz des EIV unter Standardbedingungen eine sehr geringe spezifische Energie von 100 bis 200 J/cm<sup>3</sup> für die Gesteinszerstörung benötigt, wohingegen für das drehende Bohren (Rotary-Bohren) eine spezifische Energie von 600 bis 950 J/cm<sup>3</sup> erforderlich ist [15]. Abbildung 1.5 stellt den Wirkmechanismus des EIV schematisch dar.

### 1.4 Bohrsystem DEISY

Der Name DEISY steht für „Deep Drilling with Electric Impulse Drilling System“. Das Bohrsystem wurde gemeinsam von den antragstellenden Forschungseinrichtungen in drei aufeinanderfolgenden Forschungsprojekten über einen Zeitraum von 10 Jahren entwickelt ([16], [17], [18]).

Die Kompetenzen der TU Dresden liegen seit Beginn der Arbeiten bei dem Elektro-Impuls-Verfahren und der Entwicklung und Fertigung der entsprechenden elektrischen Komponenten, wie Elektrode und Impulsspannungsgenerator, sowie der Durchführung vielfältiger Versuche mit diesen Komponenten. Es stehen mehrere Generatoren und Versuchsstände für die Durchführung der geplanten Versuche zur Verfügung.

Die TU Bergakademie Freiberg konzentriert sich auf die technische Umsetzung des Elektro-Impuls-Verfahrens in der Tiefbohrtechnik. Dazu gehört die Erarbeitung von Konzepten zur Umsetzung in der Praxis, aber vor allem der komplexe Bereich der Bohrspülung. Für die Analyse

von Bohrspülungen und anderen Fluiden steht ein gut ausgestattetes Spülungslabor zur Verfügung.

Bei der Entwicklung des EIV-Bohrsystems wurde angestrebt, dass es mit dem derzeit verwendeten Equipment der konventionellen Tiefbohrtechnik kompatibel ist. 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 zügig zu integrieren. Das Ziel des EIV- Systems ist es, ohne Kabel in oder am 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 unter Tage zu erzeugen. Somit bestand die Aufgabe darin, neben dem eigentlichen Bohrkopf auch die gesamte Stromerzeugung für den Impulsgenerator nach unter Tage zu verlegen und ein komplettes Bohrsystem zu entwickeln, das in den Bohrstrang integriert werden kann. Das Konzept dieses Systems ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

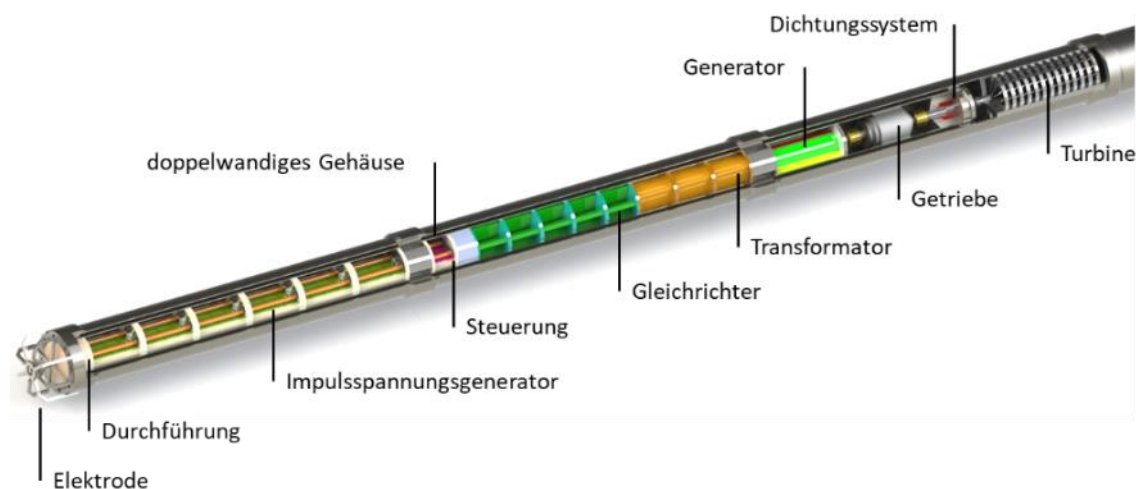


Abbildung 1.6: Konzept des EIV-Bohrsystems

Das System ist in mehrere Hauptsegmente unterteilt. Das erste ist das Bohrkopfsegment bestehend aus Elektrode und Impulsspannungsgenerator. Das zweite und dritte Segment dient der Energiebereitstellung. Diese bestehen zum einen aus Steuerung, Gleichrichter und Transformator und zum anderen aus Generator, Getriebe und Bohrmotor bzw. Turbine. Alle drei Segmente haben je eine Länge von ca. 9 m (30 ft). Dies ergibt eine Gesamtlänge für das EIV-Bohrsystem von ca. 30 m.

Für alle Komponenten existiert ein erfolgreich erprobter Laborprototyp. Die Elektrode, die Durchführung und der Impulsspannungsgenerator wurden 2017 in einer flachen Bohrung (12 ¼“, 6 m Teufe) im Gneis in Freiberg getestet. Die Prototypen wurden erfolgreich in Betrieb genommen und es wurde ein Abtrag nachgewiesen. Der Versuch musste vorzeitig auf Grund technischer Probleme abgebrochen werden. Diese Probleme ließen sich aber beheben und es wird derzeit eine Wiederholung des Versuches vorbereitet. Eine Umsetzung in die Praxis ist derzeit noch nicht erfolgt.

Trotz des mangelnden Bohrfortschrittes wurde der Versuch als insgesamt positiv bewertet. Um die Umsetzbarkeit des EIV in großen Tiefen und den damit verbundenen hohen Druck nachzuweisen, erfolgten Versuche im kleinen Maßstab bis 500 bar. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Druck keinen Einfluss auf das Löseverhalten hat [19].

Neben den klassischen Gesteinen aus der Tiefbohrtechnik, wie Sandstein, Schiefer, Gneis oder Granit, wurden auch Glas, Kohle oder vulkanisches Glas untersucht. Weiterhin sind Erze,

Schlacke, Asphalt oder Beton in anderen Forschungsbereichen untersucht worden. Bei allen Stoffen gelang ein Durchschlag.

## 1.5 Voruntersuchungen

Im Rahmen von Vorversuchen ist das EIV hinsichtlich einer Eignung für die Anwendung bei der Scalebeseitigung untersucht worden. Durch die Firma GeoThermal Engineering GmbH wurden zwei Proben mineralischer Scales aus zwei verschiedenen Geothermiebohrungen zur Verfügung gestellt. Dies war zum einen ein Eisensulfid, welches sich folgendermaßen zusammensetzte: ca. 56 % FeS, ca. 26 % Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>, ca. 15 % FeS<sub>2</sub> und ca. 3 % FeCO<sub>3</sub>. Bei der zweiten Probe handelt es sich um ein Karbonat, dessen exakte Zusammensetzung jedoch nicht bekannt ist.

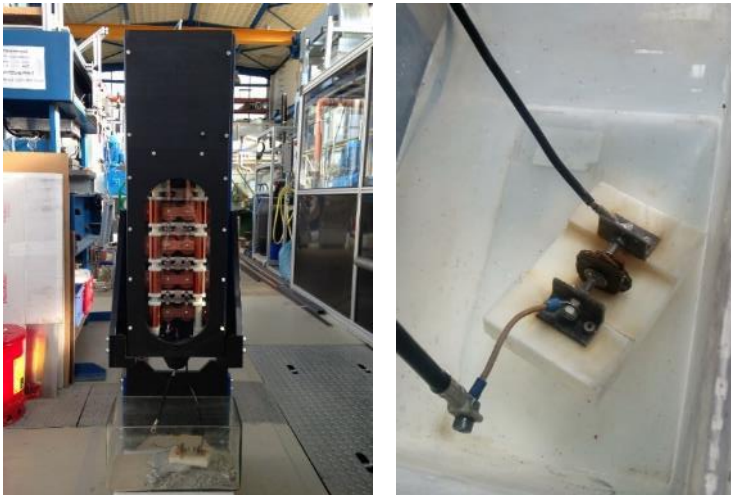


Abbildung 1.7: Demonstrationsmodell Marxgenerator (li.) und Elektrodenanordnung (re.)

Beide Proben wurden unter Zuhilfenahme des EIV-Demonstrators (Abbildung 1.7) mit Spannungsimpulsen beaufschlagt. Der EIV-Demonstrator verfügt dabei über einen vierstufigen Marxgenerator, welcher mit einer Ladespannung von 18 kV aufgeladen wird und somit über eine Entladespannung von ca. 72 kV verfügt. Die Energie des Demonstrationsmodells beträgt mit 7 J etwa 1/80 des EIV-Bohrsystems (560 J).



Abbildung 1.8: Eisensulfid-Probe nach fünf Impulsen

Zur Beaufschlagung mit Spannungsimpulsen wurden die Proben einzeln zwischen den Elektroden positioniert und jeweils fünf Impulsen ausgesetzt. Das umgebende Fluid war Leitungswasser. Bei beiden Probekörpern konnte ein Durchschlag erzielt werden, welcher eine Trennung beider Proben in mehrere Teile bewirkte (Abbildung 1.8).

Die Vorversuche belegten, dass es prinzipiell möglich ist, mineralische Scales mit Hilfe des EIVs zu zerstören.

## 2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Problemstellung und des Stands der Forschung und Entwicklung besteht die offensichtliche Notwendigkeit, ein zuverlässiges, effektives und vor allem effizientes Abtragverfahren für die Beseitigung von Scales zu entwickeln.

Scales treten vorwiegend im Tubing (Förderrohrtour) auf. Bei der Erdgas- und Erdölförderung liegen die Innendurchmesser der Förderrohrtour typischerweise zwischen 2 7/8" und 7". Bei Geothermiebohrungen werden Tubings mit größerem Durchmesser eingesetzt, aber auch in diesem Anwendungsgebiet sind Tubings unter 7" eine gängige Größe. Für das Projekt wurde ein maximaler Innendurchmesser von 4 1/2" festgelegt. In den Bohrungen herrschen Temperaturen bis zu 150 °C bei Drücken bis zu 300 bar.

In Abstimmung mit dem Projektausschuss (PA) wurden diese Eckdaten als Randbedingungen für die Zielerreichung definiert. Daraus ergeben sich vier wegweisende Teilziele:

1. Unter bohrlochnahen Bedingungen werden im Labor künstliche Scales gezüchtet, um das Verständnis über die Entstehung und das Wachstum von Scales systematisch zu verbessern, wodurch es gelingt, zukünftig die Scale-Bildung im Bohrloch verhindern zu können. Die zu betrachtenden Haupteinflussfaktoren sind die Zusammensetzung des Bohrlochfluides sowie Druck-, Temperatur- und pH-Wert-Veränderungen.
2. Die synthetisch erzeugten Scales und bereitgestellten Probekörper werden hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrischen Eigenschaften untersucht. Für die weitere Entwicklung sind die Anforderungen für die Impulsparameter zur Zerstörung von Scales zu erarbeiten, um eine adäquate Dimensionierung des EIV-Systems zu gewährleisten und um eine Beschädigung der Rohrtouren durch zu hohe Energieeinträge zu vermeiden.
3. Die erarbeiteten elektrischen und geometrischen Randbedingungen geben die Entwicklungsrichtung für die Stoßspannungsquelle und ihre elektrischen Komponenten vor. Die Auslegung der Stoßspannungsquelle inkl. Komponenten muss mit dem Ziel erfolgen, dass Spannungen von mehreren 100 kV auf einem Bauraum von unter 100 mm Durchmesser unter den o. g. Randbedingungen erzeugt und gleichzeitig zum Gehäuse hin isoliert werden.
4. Nach der maschinellen Umsetzung entsteht ein auf dem bestehenden EIV angepasster Prozessablauf. Mit diesem können Scales schnell, vollständig und energieeffizient von der zu bearbeitenden Rohroberfläche entfernt werden. Die identifizierten Impulsparameter stellen dabei eine rückstandslose Entfernung der Scales sicher, sodass sich keine Impfkristalle bilden und eine erneute Scale-Bildung hervorrufen.

Um die Ziele zu erreichen wurden im Projekt sieben Arbeitspakete (AP) ausgearbeitet und bearbeitet.

### 2.1 AP 1 – Grundlagen

Zu Beginn wurden gemeinsam mit dem Projektausschuss (PA) schwer zu entfernende Scales festgelegt, die im Projekt untersucht werden sollten. Es handelte sich hierbei um folgende Scales: Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) | Dolomit ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ) | Barium/Strontium-Sulfate ( $[\text{Ba},\text{Sr}]\text{SO}_4$ ) | Eisen-Sulfide ( $\text{FeS}$ ) Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ) | Calcium-Sulfate (Anhydrit, Gips) | Elementarer Schwefel und Kohlenwasserstoffablagerungen.

Im Arbeitspaket 1 war es das Ziel, Scale-Proben der oben genannten Scales zu beschaffen, um die Zerstörbarkeit einzelner Scales durch das EIV nachzuweisen. Dabei sollten die mechanisch härtesten und aus elektrischer Sicht am schwersten zerstörbaren Scales bestimmt werden.

### 2.1.1 Beschaffung von Proben und Analyse

Die zu beschaffenden Scale-Proben sollten möglichst aus realen Bohrungen stammen. Um vorab abschätzen zu können, welche Ablagerungen besonders hart sind, wurde sich an den jeweiligen Mineralen aus natürlichen Vorkommen orientiert. In Tabelle 2.1 sind die natürlich vorkommenden Minerale, die als Ablagerungen in Rohren vorliegen können, mit ihren Eigenschaften aufgeführt. Hierbei werden zwei verschiedene Möglichkeiten der Angabe zur Härte der Mineralien angegeben. Die Härte nach Vickers (HV) und die Härte nach Mohs.

Die Härte nach Mohs beschreibt die Härte eines Minerals/chemischen Elements auf einer Skala von eins (Talk, weich) bis zehn (Diamant, hart). Die Härtebestimmung wird mittels Ritzen zweier Minerale durchgeführt. Dabei ist das erste Mineral, das Mineral dessen Härte bestimmt werden soll und das zweite Mineral eines aus Mohs Härteskala. Das weichere Mineral wird dabei vom härteren geritzt. Sieht man keinen Ritz besitzen beide Minerale die gleiche Härte. Allerdings verlaufen die Härtegrade nach Mohs nicht linear, d. h. ein Mineral der Härte 2 ist nicht doppelt so hart wie ein Mineral der Härte 1.

Die Bestimmung der Härte nach Vickers ist ein statisches und optisches Prüfverfahren. Unter einem vorgegebenen Druck hinterlässt ein pyramidenförmig genormter Eindringkörper einen Eindruck im Material. Anschließend wird die Diagonale (nicht die Tiefe) des Eindrucks optisch ausgemessen und die Vickershärte berechnet. Um den Wert genau zu bestimmen muss eine gute Oberflächenbeschaffenheit vorhanden sein und die Probe vorher entsprechend präpariert werden. Die genaue Durchführung der Härteprüfung ist in der ISO 6507 beschrieben.

Aufgrund dessen, dass die Oberfläche der meisten Scale-Proben aus dem Feld nicht präpariert werden können wurde die Härtebestimmung der Scales nach Mohs durchgeführt.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Mineralen [20] die in Rohren auch als Scale vorliegen können

Mineral	chem. Formel	HV (Härte nach Vickers)	Mohshärte	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	unbeständig gegen:	weitere Eigenschaften und Anmerkungen
Baryt	BaSO <sub>4</sub>	108	3 - 3,5	4,50	warme konzentrierte H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Hitze	-
Coelestin	SrSO <sub>4</sub>	108	3 - 3,5	3,95	heiße konzentrierte Säuren	-
Calcit	CaCO <sub>3</sub>	83	3,0	2,6 - 2,7	Säuren	löslich in Salzsäure unter Aufbrausen und CO <sub>2</sub> -Entwicklung, Bruch: spätig
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	160	3,5 - 4,0	2,85 - 2,95	warme und kalte Säuren	Bruch: muschlig
Halit	NaCl	19	2,5	2,17	H <sub>2</sub> O	-
Pyrrhotin	Fe <sub>(1-x)</sub> S	-	3,5 - 4,0	4,61	-	magnetisch, Bruch: muschelig, spröde
Troilit	FeS	250	3,5 - 4,0	4,62	HCl	-
Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>	130	3,5	2,98	Glyzerin, kalte Säuren, H <sub>2</sub> O, Hitze	-
Gips	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	32	1,5 - 2,0	2,20 - 2,40	HCl, H <sub>2</sub> O, Ultraschallbad	weich
Schwefel	S	32	1,5 - 2,0	2,07	CS <sub>2</sub> , Toluol, Königswasser, Alkohol, Benzol, Äther, Hitze, Ultraschallbad, Licht	Bruch: muschelig, uneben; Zähigkeit: spröde, teilweise ritzbar
Galenit	PbS	92	2,5	7,58	HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , kalte Zitronensäure, CH <sub>3</sub> COOH	gut leitfähig, Halbleiter

Des Weiteren waren auch Untersuchungen mit Kohlenwasserstoffablagerungen aus Erdölbohrungen, die Paraffin und Asphalten enthalten, vorgesehen. Für die erste Einordnung der zu untersuchenden Kohlenwasserstoffablagerungen wurde sich an den natürlich vorkommenden Bitumen orientiert. Natürliche Bitumen werden in zwei verschiedene Arten unterteilt: in Bitumen



und Pyrobitumen. Bitumen können natürlicher Wachs, Asphalt oder Asphaltit und Pyrobitumen Asphaltisch sein. Eine Liste von natürlichen Bitumen und deren Eigenschaften ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Eigenschaften natürlich vorkommender Bitumen [20]

	spez. Gewicht in g/m <sup>3</sup> bei 25 °C	Schmelzpunkt in °C	fester Kohlenstoff- anteil	Löslichkeit in Kohlenstoffdi- sulfid (CS <sub>2</sub> ) in %
<b>BITUMEN</b>				
Natürliches Wachs				
Ozokerit	0.85 - 1.00	66 - 93	0,5 - 10	95 - 100
Asphalt				
Asche arm	0.95 - 1.12	15 - 163	1 - 25	60 - 98
hoher Aschegehalt	0.95 - 1.15	15 - 205	5 - 25	Spuren - 90
Asphaltit				
Gilsonit	1.03 - 1.10	121 - 177	10 - 20	98 - 100
Glanzpech	1.10 - 1.15	121 - 177	20 - 30	95 - 100
Grahamit	1.15 - 1.20	176 - 316	35 - 55	45 - 100
<b>PYROBITUMEN</b>				
Asphaltisch				
Elaterit	0.90 - 1.05	unschmelzbar	2 - 5	10 - 20
Wurtzililit	1.05 - 1.07	unschmelzbar	5 - 25	5 - 10
Albertit	1.07 - 1.10	unschmelzbar	25 - 50	2 - 10
Impsonit	1.10 - 1.25	unschmelzbar	50 - 85	1 - 6
Pyrobituminöser Schiefer	1.50 - 1.75	unschmelzbar	2 - 25	Spuren - 3

In Tabelle 2.1 sind nach der Härte nach Vickers Eisensulfide die härtesten Minerale. Reale Scales aus der Gruppe der Eisensulfide wurden in den Vorversuchen untersucht (s. Kapitel 1.5) und es konnte eine Zerstörung mittels EIV nachgewiesen werden.



Abbildung 2.1: Löseergebnis von Vorversuchen an einer Gewindekappe

Weitere Scale-Proben konnten aus dem Projektausschuss (PA) zur Verfügung gestellt werden. Von einem Geothermiekraftwerk wurden für die Versuche und Untersuchungen Calcit-Proben in verschiedenen Materialdicken aus der obertägigen Reinigung, eine Gewindekappe mit Calcit-Ablagerungen, ein Casingsegment mit einer dünnen Calcit-Schicht und pulverförmiges Calcit, dass aus der mechanischen Scale-Entfernung von einer Bohrung stammte, zur Verfügung gestellt. Mit den Calcit-Proben aus der obertägigen Reinigung und der Gewindekappe wurden erste EIV-Versuche durchgeführt. Insbesondere bei der Gewindekappe hat sich die Wirksamkeit des EIV gezeigt, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Die Gewindekappe war über den vollen Umfang mit einer festen ca. 5 mm starken Calcit-Schicht belegt. Mittels einer Stabelektrode wurde durch den Einsatz des EIV das Calcit bis auf die Stahloberfläche gelöst und es entstand ein

senkrechter Spalt in der Calcit-Schicht. Daraufhin löste sich die verbliebene Calcit-Schicht über den gesamten restlichen Umfang ab. Begründet werden kann es u. a. damit, dass die Gewindekappe nicht mehr im Kontakt mit dem Thermalwasser stand und längere Zeit gelagert wurde. Dies hatte zur Folge, dass eine Trocknung des Calcits stattfand. Dies führte zu inneren Spannungen im Gefüge des Scales. Des Weiteren war die Gewindekappe wetterbedingten thermischen Schwankungen ausgesetzt. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Calcit kann dies ebenso zu inneren Spannungen geführt haben. Da die Festigkeit an der Grenzschicht von Metall zu Calcit die Schwächste Stelle ist, wird vermutet, dass es zu einem Ablösen des Scales von der Rohrwandung gekommen ist und die Calcit-Schicht nur noch über den Umfang in der Gewindekappe fest verspannt war (vergleichbar mit einer Presspassung). Durch den vom EIV-Einsatz entstandenen Spalt in der Calcit-Schicht, kam es zur Entspannung der verbliebenen Calcit-Schicht und es löste sich im Ganzen vom Rest des Umfangs der Gewindekappe ab. Für eine Anwendung zur Reinigung im obertägigen Bereich konnte die Gewindekappe bei diesem Versuch schnell gesäubert werden. Allerdings sind gerade im Bohrloch keine großen Bruchstücke erwünscht und es müsste eine Nachzerkleinerung großer abgelöster Scales erfolgen.

Der Calcit besitzt eine Härte nach Mohs von 3,0 und kann als fest verwachsenes Scale beschrieben werden. Die miteinander verwachsenen Kristalle sind auf den REM-Aufnahmen im Kapitel 2.2.3 unter dem Abschnitt Analyse der Proben nach der EIV Anwendung in Abbildung 2.23 Bild 4 gut zu erkennen.

Das Probenmaterial vom Geothermiekraftwerk wurde für Folgendes verwendet:

- Calcit-Proben in verschiedenen Materialdicken → für erste Tests zur Zerstörbarkeit mittels EIV und die Grundlagenversuche, s. Kapitel 2.1.2
- Gewindekappe mit ca. 5 mm Calcit-Ablagerung → für erste Testzwecke zum Reinigungseffekt des EIV
- Casingsegment mit dünner Calcit-Schicht < 1 mm → für Grundlagenversuche, s. Kapitel 2.1.2
- Pulverförmiges Calcit → zur Herstellung von Presslingen, s. Kapitel 2.2.2

Vom PA wurden Barium-/Strontiumsulfat-Proben (s. Abbildung 2.2), sowie Asphalten und Paraffinablagerungen aus einer Erdölbohrung (s. Abbildung 2.3) zur Verfügung gestellt. Diese wurden für Grundlagenversuche, s. Kapitel 2.1.2, verwendet.



Abbildung 2.2: Probe Barium-/Strontiumsulfat



Abbildung 2.3: Probe Asphalten und Paraffinablagerung

Das Barium-/Strontiumsulfat besitzt eine Härte nach Mohs von 3,5 und ist im Vergleich zu den Calcit-Proben ein sehr sprödes Material. Scales aus Bohrungen sind oft radioaktiv belastet, so z. B. auch die Proben des Barium-/Strontiumsulfats. Die Messung ergab eine natürliche Radioaktivität von < 2,5  $\mu\text{Sv/h}$ . Die Asphalten/Paraffinablagerungen sind ein klebriges weiches Material und die Schmelztemperatur beträgt ca. 70 °C. Eine Untersuchung zur Löslichkeit in  $\text{CS}_2$

wurde aufgrund der Gefährlichkeit dieser Lösung nicht durchgeführt. Anhand der Tabelle 2.2 kann die Probe den Bitumen natürliches Wachs und Asphalt zugeordnet werden und es ist davon auszugehen, dass eine hohe Löslichkeit der Probe in  $CS_2$  vorliegt.

### 2.1.2 Grundlagenversuche

Das Ziel der Grundlagenversuche war es, die Wirkung des Elektroimpulsverfahrens auf die Scales nachzuweisen. Als Ausgangsmaterial stand dazu Calcit zur Verfügung. Die Probekörper werden in Abbildung 2.4 gezeigt. Wobei aus den Casingsegmenten Probekörper mit einer Kantenlänge von ca. 15 mm zugeschnitten wurden, die sich leichter zwischen den Elektroden platzieren ließen.



Abbildung 2.4: Probekörper für Vorversuche (Scaleschicht auf Casingsegment < 1mm links, Scherben bis 10 mm rechts)

Für die Untersuchungen wurden zwei Impulsspannungsgeneratoren verwendet. Im Hinblick auf die spätere Anwendung in sehr begrenzten Durchmessern sollen nur geringe Impulsenergien und Impulsspannungen erprobt werden. Die verwendeten Impulsspannungsgeneratoren sind in Abbildung 2.5 zu sehen.



80 kV, 7 J

250 kV, 60 J

Abbildung 2.5: Impulsspannungsgeneratoren für die Versuche

Zunächst wurde ein Funktionstest durchgeführt, der den prinzipiellen Prozess an den jeweiligen Scales demonstrierte. Dazu wurden die Proben, wie in Abbildung 2.6 gezeigt, zwischen den



Elektroden eingelegt. Da die dünnen Scaleschichten unmittelbar auf Stahl anhaften, wurde der Stahlkörper mit der geerdeten Elektrode verbunden.



Abbildung 2.6: Präparierte Probe, Versuchsaufbau und Ergebnis der Funktionstests (von links nach rechts)

In den Grundlagenversuchen wurden acht Proben aus dem Scale-behafteten Casingsegment, s. Abbildung 2.4 links, zugeschnitten und getestet. Dabei wurden einzelne Parameter, wie die Impulsanzahl, mit oder ohne Elektrodenversatz oder auch die Impulsenergie, geändert. Statistisch gesicherte Aussagen lassen sich aufgrund der geringen Versuchsanzahl nicht treffen. Es wurden zunächst Parameter untersucht, von denen ein deutlicher Einfluss erwartet werden konnte. Dabei handelt es sich um die Impulsanzahl, den Abstand der Elektroden zur Scale-Oberfläche und die Positionierung der Elektroden auf der Oberfläche. Aufgrund der geringen Schichtdicke wurde vorrangig mit dem kleinen Generator und einer Impulsenergie bis 7 J gearbeitet.

Die Aussagen, die sich ableiten ließen, sind:

- Ein direkter Kontakt mit der Oberfläche der Scales ist nicht notwendig, bewirkte jedoch eine effizientere Entfernung → Bei den Versuchen verringerte sich die Anzahl erfolgreicher Durchschläge durch den Scale mit größer werdendem Abstand zwischen Elektrode und Scale-Oberfläche .
- Auch bei freigelegter Metalloberfläche, erfolgten die Impulse durch die Scale-Beschichtung → Anhand von verschiedenen Impulsanzahlen oder den Versatz der Elektroden auf dem Probekörper erhöhte sich die abgetragene Fläche. (vgl. Abbildung 2.7 und Abbildung 2.9)






Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
					
1 x 7 J	5 x 7 J	10 x 7 J	15 x 7 J	5 x 7 J (versetzt)	> 40 x 7 J

Abbildung 2.7: Vergleich Impulsanzahl und Bewegung der Elektrodengeometrie

Die Analyse der beblitzten Proben (s. Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8) wurde mittels dem Digitalmikroskop VHX-600D von Keyence und REM durchgeführt.

Ein Digitalmikroskop nimmt Bilder mit einer Kamera auf und gibt diese in der eingestellten Vergrößerung auf einem Bildschirm wieder. Mit dem Keyence können hochauflösende Bilder mit bis zu 54 Mio. Pixel aufgenommen und genau vermessen werden. Das Ausmessen ist am Beispiel der Probe 1 in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Breite der von der Scale bereinigten Fläche in horizontaler Ausbreitung beträgt 695  $\mu\text{m}$  (s. rechts, rote Linie im oberen Bild) und in vertikaler Ausbreitung 732  $\mu\text{m}$  groß. Eine Profilmessung vom Querschnitt kann über das Anfertigen von Stapelbildern durchgeführt, und somit die Tiefe des Einschlags bestimmt werden (s. rechts, rote Linie unten im Höhen-Breiten-Diagramm). Im Originalmaßstab der Vergrößerung ist bei diesen Proben kaum eine Vertiefung im Querschnittsprofil zu erkennen, da nur eine sehr dünne Schicht Scale auf der Metalloberfläche anhaftet. In Abbildung 2.8 liegt die Vertiefung in einer Größenordnung von ca. 12  $\mu\text{m}$ . Allerdings muss die Rauigkeit der Scale-behafteten Oberfläche beachtet werden. Dadurch, dass die Scale-Schicht sehr dünn ist, unterliegt die Vermessung der Vertiefung großen Schwankungen und eine Bestimmung des abgetragenen Scale-Volumens wurde nicht durchgeführt. Stattdessen wurde der Abtrag des Scales über die bereinigte Fläche bis auf die Metalloberfläche bestimmt. In Abbildung 2.9 links ist die Ermittlung der Fläche für die Probe 1 (rote Linie) und rechts die Tabelle der ermittelten Flächen der Proben 1 bis 6 dargestellt.

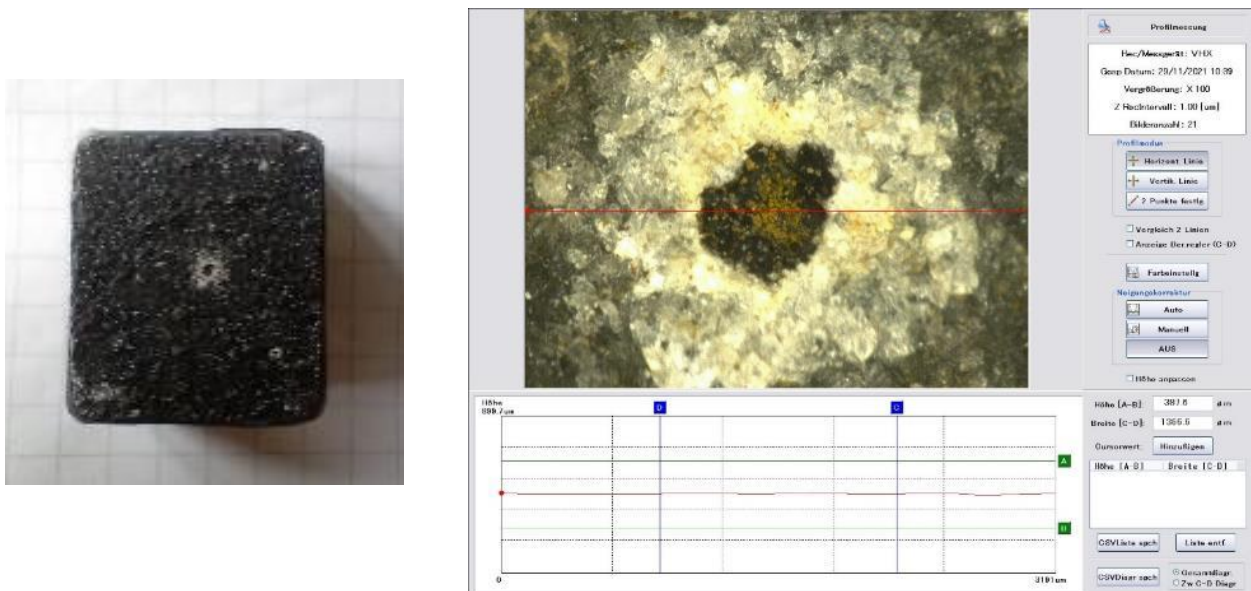
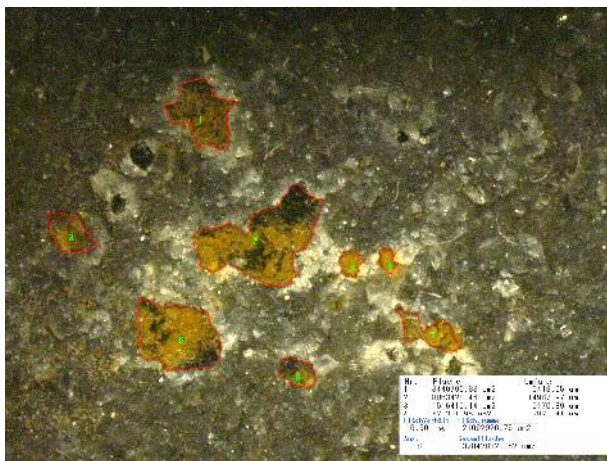


Abbildung 2.8: links: beblitzte Probe, rechts: beblitzte Probe vergrößert unter dem Digitalmikroskop

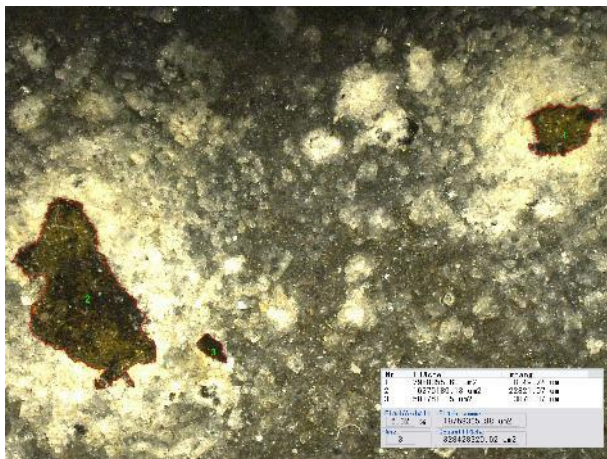
In Abbildung 2.7 ist mit dem Auge schon optisch ersichtlich, dass mit dem Erhöhen der Impulsanzahl sich ebenfalls der Flächenabtrag erhöht. Aus der Wertetabelle in Abbildung 2.9 kann entnommen werden, dass die Erhöhung des Flächenabtrages nicht linear erfolgt, sondern mit der Erhöhung der Impulsanzahl auch ein größerer Flächenabtrag generiert wird. Dies liegt darin begründet, dass beim Durchschlag des Impulses der umliegende Scale, der nicht abgelöst wurde vorgeschädigt wird. Bei einem erneuten Durchschlag im benachbarten Scale wird der vorgeschädigte Scale dann zusätzlich mit abgelöst.



Probe	Impulsanzahl	Fläche in mm <sup>2</sup>
1	1	0,134
2	5	8,377
3	10	21,663
4	15	37,808
5	5 versetzt	7,966
6	> 40	175,220

Abbildung 2.9: Flächenabtrag durch das EIV mit 7 J, links: Probe 1, rechts: Wertetabelle Proben 1 - 6

Weiterhin wurden zwei Proben mit einer höheren Impulsenergie von 60 J beblitzt, um den Einfluss der Impulsenergie auf den Flächenabtrag zu untersuchen. In Abbildung 2.10 ist die Probe 8 unter dem Digitalmikroskop (30-fache Vergrößerung) und die Wertetabelle der Proben 7 und 8 dargestellt.



Probe	Impulsanzahl	Fläche in mm <sup>2</sup>
7	1	0,236
8	3	19,768

Abbildung 2.10: Flächenabtrag durch das EIV mit 60 J, links: Probe 8, rechts: Wertetabelle Proben 7 und 8

Anhand der Wertetabellen in der Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10 ist zu erkennen, dass mit einer höheren Impulsenergie ein größerer Flächenabtrag erzielt werden kann. Die Proben 3 und 8 weisen einen annähernd gleich großen Flächenabtrag auf. Vergleicht man die Werte der beiden Versuche, ist zu erkennen, dass bei niedriger Impulsenergie eine höhere Impulsanzahl notwendig ist, um den gleichen Flächenabtrag den man mit höheren Impulsenergien und weniger Impulsen erreicht zu erzielen. Wenn man jedoch die für den erreichten Flächenabtrag benötigte Energie betrachtet, dann ist das EIV bei dünnen Scale-Schichten energieeffizienter, wenn mit einer hohen Impulsfrequenz und niedriger Impulsenergie gearbeitet wird.

Hinsichtlich der Untersuchungen zur Scale-Dicke wurden die Calcit-Proben aus dem Geothermiekraftwerk verwendet. Erste Versuche mit dem kleinen Impulsspannungsgenerator, der mit 80 kV und 7 J limitiert ist, zeigten, dass die elektrische Feldstärke zwischen den Elektroden nicht ausreichte, um einen Durchschlag durch den Scale zu erzeugen. Ebenso konnte auch keine Zerstörung mit den Elektroden auf einer der Scale-Oberflächen nachgewiesen werden.





Abbildung 2.11: Schaliges Abplatzen von Scaleschichten

Das bedeutet, dass für den vollflächigen Abtrag höhere Impulsspannungen und auch höhere Impulsenergien verwendet werden müssen. Daher wurde für die Versuche mit dickeren Scale-Proben ein Impulsspannungsgenerator mit einer Ausgangsspannung von 240 kV verwendet. Damit konnten Scales mit bis zu einer Dicke von 10 mm erfolgreich durchschlagen werden. Ebenso wurde der vollflächige Abtrag auf einer Seite ermöglicht. Auffällig bei den Versuchen mit den dickeren Scale-Proben ist das schalige Abplatzen (s. Abbildung 2.11), welches auch schon an der Gewindekappe beobachtet wurde. Darunter ist hier zu verstehen, dass die Scales durch klar voneinander abgegrenzte Schichten gekennzeichnet sind, die aus den verschiedenen Betriebszuständen der Anlage herrühren. Die Kristalle der einzelnen Schichten sind ineinander verwachsen und bilden einen festen Verbund, s. Abbildung 2.23 Bild 4. An den Grenzen der einzelnen Schichten ist die Festigkeit des Scales geringer, da die Scale-Kristalle in diesem Bereich nicht gut ineinander verwachsen konnten und es erfolgt die Rissausbreitung entlang dieser Schichtgrenzen. Dies führt zu dem schaligen Abplatzen der Scales.

## **2.2 AP 2 – Herstellung und Analyse von Scales**

Ziel des Arbeitspaketes 2 war es unter Laborbedingungen Scales künstlich herzustellen, um für die Versuche im AP 3 Probekörper zur Verfügung stellen zu können. Des Weiteren sollten die Scale-Proben aus dem Labor, sowie aus dem Feld vor und nach dem EIV-Einsatz analysiert werden.

### **2.2.1 Recherche zum Thema Scales Züchten**

Bei der Literaturrecherche wurden zwei Methoden identifiziert, die für die Züchtung von Scales im Labor unter atmosphärischem Druck in Betracht gezogen wurden. Die erste Methode war eine Dotierung auf unterschiedlich rauen Metalloberflächen, an denen die Scales wachsen. Die Zweite Methode war das sogenannte Sol-Gel-Verfahren. Hierbei handelt es sich um ein aufzüchten von Scales über eine Sol-Gel mit Natriumsilikat. Das Gel fördert die Kristallbildung, sowie das Kristallwachstum. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 2.12 dargestellt Während das Aufzüchten von Scales mit dotierten Proben auch in einem Autoklav durchgeführt werden kann, ist das Sol-Gel-Verfahren im Autoklav nicht möglich.

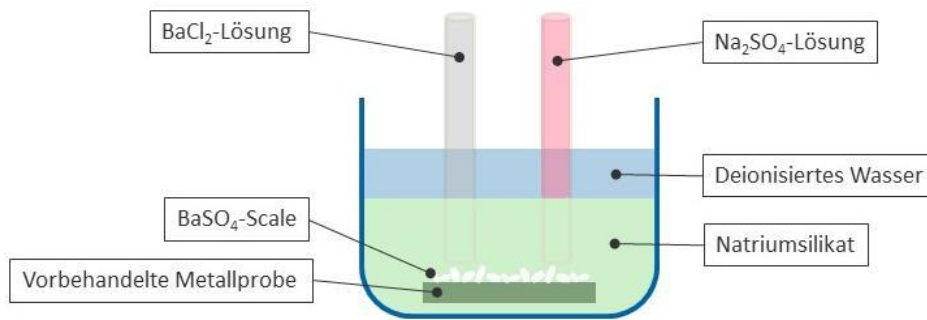


Abbildung 2.12: Schema Sol-Gel-Verfahren

Des Weiteren wurde auf Empfehlung des Projektausschusses der Ansatz, Scale-Proben als Pressling herzustellen, verfolgt. Am IBF befindet sich eine Presse, die mit max. 300 bar arbeiten kann, und bereits zur Herstellung von Presslinge aus Sand verwendet wurde.

### 2.2.2 Züchten und Herstellung von Scale-Proben im Labor

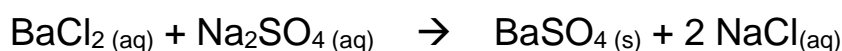
Im folgenden Kapitel wird die Züchtung von Scales in Becherglasversuchen, die Herstellung von Scales in Form von Presslingen, sowie auch die Herstellung der Proben für die Untersuchungen der Zementation hinter dem Rohr beschrieben. Das Züchten von Scales über das Sol-Gel-Verfahren konnte nicht erfolgreich durchgeführt werden. Da dieses Verfahren keine fest miteinander verbundenen Kristallstrukturen bildete.

#### Scale-Züchtung über Becherglasversuche

Ein schwer lösliches und zu entfernender Scale ist u. a.  $\text{BaSO}_4$ . Dies tritt in der Praxis meist in Kombination mit  $\text{SrSO}_4$  auf, so dass der Scale in unterschiedlichen Massenverhältnissen aus  $\text{BaSO}_4$  und  $\text{SrSO}_4$  besteht. Barium und Strontium gehören zur 2. Hauptgruppe im Periodensystem und werden auch als Erdalkalimetalle bezeichnet. Die Sulfate die gebildet werden sind sich in ihrer Struktur und den Eigenschaften sehr ähnlich. Aus diesem Grund wurde sich bei den Becherglasversuchen auf das Aufzüchten von  $\text{BaSO}_4$  auf Metalloberflächen mit unterschiedlichen Rauigkeiten konzentriert.

Für die Metallproben ist ein Rohrabschnitt mit einer Wandstärke von 13 mm vom Projektausschuss zur Verfügung gestellt wurden (s. Abbildung 2.4). Aus diesem Rohr wurden Proben mit einer Kantenlänge von 10 mm für die Becherglasversuche hergestellt. Die Proben wurden mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten hergestellt, um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Kristallbildung sichtbar zu machen. Die verschiedenen Oberflächen – geschliffen, sandgestrahlt (Abbildung 2.13) – wurden entsprechend vor dem Versuch mittels Lichtmikroskop dokumentiert.

Die einfachste, sowie auch von den Ausgangsstoffen her unbedenklichste Art Bariumsulfat auszufällen, ist mit Hilfe von Bariumchlorid und Natriumsulfat. Beide Stoffe sind sehr gut in Wasser löslich und es fällt beim Aufeinandertreffen der beiden Lösungen Bariumsulfat aus (s. Reaktionsgleichung).



Das eigentliche Kristallwachstum sollte in einer übersättigten Bariumsulfatlösung erfolgen. Diese Lösung wird aus einer Natriumsulfatlösung ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) und einer Bariumchloridlösung ( $\text{BaCl}_2$ ), bei 80 °C hergestellt. Beide Ausgangslösungen sind 0,1 molar. Der pH-Wert der  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung beträgt 6,8 und der der  $\text{BaCl}_2$ -Lösung 7,8. Beim Mischen entsteht eine 0,05 molare Lösung.

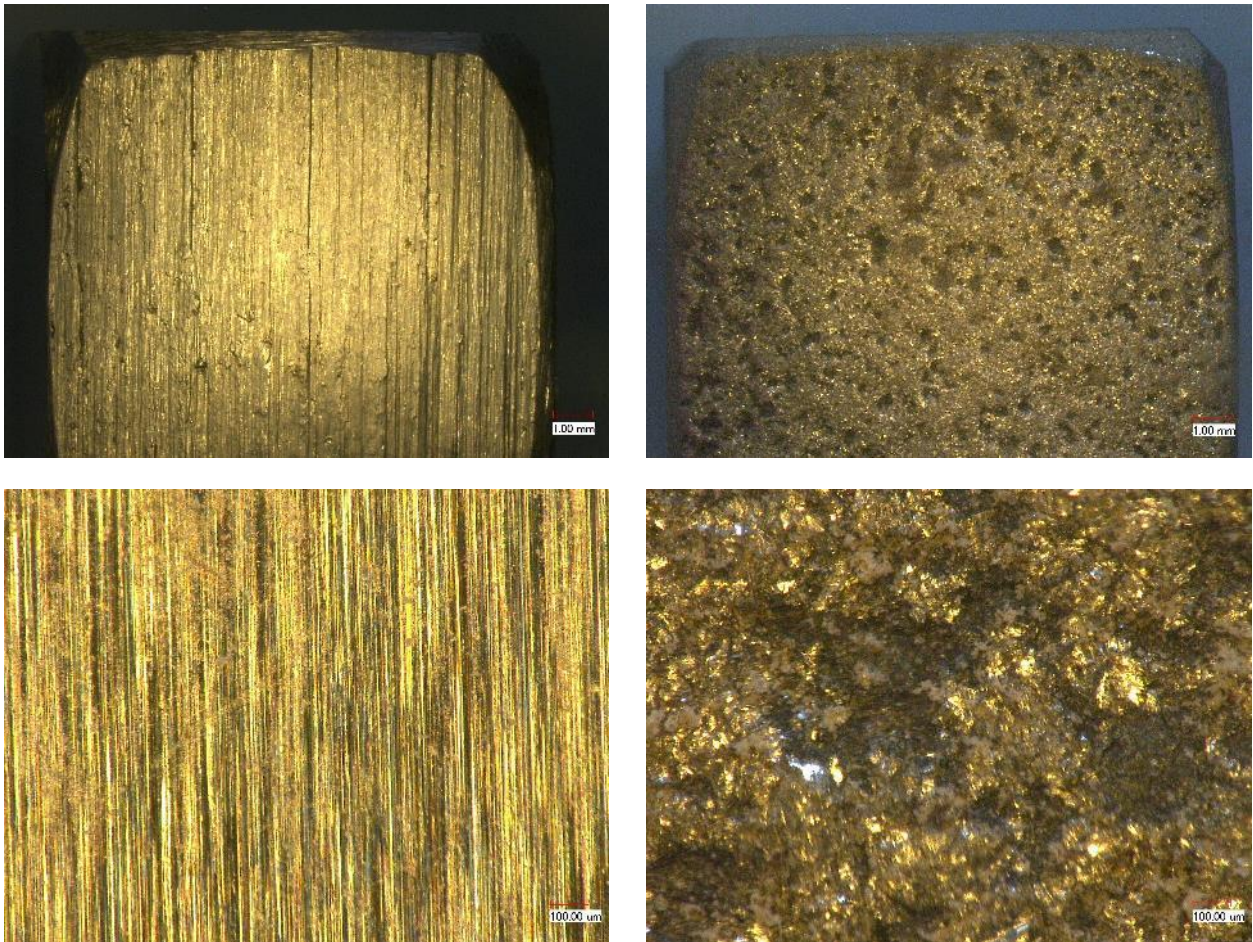


Abbildung 2.13: Metalloberflächen der Proben  
 20-fache Vergrößerung oben links: geschliffen, oben rechts: sandgestrahlt  
 200-fache Vergrößerung unten links: geschliffen, unten rechts: sandgestrahlt

Alle Proben wurden mit der zu betrachtenden Oberfläche nach unten eingebaut damit nur tatsächliches Kristallwachstum auf der Oberfläche und nicht der zu erwartende Niederschlag betrachtet wird. Jeweils die Hälfte der sandgestrahlten und geschliffenen Oberflächen von den Proben wurde mit  $\text{BaSO}_4$ -Pulver dotiert um die initiale Kristallbildung zu forcieren. Die Proben wurden 14 Tage in der Lösung ausgelagert. Die Wachstumsbedingungen während dieser Zeit wurden für die Proben wie folgt variiert:

Vier Proben wurden bei 80 °C mit der übersättigten Bariumsulfatlösung in Kontakt gebracht und Proben und Lösung anschließend auf 20 °C abgekühlt. Die Lösung wurde während der Versuchszeit nicht ausgetauscht, so dass die Salzkonzentration in der Lösung durch Fällung abnehmen konnte.

- Vier Proben wurden bei 80 °C mit der übersättigten Bariumsulfatlösung in Kontakt gebracht. Diese Temperatur wurde während der Versuchszeit im Wärmeschrank gehalten. Die Lösung dieser Versuche wurde während der Versuchszeit ebenfalls nicht ausgetauscht.
- Acht Proben wurden bei 80 °C mit der übersättigten Bariumsulfatlösung in Kontakt gebracht und im Anschluss wurde täglich die Versuchslösung erneuert. Bei vier Proben von acht wurde die Lösung mittels Magnetrührer (350 rpm) kontinuierlich bewegt.

Nach der Versuchsdurchführung wurden die Proben im Wärmeschrank über Nacht getrocknet und unter dem Lichtmikroskop und REM analysiert.



Einen Überblick über die Vorbehandlung bzw. Versuchsdurchführung an den Proben gibt Tabelle 2.3. und die Ergebnisse nach den Versuchen sind in der Tabelle 2.4 zu sehen.

Tabelle 2.3: Überblick vorbehandelte Proben

Versuchsbedingungen		80 °C → 20 °C	20 °C		80 °C	80 °C → 20 °C	20 °C		80 °C
		1 x neue Lösung	ruhend	gerührt	1 x neue Lösung	1 x neue Lösung	ruhend	gerührt	1 x neue Lösung
			täglich neue Lösung				täglich neue Lösung		
		undotiert				dotiert			
Proben- bezeichnung	sandgestrahlt	1	2	3	4	5	6	7	8
	geschliffen	1	2	3	4	5	6	7	8

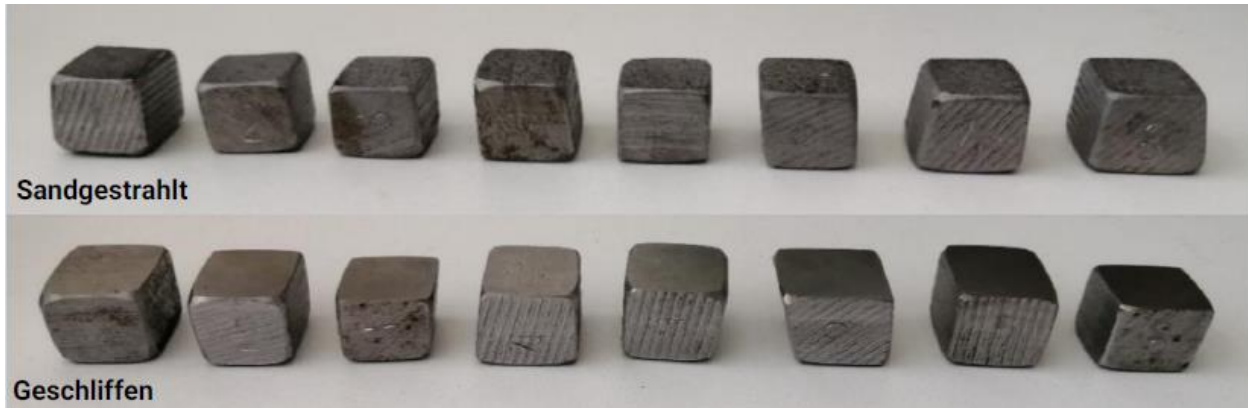
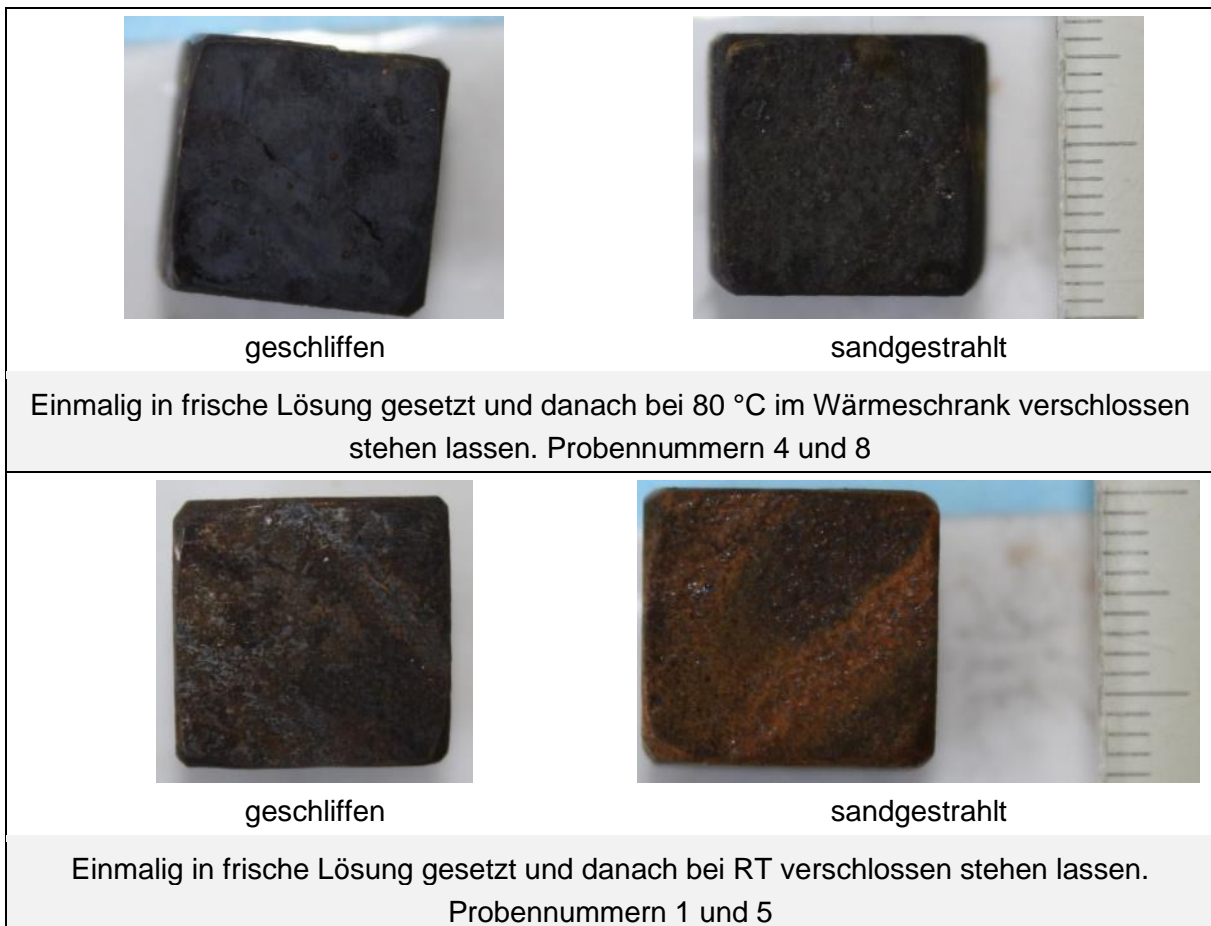
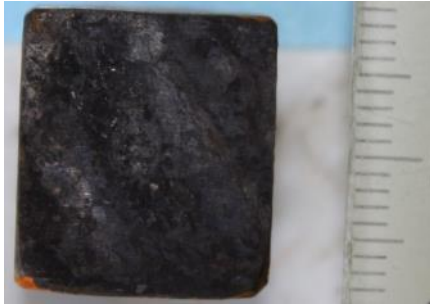


Tabelle 2.4: Versuchsergebnisse zur Scale-Züchtung im Labor





geschliffen



sandgestrahlt

Tägl. in frische Lösung gesetzt und danach bei RT verschlossen stehen lassen.  
Probennummern 2 und 6.



Unbehandelte nach oben gerichtete Oberflächen  
Tägl. in frische Lösung gesetzt und danach bei RT verschlossen stehen lassen.  
Probennummern 2 und 6.



Tägl. in frische Lösung gesetzt und bei RT verschlossen durchgängig gerührt.  
Probennummern 3 und 7.

Neben den Becherglasversuchen war eine Züchtung von Scales mit bohrlochähnlichen Bedingungen im Autoklav vorgesehen. Die Versuche im Autoklav konnten nicht durchgeführt werden, da die Leitungen – in denen das synthetische Formationswasser im Kreislauf fließt – durch die Ausfällungen verstopft und nicht verhindert werden kann.

### Scale-Proben als Presslinge

Da das Züchten von Scales im Becherglas und über das Sol-Gel-Verfahren einen hohen Zeitaufwand von mehreren Wochen bis Monate bedeuteten, wurde die Herstellung von Scale-Presslingen untersucht und durchgeführt.

Presslinge sind Probekörper die aus Pulver, bzw. Material einer bestimmten Körnung unter Druck zu einem festen Verbund in eine beliebige geometrische Form gebracht werden können. Um die gewünschten Presslinge zu erhalten, ist neben der Korngrößenverteilung der Feuchtigkeitsgehalt



des zu pressenden Materials zu beachten, sowie auch der Pressvorgang an sich. Ist der Feuchtigkeitsgehalt zu niedrig zerfällt die Probe nach dem Pressvorgang in Stücke, während eine zu hohe Feuchtigkeit nach dem Pressvorgang die gepresste Form nicht behält und wieder zerfließt oder anklebt und verformbar ist. Beim Pressvorgang ist zu beachten, dass ein Pressregime (mehrere Druck- und Entlastungsstufen) gefahren wird, da es sonst zu inneren Spannungen und Rissen im Probenmaterial kommen kann. Mit diesem Verfahren können Scales einer bestimmten Zusammensetzung mit einer definierten Dicke, sowie verschiedene Scale-Schichten übereinander hergestellt und reproduziert werden.

Für die Presslinge standen uns folgende Ausgangsstoffe zur Verfügung:

- Technisches Strontiumsulfat,  $\text{SrSO}_4$
- Technisches Bariumsulfat,  $\text{BaSO}_4$
- Technisches Calciumcarbonat,  $\text{CaCO}_3$
- Calcit-Probematerial aus der mechanischen Scale-Beseitigung eines Geothermiekraftwerkes

Die dazugehörigen Korngrößenverteilungskurven sind in Abbildung 2.14 dargestellt.

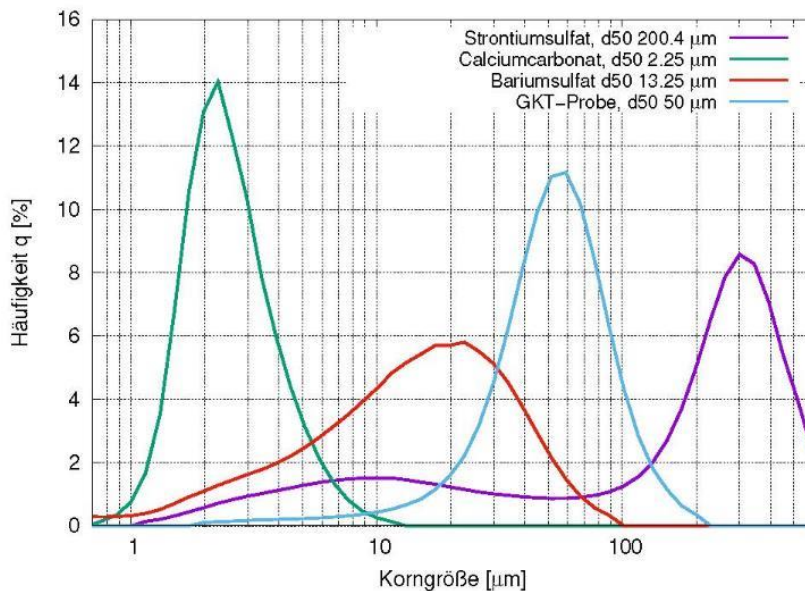


Abbildung 2.14: Korngrößenverteilung der verschiedenen Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Presslingen

Für die Herstellung von Presslingen standen am IBF zwei Pressen mit Handbetrieb zur Verfügung. Allerdings musste ein neuer Probenhalter konstruiert und angefertigt (s. Abbildung 2.15) werden, da erste Pressversuche gezeigt haben, dass die Proben schlecht aus dem bisherigen Probenhalter heraus zu bekommen waren. Mit dem neuen Probenhalter konnte mittels dem inneren Druckstempel ein Herauslösen des Presslings ermöglicht werden, ohne ihn zu beschädigen. Die Presslinge besitzen einen Durchmesser von 2 cm und sind in der Höhe variabel, s. Abbildung 2.16.

Die Proben der ersten Versuchsreihe wurden aus den vier Ausgangsstoffen zu gleichen Massenanteilen und 10 % gesättigter NaCl-Lösung hergestellt, s. Abbildung 2.16. Damit wird eine bessere Korngrößenverteilung für die Presslinge, sowie ein besserer Zusammenhalt zwischen den einzelnen Körnern erreicht. Die Trockenmischungen wurden auf 110°C und die NaCl-Lösung auf 100°C vorgeheizt. Danach wurden 10 % Salzlösung der Trockenmischung zugeführt und vermengt. Anschließend wurde die heiße Masse in den Probenhalter gefüllt und mit 200 bar (20 N/mm<sup>2</sup>) für 10 min gepresst. Es wird vermutet, dass durch das Abkühlen der Mischung NaCl in

der Lösung ausfällt und durch den hohen Druck (Kraft ca. 6000 N) ein Teil der Ausgangsstoffe sich in der Lösung löst. Dadurch würde ein fester Verbund zwischen den einzelnen Körnern entstehen.



Abbildung 2.15: links: Probenhalter zerlegt, rechts: Probenhalter zusammengesetzt



Abbildung 2.16: Pressling

Da mit dem neuen Probenhalter, aufgrund des Handbetriebes, vereinzelt fehlerhafte Scales entstanden, wurde die zweite und dritte Versuchsreihe zur Herstellung von Presslingen an einer automatisch betriebenen Presse mit einem vorgegebenen Pressregime hergestellt. Dies war am Institut für Silikatechnik der TU Bergakademie Freiberg möglich.

Das Pressregime erfolgt durch drei Druckstufen. Die erste Druckstufe presste das Material bis zu 33 %, die Zweite bis zu 66 % und die Dritte bis zu 100 % des maximal zu erreichenden Enddruckes. Zwischen den Druckstufen wurde die Probe kurzzeitig entlastet. Beim Erreichen des Enddruckes wurde dieser für 5 s gehalten und danach die Probe mittels einem Druckstempel ausgefahren. Es wurden drei verschiedene Enddrücke für die Herstellung festgelegt. Diese lagen bei 50 MPa, 100 MPa, und 150 MPa.

Vor dem Pressen wurde das Probenmaterial getrocknet und gesiebt. Um feste Presslinge zu erhalten muss das Probenmaterial immer einen auf das Material abgestimmte Feuchtigkeitsgehalt besitzen. Um möglichst feste Presslinge - die den realen Scales ähnlich sind - zu erhalten, wurde der Feuchtigkeitsgehalt zwischen 2,5, 5,0, 7,5 und 10,0 Masse-% variiert. Dafür wurde eine gesättigte NaCl-Lösung verwendet.

Nach dem Pressvorgang besaßen die Presslinge einen Durchmesser von 5 cm und eine Höhe von ca. 5 mm.

Die Presslinge der Zweiten Versuchsreihe wurden zu je 50 % aus dem techn.  $\text{SrSO}_4$  und  $\text{BaSO}_4$  hergestellt und stehen stellvertretend für Ba/Sr $\text{SO}_4$ -Scales (s. Abbildung 2.17). Die Presslinge der Dritten Versuchsreihe wurden zu je 50 % aus dem techn.  $\text{CaCO}_3$  und der Calcit-Probe vom Geothermiekraftwerk hergestellt und stehen stellvertretend für die Calcit-Scales (s. Abbildung 2.18).

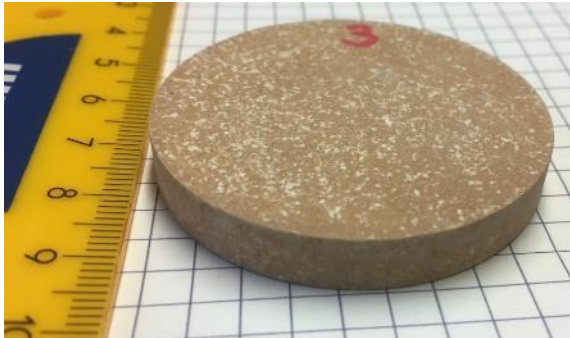


Abbildung 2.17: Ba/Sr $\text{SO}_4$ -Pressling



Abbildung 2.18: Calcit-Pressling

### Zementierte Rohrproben

Mit den zementierten Proben sollten EIV-Versuche zum Scale-Abtrag eines voll verschlossenen Querschnitts, sowie zur Zementation hinter dem Rohr durchgeführt werden. Dafür wurden zwei verschiedene Arten von Probekörpern hergestellt. In Abbildung 2.19 ist eine Probe zur Untersuchung des Abtrages eines voll verschlossenen Querschnitts und in Abbildung 2.20 eine Probe zur Untersuchung zum Einfluss des EIV's auf die Zementation hinter dem Rohr dargestellt.



Abbildung 2.19: Rohrprobe mit Zement vergossen als Vollverschluss



Abbildung 2.20: Rohrprobe mit äußerer Zementummantelung

Für die Herstellung des Zementes der Rohrproben mit Vollverschluss wurde ein API Class G-Zement und Leitungswasser verwendet. Der Zementleim wurde mit einem w/z-Wert von ca. 0,45 hergestellt. Die Aushärtung erfolgte 28 Tage im Wasser. Die Risse in der äußeren Zementummantelung in Abbildung 2.19 sind im Nachgang durch Temperaturschwankungen verursacht wurden. Da die Zementation im Rohr unbeschädigt war, konnten diese Proben für die Untersuchungen des EIV-Einsatzes zum Vollverschluss verwendet werden.



Die Proben für die Untersuchung der Zementation hinter dem Rohr, wurden ebenfalls 28 Tage im Wasser ausgehärtet und danach im Wasser bei konstanter Temperatur gelagert. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Zementmischungen hergestellt. Die erste Mischung bestand aus dem API Class G-Zement und Wasser (s. auch Proben mit Vollverschluss) und die zweite Mischung war eine Fertigmischung und bestand aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser. Diese ist im ausgehärteten Zustand in Abbildung 2.20 zu sehen.

Da die Proben vor und nach den EIV-Versuchen in der instationären Anlage zur Permeabilitätsmessung eingebaut werden mussten, war die maximal zementierte Höhe auf 10 cm und die Dicke der Zementummantelung auf 2,8 cm begrenzt. Bei dem verwendeten Stahlrohr mit einem Innendurchmesser von 4,5 cm mussten an beiden Enden die Oberflächen der überstehenden Rohraußenseiten und die Ringquerschnittsflächen für die Dichtung entsprechend bearbeitet werden.

### 2.2.3 Analyse der Scale-Proben

#### Becherglasversuche

Bei der Analyse wurden die vorher am Lichtmikroskop aufgenommenen Bilder mit den Bildern vom Lichtmikroskop nach den Versuchen verglichen und Aufnahmen mit einem REM durchgeführt.

Von den durchgeführten Versuchen weisen besonders die Proben die gerührt wurden, sowie auch die nach oben gerichteten Oberflächen der Proben die tägl. einer Barytausfällung ausgesetzt waren eine deutlich sichtbare Ablagerung auf (s. Tabelle 2.4 die letzten beiden Zeilen). Bei den gerührten, sowie auch den Versuchen ohne Rühren mit täglich frischer Lösung ist die Ablagerung an der nach oben gerichteten Oberfläche relativ fest. Sie verblieb an der Oberfläche bei Berührungen und konnte auch nicht abgespült werden. Allerdings war zu beobachten, dass bei den gerührten Versuchen – nach dem Trocknen im Wärmeschrank – bei Berührung der Seitenflächen und der nach unten gerichteten Oberfläche die Ablagerung abblätterte, s. Abbildung 2.21. Zum Teil war dies auch beim Entfernen des Drahtes, der zum Halten der Probe im Fluid diente, zu beobachten.



Abbildung 2.21: Probe nach dem Entfernen des Drahtes der Versuchsreihe mit tägl. frischer Lösung und gerührt

Erste Annahmen um was es sich bei den Ablagerungen handelt sind, dass die weißen Ablagerungen auf Bariumsulfat und orangefarbene auf Eisenoxid (Rost) oder -sulfid hinweisen, s. Tabelle 2.4 in den letzten beiden Zeilen. Die schwarze Ablagerung – eine Art Pulver – ist ferromagnetisch, s. Abbildung 2.21 an der Spitze der Pinzette. Aufgrund der verwendeten

Ausgangsstoffe und Metallproben, sowie der schwarzen Farbe und ferromagnetischen Eigenschaft handelt es sich um Chrom-IV-oxid, Eisensulfid oder Eisen-II,III-oxid (oft auch als Eisen-IV-oxid bezeichnet).

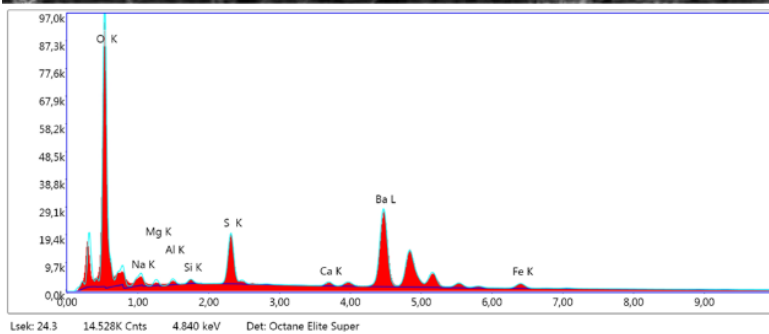
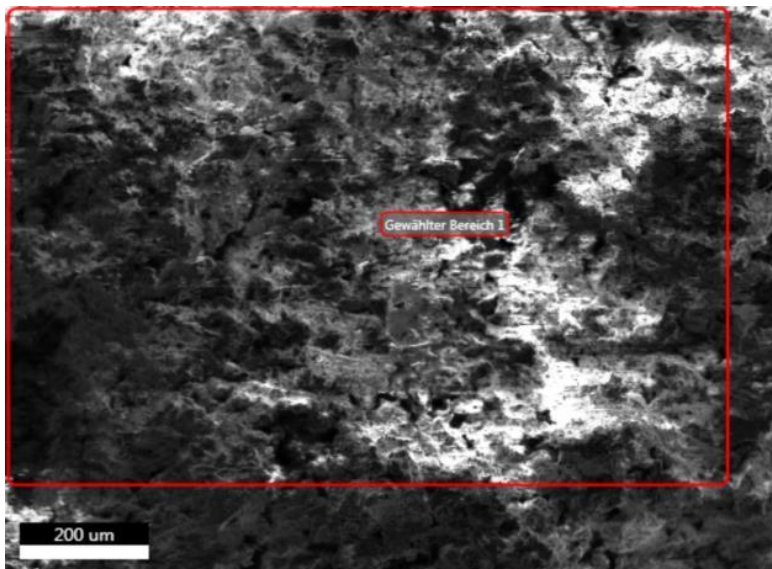
Eine Chromoxidschicht kann nur entstehen, wenn ein entsprechend hoher Chromanteil (>10,5%) in der Metallprobe enthalten ist. Da es sich dabei um hochlegierte Stähle handelt die selten in der Bohrtechnik verwendet werden, ist nicht davon auszugehen, dass es sich um eine Chromoxidschicht handelt. Um es sicher ausschließen zu können ist eine Analyse/Überprüfung der Stahlzusammensetzung geplant. Ein weiteres Ausschlusskriterium für das Chrom-IV-oxid ist, dass die Entstehung/Herstellung nur unter hohen Temperaturen und hohem Druck möglich ist, die bei den Versuchen nicht vorlagen.

Ebenso kann das Eisen-II,III-oxid ausgeschlossen werden, da dies auch nur in Verbindung mit sehr hohen Temperaturen entsteht.

Somit wird vermutet, dass es sich um ein Eisensulfid handelt. Dies kann sich schon bei Raumtemperatur als Feststoff bilden.

Weitere Betrachtungen ergaben, dass:

- sich an den geschliffenen Oberflächen weniger absetzt als an den sandgestrahlten Oberflächen. Dies kann mit großer Sicherheit auf die Oberflächenrauigkeit zurückgeführt werden.
- die Korrosion der Oberfläche möglicherweise schneller als das Kristallwachstum des Bariumsulfats verläuft. Das liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an dem entstehenden NaCl. Darum wird nach einem besser geeigneten System gesucht Barium auszufällen/anzulagern.
- alle gerührten Proben besonders viele Anlagerungen aufweisen; sowohl Eisenoxid als auch weiße Kristalle, bei denen es sich höchstwahrscheinlich um Bariumsulfat handelt.
- bei konstant gehaltener Ionenkonzentration, also täglich aufgefrischter Lösungen, sich genauso wenig Kristallbildung von Bariumsulfat an der Hauptseite beobachten lässt, wie an den Proben in ruhender Lösung; nur an der Unterseite kam es zu Kristallbildungsprozessen.
- die Dotierung bei den Proben der nicht gerührten Lösung keinen Einfluss auf das Kristallwachstum hatte (Proben 4 und 8).
- sich der Dotierungseffekt bei Proben der gerührten Lösung zeigt. Die Probe 7 hat deutlich mehr orangefarbene spahnförmige Kristalle als die Probe 3.



Lsek: 24.3 14.528K Cnts 4.840 keV Det: Octane Elite Super

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	22.9	61.8	28840.1	6.1	0.1637	1.3493	0.5293	1.0000
NaK	2.0	3.7	1113.9	12.0	0.0068	1.2277	0.2803	1.0013
MgK	0.8	1.4	672.8	11.1	0.0035	1.2497	0.3436	1.0024
AlK	0.7	1.1	727.5	9.0	0.0038	1.2044	0.4478	1.0044
SiK	0.4	0.7	553.4	8.7	0.0030	1.2320	0.5616	1.0075
S K	6.1	8.2	7525.6	4.3	0.0565	1.2089	0.7505	1.0165
CaK	0.8	0.8	676.0	5.9	0.0090	1.1707	0.9202	1.0888
BaL	63.2	19.8	14873.6	2.3	0.5320	0.8210	1.0252	1.0003
FeK	3.1	2.4	1025.6	6.2	0.0305	1.0552	0.9211	1.0121

Abbildung 2.22: REM-Aufnahme mit EDX-Analyse auf eine Fläche bezogen

Des Weiteren wurden die Proben unter dem REM auf die Kristallbildung und das –wachstum untersucht und analysiert. Dabei wurde unterschieden unter einer EDX-Analyse auf einen Punkt und Flächenausschnitt bezogen und vollflächig. Beispielhaft ist eine REM-Aufnahme mit einer EDX-Analyse auf einen Flächenausschnitt bezogen in Abbildung 2.22 dargestellt. Über die REM-Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass eine Kristallbildung von  $\text{BaSO}_4$  an der Metalloberfläche stattfand, diese aber nach 14 Tagen in allen Versuchen nicht weit fortgeschritten war. Für den weiteren Projektverlauf bedeutete dies, dass die Züchtung von Scales im Becherglas mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden waren.

## Presslinge

Aus den Ausgangstoffen (techn.  $\text{SrSO}_4$ , techn.  $\text{BaSO}_4$ , techn.  $\text{CaCO}_3$  und Calcit-Probematerial), der Zugabe einer Salzlösung und dem erzeugen eines Temperaturgefälles konnten erfolgreich Presslinge hergestellt werden (s. Kapitel 2.2.2). Allerdings kam es in der ersten Versuchsreihe zu Fehlern (Risse, Abplatzungen) bei der Herstellung der Presslinge. Dies lag vor Allem daran, dass der Pressvorgang nur händisch betrieben und kein Pressregime gefahren werden konnte. Nachdem der Pressvorgang automatisiert mit einem vorgegebenem Pressregime durchgeführt

wurde, konnten optisch fehlerfreie Presslinge hergestellt werden. Generell hatten die Calcit-Presslinge einen weniger festen Verbund, als die Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslinge. Die Härte nach Mohs lag bei den Calcit-Presslingen sowie auch bei den Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslingen unter den Härtegraden nach Mohs der Minerale (s. Tabelle 2.1). Die härtesten Ba/SrSO<sub>4</sub>- und Calcit-Presslinge aus den Versuchsreihen 2 und 3 konnten mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 2,5 % und dem Pressregime mit einem Druck von max. 150 MPa hergestellt werden. Der Härtegrad nach Mohs für die Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslinge betrug 3 und für die Calcit-Presslinge 2. Mit der händisch betriebenen Presse konnten in der ersten Versuchsreihe Presslinge mit höheren Härtegraden hergestellt werden. Für Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslinge konnte ein Härtegrad von 3,5 und für die Calcit-Presslinge ein Härtegrad von 3 erreicht werden. Dies liegt darin begründet, dass mit der händischen Presse ein höherer Druck auf die Probe ausgeübt werden konnte.

Die zur Verfügung stehenden realen Ba/SrSO<sub>4</sub>-Proben verhalten sich sehr spröde. Die Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslinge dagegen besitzen einen festen Verbund und das spröde Verhalten konnte nicht nachgebildet werden.

Die Analyse der Presslinge nach der EIV-Anwendung erfolgt im nächsten Absatz.

### Proben nach EIV Anwendung

#### *Metallproben mit dünner Calcit-Schicht*

Die durch den EIV-Einsatz verursachte Zerstörung der Scales wurde mittels Einsatz eines Tisch-REM an Scale-behafteten Metallproben untersucht. Als Beispiel ist dies in Abbildung 2.23 dargestellt. Die Probe wurde 12-mal mit einem Hochspannungsimpuls getroffen. Die Energie des Impulses betrug 7 J und die Positionen der Elektroden wurden gewechselt.

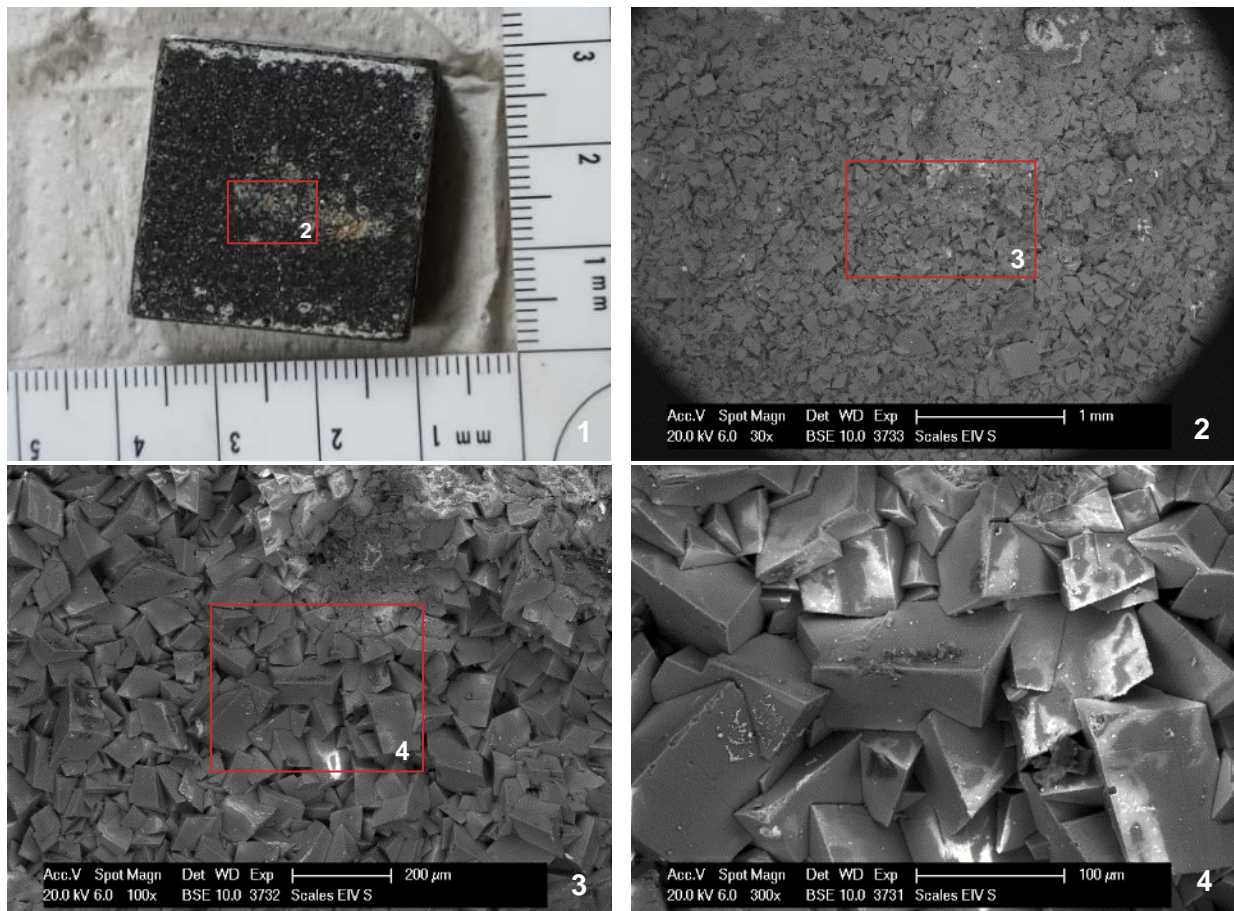


Abbildung 2.23: Schadensbild des EIV, Bild 1 Foto der Probe, Bilder 2-4 Tisch-REM-Aufnahmen



In Abbildung 2.23 auf Bild 2 und 3 ist am oberen Bildrand eine Vertiefung im Scale durch einen Impuls-Einschlag gut zu erkennen. Ebenso gut sichtbar ist in den Bildern 2 – 4 die kristalline Ausbildung des Scales im unbeschädigten Zustand. Die einzelnen Kristalle sind ineinander verwachsen und bilden so einen festen Verbund, der schwer voneinander zu trennen ist. Im Bereich des Impulseinschlages wurde der Scale zerstört und von der Metalloberfläche abgelöst. Der Bruch führte dabei durch die einzelnen Kristalle hindurch und nicht an den Kristallgrenzen entlang. Dies kann mit dem kurzzeitig erfolgten hohen Energieeintrag des Impulses begründet werden. Hohe innere Spannungen in den Kristallen an der Einschlagstelle führten zu einem explosionsartigem auseinanderreißen der einzelnen Kristalle. Ein „Aufschmelzen“ der Scales an den Bruchkanten konnte nicht beobachtet werden.

An den Metallproben konnte der Scale nur punktuell gelöst werden. Da nur eine dünne Scale-Schicht < 1 mm am Metall anhaftete, erfolgte keine Rissausbreitung von der Impuls-Einschlagstelle in den umliegenden Scale hinein. Für die Nutzung des EIV bedeutet dies, mit kleinen Impulsenergien und hoher Impulsanzahl zu arbeiten um eine dünne Schicht Scale zu entfernen.

### *Presslinge*

Für die EIV-Versuche wurden die Presslinge aus den Versuchsreihen 2 und 3 verwendet. Dabei zeigten die Versuche, dass beim EIV-Einsatz unter Verwendung gleicher Impulsparameter die realen Scales einen ähnlichen Scale-Abtrag wie bei den Presslingen aufweisen. Beispielhaft ist dies mit Calcit in Abbildung 2.24 dargestellt. In diesem Fall wurde der Versuch mit einer Spannung von 70 kV durchgeführt.



Abbildung 2.24: Vergleich EIV-Abtrag, links Calcit-Pressling, rechts Calcit-Scale

Des Weiteren wurden Versuche zum Durchschlagverhalten der Presslinge durchgeführt. Ein Durchschlag konnte bei allen Presslingen erzielt werden. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.25 an einem Ba/SrSO<sub>4</sub>-Pressling dargestellt. Bei diesem Versuch betrug die max. Spannung 110 kV.



Abbildung 2.25: EIV-Durchschlag mit Rissbildung an einem Ba/SrSO<sub>4</sub>-Presslings, links Vorderseite, rechts Rückseite



Weitere Angaben und Auswertungen zu den EIV-Versuchen s. auch Kapitel 2.3.3.

### *Zementierte Proben mit Vollverschluss und Zementummatelung*

Die Versuchsdurchführung und -Auswertung ist in Kapitel 2.6 beschrieben

Abschließend kann man feststellen das für die Bearbeitung des Arbeitspaketes 2 in dieser Projektphase vor allem die Probenvorbereitungen, das Handling und Umsetzung der angefertigten Pilotanlage Zeit und Arbeitsaufwand erforderten. In einem Folgeprojekt würden diese aufgrund der gewonnenen Erfahrungen deutlich reduziert bzw. mehr reale Proben von den beteiligten Partnern verwendet werden können. Das würde sich positiv auf die dann durchzuführenden Feldversuche auswirken.

## **2.3 AP 3 – Bestimmung der EIV-Parameter der verschiedenen Scales**

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die zur Verfügung stehenden Scale-Proben hinsichtlich der Impulsparameter zu untersuchen, um den optimalen Parameterbereich für die EIV-Anwendung in Abhängigkeit des vorliegenden Scales zu bestimmen.

### **2.3.1 Versuchsprogramm und Versuchsaufbau**

Scales bilden sich in Abhängigkeit der Bedingungen im Bohrloch in unterschiedlichen Schichtdicken aus. Für die Auslegung der Stoßspannungsquelle war es daher von großer Bedeutung zu untersuchen, bei welchen Schichtdicken ein Durchschlag und ein Lösen des Scales technisch möglich ist. In den grundlegenden Untersuchungen hierzu sollte noch nicht die Effektivität des Lösens hinsichtlich Fläche oder Energie betrachtet werden. Bei den zu bestimmenden EIV-Prozessparametern standen zwei wichtige Parameter im Fokus. Diese waren die Spannungsamplitude und die Impulsenergie. Beide Parameter waren aufgrund des vorgegebenen Bauraums limitiert (s. Abbildung 2.44).

Die Vorversuche haben gezeigt, dass für das Lösen einer sehr dünnen Schichtdicke  $< 1$  mm eine Durchschlagspannung von 50 kV ausreichend ist. Dies stellte eine technisch sinnvolle Untergrenze dar und wurde definiert durch den Aufbau des Generators. Bei einem mehrstufigen Generator wird die Impulsspannung durch die Aufsummierung der einzelnen Stufenspannungen definiert. Diese Stufenspannungen werden gerade im Spannungsbereich  $> 5$  kV durch Funkenstrecken geschaltet. In den Bereichen darunter existieren bereits halbleiterbasierte Lösungen für diese Schaltvorgänge. Durch den Einsatz von Halbleitern anstelle von Funkenstrecken wird die Topologie der Impulsspannungsquelle verändert und ein neuer Generator notwendig.

Die maximal mögliche Spannung wurde durch den Bauraum und die verfügbaren Komponenten definiert. Für die Auslegung der Reinigungselektroden war jedoch maßgebend, bei welcher Amplitude und welcher Energie ein Lösen der Scales in Abhängigkeit der Schichtdicke noch möglich ist. Es war davon auszugehen, dass die Durchschlagwahrscheinlichkeit und auch die durchschlagbare Schichtdicke von beiden Parametern abhängt. Unter Impulsenergie versteht man in diesem Fall die im Impulsspannungsgenerator gespeicherte Energie. Diese hat direkten Einfluss auf den Impulsstrom und somit auf den entstehenden Druck im Durchschlagkanal. Des Weiteren wird für den Aufbau des Entladungskanals eine bestimmte Menge an Energie und Zeit benötigt. Während dieser Zeit fließen zusätzlich parasitäre Ströme durch das Spülmedium, wodurch ebenfalls Energie verloren geht. Diese Verluste müssen durch die gespeicherte Energie kompensiert werden. Um die Verluste und die Anstiegszeit zu verändern, wurde neben der Schichtdicke  $d$  auch die Wasserstrecke  $d_w$  während der Versuche verändert. Da im ersten Schritt das Casing als Gegenelektrode verwendet werden sollte, erfolgte der Durchschlag von der Hochspannungselektrode durch die Scale-Schicht zum Casing. Falls kein Durchschlag erfolgte,

wurde der Impuls als Teilentladung im Wasser (kein vollständiger Durchschlag) bzw. über der Schaltung abgebaut. Die Werte für die Länge der Wasserstrecke gaben zudem wichtige Hinweise für die Auslegung der Elektroden und den möglichen Mindestabstand zwischen Casing-Innenwand und der Elektrode.

Die Obergrenze der Schichtdicke wurde mit 15 mm festgelegt. Grund hierfür war die dem Projekt zugrundeliegende Aufgabenstellung für das Aufwältigen eines 4 1/2“-Casings. Dieses besitzt einen Innendurchmesser von etwa 100 mm. Bei einer Schichtdicke von 15 mm bedeutet das eine Reduktion der Rohrquerschnittsfläche von etwa 50 %. Alle dickeren Schichten wurden für die künftige Betrachtung als Vollverschluss betrachtet und sind somit auch durch entsprechend angepasste Elektroden zu bearbeiten. Für einen Elektrodenabstand von 15 mm wurde eine Mindestimpulsspannung von 150 kV benötigt, um einen Durchschlag im Feststoff zu erreichen. Um eine technische Reserve zur Verfügung zu haben, wurde eine obere Spannung von 200 kV festgelegt. Diese musste bei der Auslegung der Impulsspannungsquelle berücksichtigt werden.

Auf der Basis der oben genannten Annahmen wurde folgende Versuchsmatrix aufgestellt (s. Tabelle 2.5). Der schematische Aufbau der Elektrode zur Veranschaulichung der Abstandparameter ist in Abbildung 2.26 dargestellt.

Tabelle 2.5: Versuchsmatrix zum Durchschlag in Abhängigkeit von Amplitude und Energie

<b>Amplitude</b>	kV	50	100	150	200
<b>Energie</b>	J	5	20	35	50
<b>d</b>	mm	1	5	10	15
<b>d<sub>w</sub></b>	mm	0	1	5	10

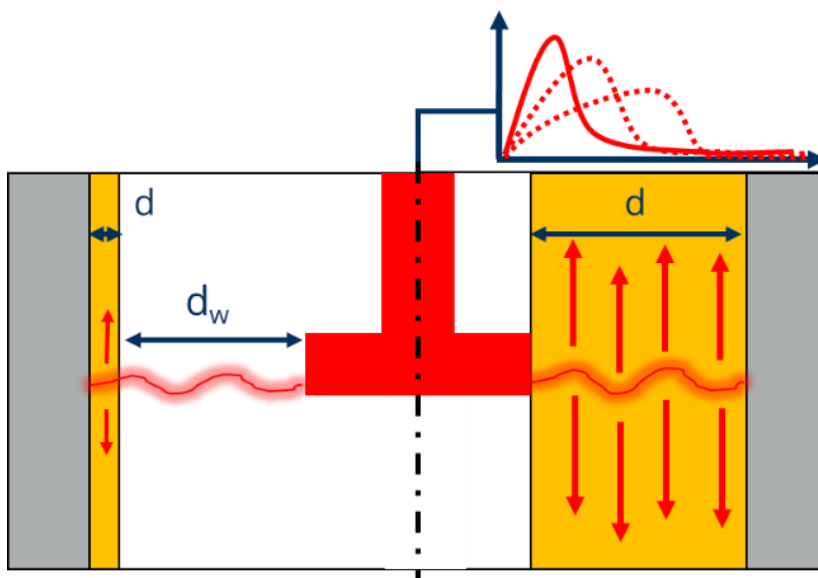


Abbildung 2.26: Darstellung der Abstandparameter für die Reinigungselektroden

Anhand des Plans ergaben sich rechnerisch 256 Kombinationen, die getestet werden mussten. Während der Versuche wurde parallel zur Beobachtung, ob ein Durchschlag erfolgte oder nicht, auch die Impulsform gemessen. Damit konnten nicht eindeutige Messergebnisse besser beurteilt werden.

Tabelle 2.6: Einstellparameter für die Generatoren

Amplitude_soll	Impulsenergie_soll	50				100				150				200			
		2	20	35	50	2	20	35	50	2	20	35	50	2	20	35	50
Stufenanzahl		4	2	2	2	11	5	5	3	10	10	5	5	8	10	10	8
Kondensatoranzahl		4	16	28	40	5	9	16	14	2	8	7	10	1	5	8	9
Kapazität	nF	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Ladespannung	kV	13	24	24	24	9	20	20	33	15	15	30	30	25	20	20	25
Amplitude_ist	kV	52	48	48	48	99	100	100	100	150	150	150	150	200	200	200	200
Energie_ist	J	3,0	20,3	35,5	50,7	4,9	19,8	35,2	51,2	5,0	19,8	34,7	49,5	5,5	22,0	35,2	49,5

Für die Durchführung der Versuche wurde der nachfolgende Elektrodenaufbau verwendet. Er bot die entsprechende Variabilität zur Realisierung der geforderten Schlagweiten (s. Abbildung 2.27). Es wurden zwei Stoßspannungsquellen verwendet. Die erste ist in Abbildung 2.29 dargestellt. Mit ihr wurden die Versuche mit 50 kV und 5 J durchgeführt. Für die weiteren Versuchsreihen wurde die zweite Quelle verwendet, welche modular aufgebaut ist und durch die Vielzahl an Stufen und Kondensatoren pro Stufe sehr variabel umgebaut werden kann (siehe Abbildung 2.28). Durch die entsprechende Änderung der Stufenanzahl bzw. der Anpassung der Stufenkapazität wurden die gewünschten Parameter für Spannung und Energie annähernd erreicht. In Tabelle 2.6 sind die erreichten Parameterkombinationen für die jeweiligen Sollparameter dargestellt.



Abbildung 2.27: Elektrodenanordnung für die Untersuchung des Durchschlages

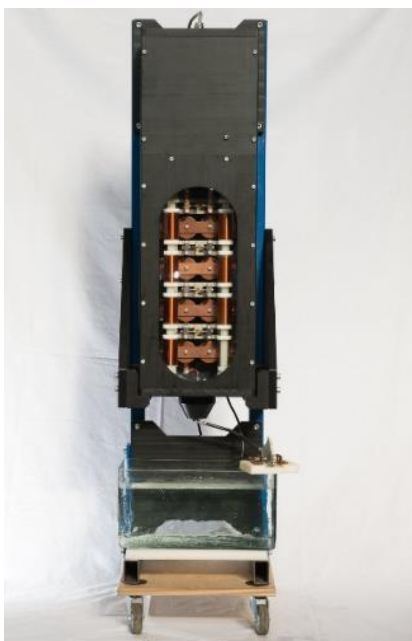


Abbildung 2.29: Stoßspannungsquelle für Versuchsreihe mit 50 kV und 5 J



Abbildung 2.28: Stoßspannungsquelle für Versuchsreihen > 5 J

### 2.3.2 Versuchsauswertung

Im ersten Schritt wurden die Versuche mit einer Impulsspannung von 50 kV und 5 J begonnen. Die Messreihe ist in Tabelle 2.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass lediglich die Scales mit einer Dicke bis zu 1 mm durchgeschlagen wurden und eine Wasserstrecke von bis zu 5 mm möglich war. Ein Durchschlag durch dickere Scales konnte nicht nachgewiesen werden.

Die vollständigen Messergebnisse sind in Tabelle 2.8 dargestellt. Darin sind in Grün die Bereiche dargestellt, bei denen die Scale-Proben durchgeschlagen wurden. Die rot hinterlegten Bereiche geben an wo kein Durchschlag möglich war. Die Versuche bei den jeweiligen Parametersätzen wurden mehrfach durchgeführt. So konnte ausgeschlossen werden, dass die Durchschläge nur einmalige Ereignisse waren. Die Auswertung gibt zu erkennen, bei welchen Scale-Dicken welche Mindestanforderungen an die Spannung und an die Energie jeweils gestellt wurden. Wie bereits in den Vorversuchen hatte sich hier ebenfalls gezeigt, dass bei sehr dünnen Scales bis 1 mm Dicke bereits eine Impulsspannung von 50 kV und eine Impulsenergie von 5 J zum Entfernen der Beläge ausreichte. Dabei war auch eine Wasserstrecke von 5 mm zwischen Scale und aktiver Elektrode tolerierbar. Für die weitere Auslegung bedeutete das, dass ein Abstand zur Rohrwand von 5 mm vorgesehen werden konnte. Dies stellte eine höhere Anforderung an die Führung der Elektrode im Casing dar. Jedoch kann dadurch ein Kurzschluss, der während des Prozesses durch den Kontakt der Elektrode mit dem Casing verursacht wird, vermieden werden.

Tabelle 2.7: Auswertung Versuchsreihe 50 kV und 5 J

#	Amplitude	Energie	d	dw	
1	50	5	1	0	x
2	50	5	1	1	x
3	50	5	1	5	x
4	50	5	1	10	o
5	50	5	5	0	o
6	50	5	5	1	o
7	50	5	5	5	o
8	50	5	5	10	o
9	50	5	10	0	o
10	50	5	10	1	o
11	50	5	10	5	o
12	50	5	10	10	o
13	50	5	15	0	o
14	50	5	15	1	o
15	50	5	15	5	o
16	50	5	15	10	o

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus den Versuchen war, dass Scales mit einer Dicke von 10 mm bereits bei 100 kV bzw. 15 mm bei 150 kV erfolgreich durchgeschlagen werden konnten. Wenn zudem durch die Elektrode ein loser Kontakt zwischen Elektrode und Scale erreicht wurde, war eine Impulsenergie von 20 Joule ausreichend. Durch die Reduktion der Spannung sanken sowohl die Anforderung an die Isoliertechnik als auch an die Impulsspannungsquelle.

Tabelle 2.8: Auswertung des vollständigen Versuchsprogramms

Amplitude Energie	50 kV		100 kV		150 kV		200 kV	
	d	dw	d	dw	d	dw	d	dw
	1	0	1	0	1	0	1	0

5 Joule	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	5	1	5	1	5	1	5
	1	10	1	10	1	10	1	10
	5	0	5	0	5	0	5	0
	5	1	5	1	5	1	5	1
	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	10	5	10	5	10	5	10
	10	0	10	0	10	0	10	0
	10	1	10	1	10	1	10	1
	10	5	10	5	10	5	10	5
	10	10	10	10	10	10	10	10
	15	0	15	0	15	0	15	0
	15	1	15	1	15	1	15	1
	15	5	15	5	15	5	15	5
	15	10	15	10	15	10	15	10
20 Joule	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	5	1	5	1	5	1	5
	1	10	1	10	1	10	1	10
	5	0	5	0	5	0	5	0
	5	1	5	1	5	1	5	1
	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	10	5	10	5	10	5	10
	10	0	10	0	10	0	10	0
	10	1	10	1	10	1	10	1
	10	5	10	5	10	5	10	5
	10	10	10	10	10	10	10	10
	15	0	15	0	15	0	15	0
	15	1	15	1	15	1	15	1
	15	5	15	5	15	5	15	5
15	10	15	10	15	10	15	10	
35 Joule	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	5	1	5	1	5	1	5
	1	10	1	10	1	10	1	10
	5	0	5	0	5	0	5	0
	5	1	5	1	5	1	5	1
	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	10	5	10	5	10	5	10
	10	0	10	0	10	0	10	0
	10	1	10	1	10	1	10	1
	10	5	10	5	10	5	10	5
	10	10	10	10	10	10	10	10
	15	0	15	0	15	0	15	0
	15	1	15	1	15	1	15	1
	15	5	15	5	15	5	15	5
15	10	15	10	15	10	15	10	
50 Joule	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	5	1	5	1	5	1	5
	1	10	1	10	1	10	1	10
	5	0	5	0	5	0	5	0
	5	1	5	1	5	1	5	1
	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	10	5	10	5	10	5	10
	10	0	10	0	10	0	10	0
	10	1	10	1	10	1	10	1

10	5	10	5	10	5	10	5
10	10	10	10	10	10	10	10
15	0	15	0	15	0	15	0
15	1	15	1	15	1	15	1
15	5	15	5	15	5	15	5
15	10	15	10	15	10	15	10

### 2.3.3 Durchschlagverhalten von Scales

Im Rahmen der Untersuchung sollten verschiedene Scale-Arten hinsichtlich ihrer Zerstörbarkeit untersucht werden. Dazu wurden in einem ersten Schritt synthetische Scales aus Calcit mit realen Probekörpern verglichen. Die Herstellung und Analyse der synthetischen Scale-Körper (Presslinge) wird in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 beschrieben.

Für die Betrachtung der Durchschlagfestigkeit wurde der aus Kapitel 2.3.1 bekannte Elektrodenaufbau verwendet. Zur Erfassung der Durchschlagspannung wurde ein Messteiler, der die Impulsspannung im Verhältnis 1:10.000 reduziert, eingesetzt. Die Impulskennlinien wurden mittels eines Oszilloskops dargestellt. Für die Auswertung wurden geringe Impulsenergien von 5 J verwendet. Das Ziel sollte es sein, die Scale-Presslinge mit realen Scales qualitativ zu vergleichen, um die synthetischen Scales als Auslegungsgrundlage bzw. Testmaterial für weitere Versuche zu verwenden.

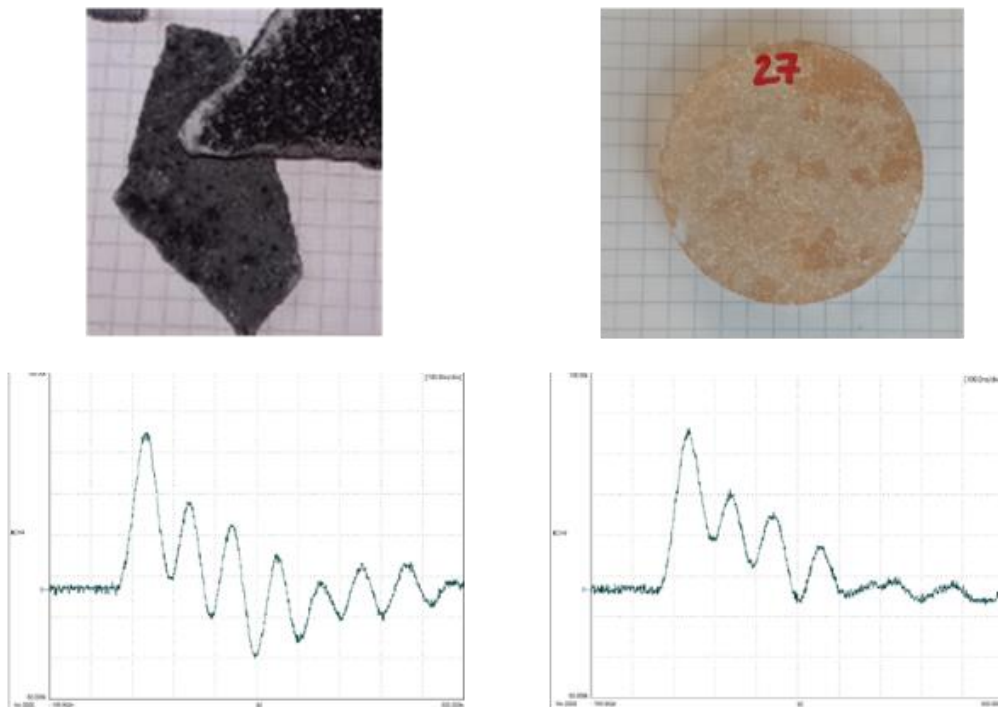


Abbildung 2.30: Probekörper und Messschriebe (Scale links, Pressling rechts)

Zu diesem Zweck wurden die Calcit-Presslinge mit den realen Calcit-Scales aus einer Geothermiebohrung verglichen. Probenmaterial und auch die zugehörigen Oszillogramme sind in Abbildung 2.30 dargestellt. Prinzipiell ergab sich ein ähnlicher Impulsverlauf, was durch die ähnlichen elektrischen Eigenschaften der natürlichen und gepressten Probekörper zu erwarten war. In einer Testreihe wurden für verschiedene Probekörper, sowohl natürliche Scales als auch Presslinge, die Stoßspannung im Moment des Durchschlags und die Impulsanstiegszeit gemessen und verglichen (s. Abbildung 2.31). Sowohl die natürlichen Scales, als auch die



Presslinge wurden erfolgreich durchschlagen und zerstört. Ebenso zeigte der Vergleich der Oszillogramme eine gute Übereinstimmung, woraus abgeleitet wurde, dass die gepressten Scales prinzipiell für die weitere Entwicklung verwendet werden können. Dies war insbesondere wichtig, damit für die weiteren Entwicklungsschritte reproduzierbare Probekörper zur Verfügung standen.

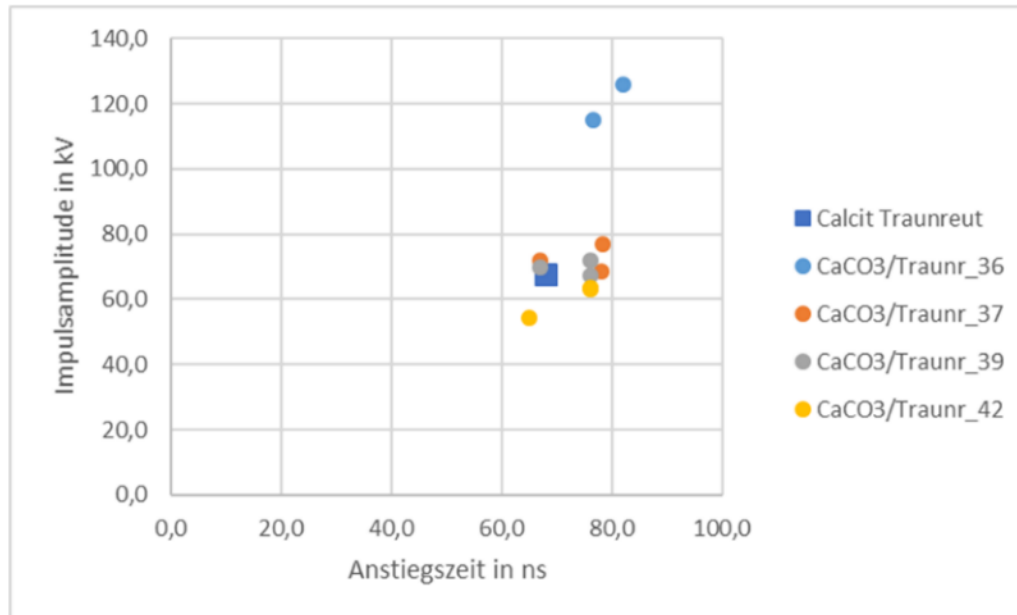


Abbildung 2.31: Vergleich der Durchschlagswerte für verschiedene Probekörper

## 2.4 AP 4 – Auslegung und Dimensionierung der Elektrode

Ziel des Arbeitspaket 4 war es, Elektroden zu gestalten, die zum einen die Rohrwandung vom Scale bereinigen und zum anderen einen vollflächigen Scale-Verschluss abtragen können.

Es wurden bei den Elektroden zwei Konzepte verfolgt. Beim ersten Konzept bildet das Casing die Gegenelektrode und der Scale befindet sich zwischen aktiver und geerdeter Elektrode. Das zweite Konzept wurde um die Funktion erweitert, dass auch ein Vollverschluss bearbeitet werden kann.

Für die Auslegung des ersten Konzeptes wurden zunächst folgende Randbedingungen festgelegt:

- Rohrdurchmesser von 4 ½“ innen
- Schichtdicke von maximal 15 mm
- Selbstständiges Anpassen an die Schichtstärke
- Loser Kontakt zwischen Elektrode und Scales soll erreicht werden
- Eignung zum rotierenden und nicht rotierenden Einsatz
- Optionales Auffangen der Scales und Nachzerkleinerung zum Transport

Um beim Teilverschluss einen Durchschlag von 15 mm Scale zu gewährleisten, erfolgte eine Auslegung der Elektrode auf eine Impulsspannung von 150 kV. Für die Auslegung der Isolierstrecken, Durchführungen und Komponenten wurde eine Impulsspannung von 200 kV angesetzt. Damit erhält man eine zusätzliche Sicherheit bzw. steht zusätzliche Leistung zur Verfügung. Eine Verwendung von geringeren Spannungsimpulsen ist mit dieser Auslegung weiterhin möglich. Eine Wasserstrecke von 5 mm wurde hinsichtlich des Isolierabstands als

ausreichend betrachtet. Da die Anlagerung von Scales nicht gleichmäßig erfolgt, sind die Scale-Schichten über die Länge der Bohrung und den Umfang des Rohres unterschiedlich stark ausgeprägt. Damit einhergehend ist der zur Verfügung stehende Bauraum nicht konstant. Die Elektrode für den Teilverschluss muss sich daher flexibel an die Oberfläche und unterschiedlichen Durchmesser anpassen können. Mit den oben beschriebenen Erkenntnissen erfolgte die Gestaltung verschiedener Elektrodendesigns. Diese sind in den Varianten 1 bis 3 beschrieben.

### **Variante 1: Linearführung**

In Abbildung 2.32 ist ein Konzept für eine rotierende Elektrode dargestellt, mit welcher an der Wand anhaftende Scales abgetragen werden können.

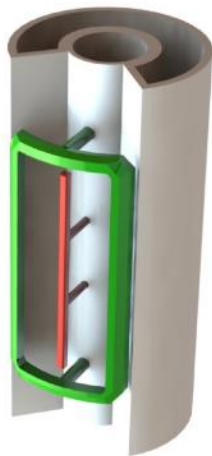


Abbildung 2.32: Variante 1- Linearführung. Aktive Elektrode rot, Passive Elektrode grün

Der Grundgedanke hinter dieser Variante war es, die benötigte Anpresskraft mit einer linearen Gleitführung zu realisieren. Dazu werden Stifte in einer dazugehörigen Führung ein- und ausgefahren. Durch die zwei Stifte und einer entsprechenden Passung wäre an dieser Stelle auch eine Verschiebung in radialer Richtung möglich. Die Anpresskraft würde über mechanische Federn oder hydraulisch realisiert werden. Aufgrund des Aufwandes sind Federn an dieser Stelle zu bevorzugen. In Abbildung 2.32 ist die aktive Elektrode in Rot und die passive Elektrode in Grün dargestellt. Die Impulse können zwischen der aktiven Elektrode im Zentrum in das Casing oder in die passive Gegenelektrode erfolgen. Weiterhin kommt der passiven Elektrode die Aufgabe zu, die innere aktive Elektrode mechanisch vor einem Verklebmen während der Rotation zu schützen. Sowohl die passive wie auch aktive Elektrode können aus einem Rohrstück geschnitten werden. Dies führt zu einer gewölbten Außenfläche, die mittels geringem Fertigungsaufwand herstellbar ist. Anschließend müssten die Führungsstifte angefügt werden. Es lassen sich verschiedene Varianten der Elektroden unterschiedlicher Außendurchmesser mit demselben Grundkörper verwenden. Fasen an den äußeren Kanten ermöglichen ein leichteres übergleiten von Unebenheiten, sowohl bei der Rotation als auch beim Einfahren in das Tubing oder Casing. Durch eine gefederte Lagerung wird eine Rückstellkraft erzeugt die gewährleistet, dass die Elektrode an Unebenheiten anliegen kann.

### **Variante 2: Starre Elektroden**

Hier wurde der Ansatz verfolgt, bei dem mittels einzelner Segmente die Impulsspannung über den gesamten Elektrodenumfang verteilt wird. Zudem wurde das Casing als Gegenelektrode vorgesehen. Außer der Nachgiebigkeit des Materials ist die Elektrode starr konzipiert. Durch die

Wölbung der Elektrode werden während des EIV-Einsatzes die Scales an der Stelle abgetragen, an welcher der Abstand zwischen Elektrode und Scale am geringsten ist. Wenn genügend Scales entfernt wurden, kann die Elektrode nachrutschen. So wird eine fließende Reinigung des Rohrstücks allein durch die Schwerkraft ermöglicht.



Abbildung 2.33: Variante 2 Starres System Aktive Elektrode rot, Isoliermaterial weiß

Bei Scraper-Arbeitswerkzeugen werden unter anderem ellipsoide Formen als Fräswerkzeug in unterschiedlicher Größe eingesetzt, um die Ablagerungen an der Rohrwand zu entfernen. Die ellipsoide Form führt dazu, dass ein Entfernen des Materials bis zum äußeren Durchmesser der Ellipse möglich ist, ohne dass sich der Fräser elastisch verhalten muss. Diese Elektrode könnte daher starr ausgeführt werden, da sich der Durchmesser gleichmäßig vergrößert und am größten Durchmesser (in der Mitte) noch genügend Isolationsabstand zum Casing vorhanden ist. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist der gleichmäßige Abstand der Schlitze in der Elektrode. Wird die zugehörige Absaugung im Zentrum der Elektrode angebracht, wird ein Filtereffekt erreicht. Da die Schlitze den gleichen Abstand haben, entsteht an dieser Stelle ein selbstreinigender Filter. Abgelöste Scale-Bestandteile größer als der Siebdurchmesser können nicht passieren. Scale-Bruchstücke kleiner als Siebdurchmesser können dies jedoch. Durch den Druckunterschied zwischen der Außen- und Innenseite der Elektrode kommt es aber zu einem Anhaften der Bruchstücke auf der Elektrodenaußenseite. Da in diesem Bereich jedoch auch der Durchschlag erfolgt, erfolgt der Durchschlag durch die Bruchstücke und zerkleinert diese weiter. Ergebnis dieser Variante ist im Bestfall eine gleichmäßige Aussiebung und Zerkleinerung der Scale-Partikel vor dem Ausspülen. Weiterhin ist bei dieser Variante die Einfachheit ein Vorteil, da es keine bewegten Teile gibt.

### **Variante 3: Lamellen**

Bei dieser Variante wurden biegeeweiche Blechstreifen als aktive Elektrode verwendet, die mit den Scales in Kontakt stehen. Der Entwurf ist vorerst für eine nicht rotierende Arbeitsweise vorgesehen, um den Verschleiß an den Blechen zu minimieren. Ein späteres Hinzufügen von Verschleißflächen ist jedoch möglich. Die Elektrode wird über Zentrierhilfen im Rohr geführt, um einen gleichmäßigen Abstand zwischen den Blechen und Casing zu erreichen. Es ist vorgesehen,

dass die Bleche ähnlich bei einer Kalibersonde aus- und eingefahren werden können, um die Platzierung im Casing zu erleichtern. Diese Variante war die Vorzugslösung für dieses Projekt.

In Abbildung 2.34 sind sowohl ein Funktionsmuster der Variante 3 (links) als auch die auskonstruierte Lösung (rechts) dargestellt.

In der auskonstruierten Lösung wurde die Elektrode so gedreht, dass die Elektrode nach unten offen ist. Damit soll verhindert werden, dass sich gelöstes Material zwischen den Lamellen verklemmen kann. Durch die geeignete Ausformung der Lamellen, kann so ein Vorschub auch bei variablen Dicken der Scale-Beläge erreicht werden. Die auskonstruierte Lösung wurde für weitere Untersuchungen umgesetzt und hinsichtlich seiner Eignung erprobt.

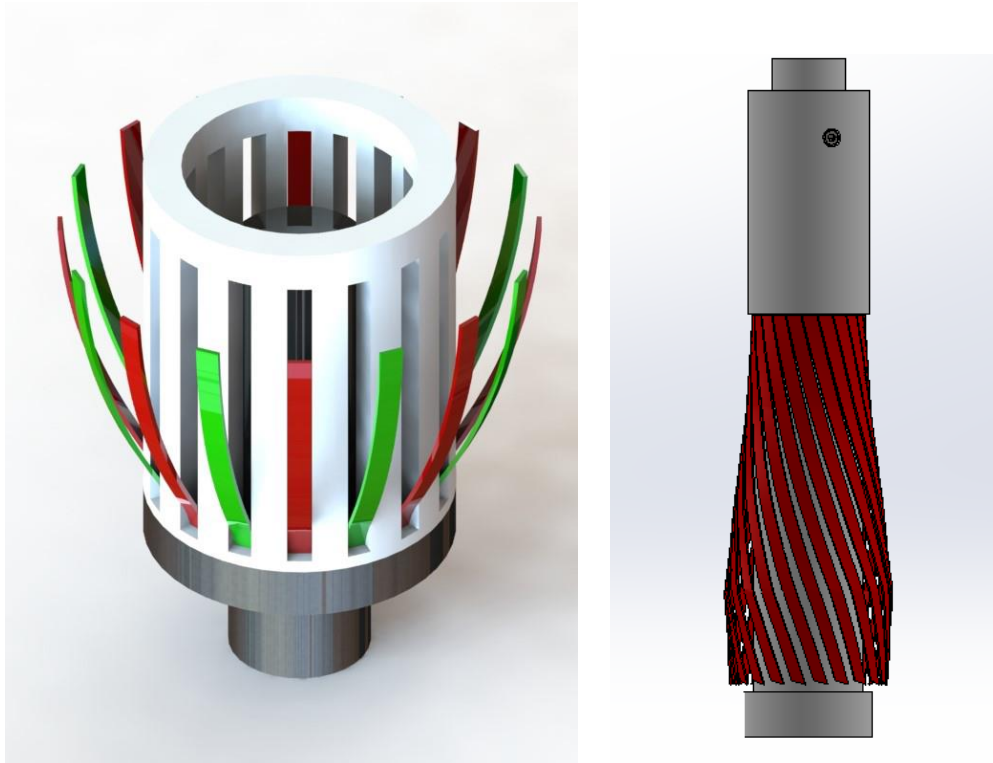


Abbildung 2.34: Variante 3 Lamellen, links: Funktionsmuster, rechts: Fertige Konstruktion

#### 2.4.1 Umsetzung und Erprobung des Funktionsmusters

Zur Vereinfachung wurde die fertige Konstruktion in ein reduziertes Funktionsmuster überführt. Dabei handelte es sich um ein einfaches Blechteil, welches auf den gewünschten Durchmesser gekantet wurde. In Abbildung 2.35 ist das CAD-Modell und die umgesetzte Elektrode abgebildet. Zur Erprobung wurden zum einen Rohrsegmente mit dünnen Scales  $< 1$  mm als auch ein gesondert angefertigtes Rohrstück mit einem 1 cm starken Zementbelag verwendet, da zu diesem Zeitpunkt nicht ausreichend Probematerial mit realen Scales zur Verfügung standen.

Ziel der Versuche war es zum einen nachzuweisen, dass nicht nur die Bereiche mit der kürzesten Entfernung zum Casing gelöst werden und zum anderen, dass ein vollflächiger Abtrag bis auf die Oberfläche des Casing möglich ist. Für die Versuche wurden Impulse bis 200 kV bei einer Impulsenergie von 20 J bzw. für die Versuche im Casing 35 J verwendet. Bei den dünnen Scales wurde, aufgrund der Ergebnisse aus den Vorversuche, zusätzlich eine Wasserstrecke von 5 mm vorgesehen.

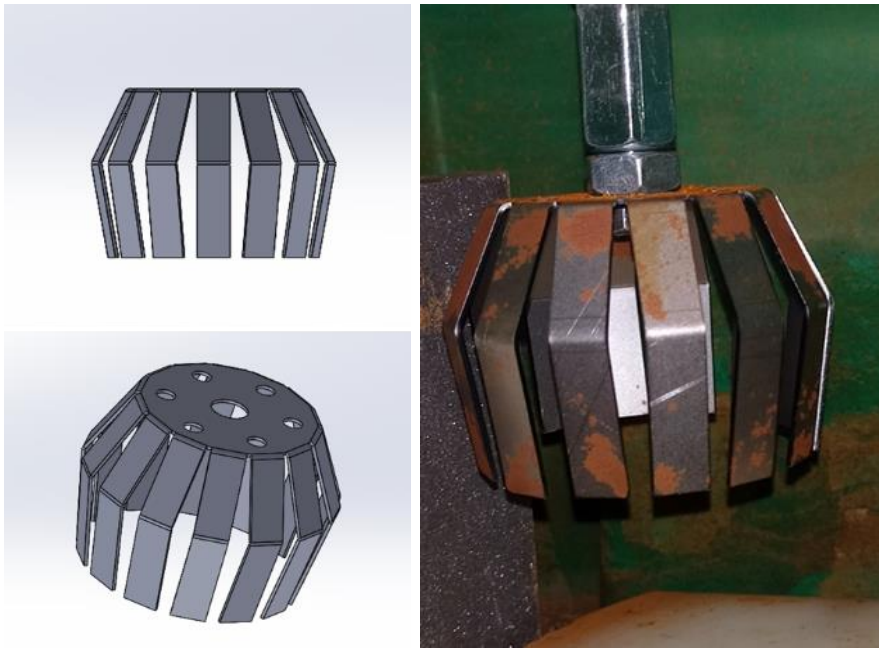


Abbildung 2.35: vereinfachte Lamellenelektrode

Für die dünnen Scales wurde an vorhandenen Probekörpern der Funktionsnachweis gebracht. Ebenso konnte gezeigt werden, dass nicht nur im Bereich des geringsten Abstands und zwischen den Lamellen ein Abtrag erzielt wurde. In Abbildung 2.36 ist das Versuchsergebnis dargestellt. Die Schicht wurde im Bereich des Impulseinschlages bis auf die metallische Oberfläche des Rohrs entfernt. Der Überschchnitt ist gut zu erkennen.



Abbildung 2.36: Löseergebnis an dünnen Scales

Für die Betrachtung dicker Scales wurden zunächst Rohrstücke mit einer Betonschicht auf der Innenwand verwendet. Dazu wurde eine Gussform verwendet, die es ermöglichte unterschiedliche Scale-Dicken herzustellen (s. Abbildung 2.37). Die Dicke wurde im dargestellten Aufbau über die Dicke der Hülse eingestellt. Das äußere Rohrstück hatte den Innendurchmesser des gewünschten Casing von  $4 \frac{1}{2}$ “.



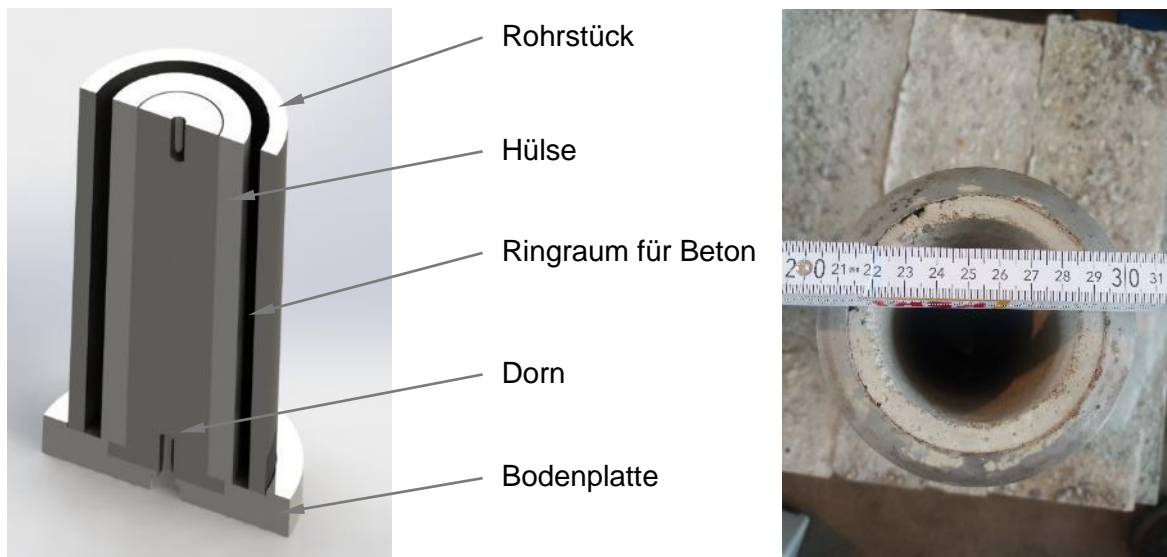


Abbildung 2.37: Aufbau von Gussform und fertiger Probekörper

Analog den Versuchen mit dünnen Scales wurden hier zunächst Funktionstests durchgeführt, um das Elektrodenkonzept und die Durchschlagparameter zu validieren. In Abbildung 2.38 ist das Ergebnis der ersten Tests dargestellt. Damit wurde zum einen das Funktionsprinzip veranschaulicht, als auch die vollständige Lösung des Betons bis auf die metallische Oberfläche gezeigt.

Die Versuche wurden mit einer Impulsspannung von 200 kV und einer Impulsenergie von 35 J durchgeführt.



Abbildung 2.38: Löseergebnis in betonierten Scales

Die Ergebnisse dieser Versuche waren die Grundlage für die Erprobung der Reinigungs Elektroden an realen Tubing- und Casing-Proben. Dazu wurden zwei Systeme entwickelt. Zum einen entstand ein mobiler Aufbau, mit dem ausgebaute Rohre auf einer Bohrlokation bearbeitet werden konnten. Zum anderen wurde eine Aufhängung für Casings konstruiert, welche zukünftig auf der Versuchsanlage der TU Dresden in Dorfain zum Einsatz kommt, um dort Versuche mit größeren Probekörpern durchzuführen.

#### 2.4.2 Praxistests bei Partnern

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Versuchsreihen bei Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Zum einen wurden Versuche auf dem Gelände eines Geothermiekraftwerkes (Projektpartner 1) und zum anderen auf dem Betriebsgelände eines Unternehmens, das unter anderem ausgebaute Rohre für die Erdöl- und Erdgasindustrie reinigt

(Projektpartner 2). Für die Versuche wurde eigens ein mobiler Versuchsaufbau entwickelt und umgesetzt, der ein breites Anwendungsspektrum bietet.



Abbildung 2.39: Versuchsaufbau für Versuche außerhalb des Labors

Die Impulserzeugung der mobilen Versuchsanlage erfolgt über einen fünfstufigen Marxgenerator, der eine maximale Ausgangsspannung von 200 kV und eine maximale Impulsenergie von 80 J bereitstellen kann. Am Ausgang der Stoßspannungsquelle ist ein Kabel mit einer Länge von 5 m montiert, mit dem der Impuls an die Elektroden geleitet wird. Zur besseren Handhabbarkeit ist das Kabel am Endstück segmentierbar und die Verbindungsstelle entsprechend isoliert. Dadurch können bei Bedarf längere Kabel angeschlossen werden, ohne die Verbindung innerhalb der Hochspannungsdurchführung der Stoßspannungsquelle zu lösen.

#### **Versuchsdurchführung auf dem Gelände des Projektpartners 1:**

Für die Versuche wurde der Versuchsaufbau in einem Transporter montiert, so dass nur die Medien (Strom, Wasser, Erdung) zugeführt werden mussten. Als Probekörper wurde ein Stück Rohr aus dem obertägigen Teil der Geothermieanlage verwendet.

Ziel der Versuche war zum einen der Nachweis der Funktion des EIV bei den vorliegenden Scales und zum anderen ein flächiger Abtrag der Ablagerungen. Die Scale-Dicke betrug zwischen 1 mm und 2 mm. Aus diesem Grund wurde neben dem oben beschriebenen Versuchsaufbau auch die Stoßspannungsquelle aus Kapitel 2.3.1 verwendet (80 kV, 7 J). Dadurch werden insbesondere zur Umrüstung auf die Minimaltests Umrüstzeiten gespart.

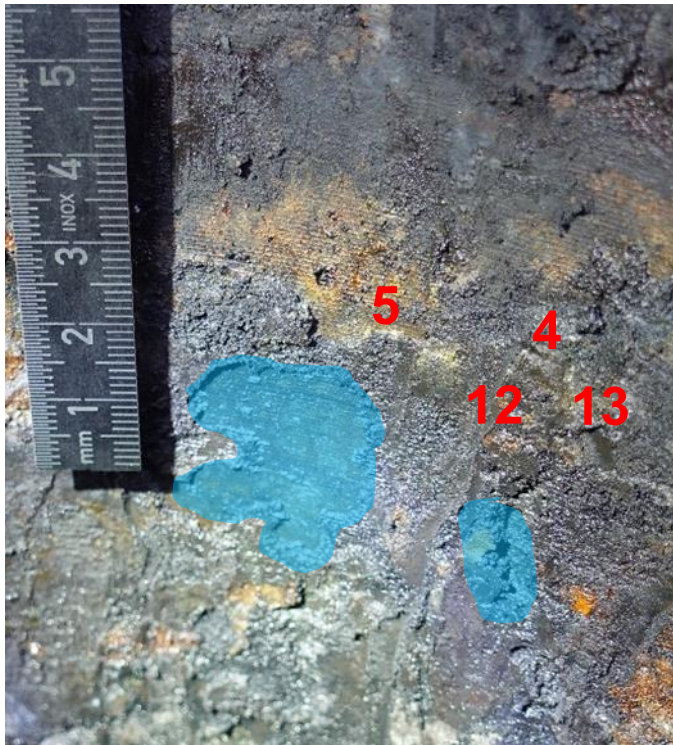


Abbildung 2.40: Versuchsaufbau auf dem Betriebsgelände des Geothermiekraftwerks

Für die Versuche wurde zunächst der Probekörper in das Fass gestellt und dieses anschließend mit Leitungswasser gefüllt. Durch das Lösen von Stoffen im Wasser stellte sich ein Leitwert von 1200 bis 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Wasser ein. Zunächst wurde mit der kleineren Stoßspannungsquelle nachgewiesen, dass die Scales prinzipiell bearbeitbar und lösbar sind. Es wurde ein Abtrag bis auf die Oberfläche des Probekörpers nachgewiesen. Durch die Variation der Impulsanzahl konnte zudem auch nachgewiesen werden, dass der Durchschlag immer dort erfolgt, wo Scales noch am Rohr sind. Dazu wurde die Abbauelektrode mit 1 mm Abstand zur Oberfläche der Scales positioniert. Das Löseergebnis (5) aus Abbildung 2.41 zeigt, dass nicht nur im Bereich des geringsten Abstands zwischen Elektrode und Probekörper, sondern auch darüber hinaus der Scale entfernt wurde.

Ein Defekt der Ladespannungsanlage verhinderte den Einsatz der größeren Stoßspannungsquelle, so dass lediglich die Versuche bis 80 kV und 7 J durchgeführt werden konnten. Die praktischen Versuche hatten jedoch die Ergebnisse aus den Vorversuchen bestätigt, dass bei der Verwendung von geringen Spannungen im Bereich 50 kV nur geringe Scale-Dicken (1 bis 2mm) bei einer gleichzeitig geringen Distanz zwischen Elektrode und Scale (ca. 1 mm) zu bearbeiten sind.





Versuch	Anzahl Impulse	Anzahl Treffer	Elektrodenform	Elektrodenabstand
4	100	100	Stab	0
5	100	100	Stab	0
12	60	0	Insert	5 mm
13	60	60	Insert	0

Abbildung 2.41: Funktionsnachweis an realer Rohrprobe mit unterschiedlichen Impulsparametern

### Versuchsdurchführung auf dem Betriebsgelände des Projektpartners 2:

Auf dem Betriebsgelände des Unternehmens, die u. a. Rohre von Scales bereinigen, wurde ebenfalls der bereits vorhandene mobile Versuchsaufbau verwendet. Es standen hier zwei Probekörper zur Verfügung. Auf dem Rohr 1 befand sich die Scale-Ablagerung auf der Innenseite des Rohrs und die Scale-Dicke betrug weniger als 1 mm, beim Rohr 2 handelte es sich um eine Scale-Ablagerung auf der Außenseite des Rohrs mit einer Dicke von 2 bis 5 mm. Auch hier konnten beide Scales erfolgreich durchschlagen werden. Es hat sich analog zu den Versuchen bei Projektpartner 1 gezeigt, dass die dünnen Scales bereits mit Energien von 7 J bei einer Impulsamplitude von 80 kV gelöst werden können. Jedoch sind dabei nur geringe Abstände, im Bereich von 1 mm, zwischen Scaleoberfläche und Elektroden akzeptabel. Größere Abstände im Bereich bis 5 mm konnten nur durch größere Spannungsamplituden überwunden werden. Auch hier wurden durch die Versuche an praxisnahen Probekörpern die Versuche im Labor validiert. Zudem lässt sich anhand der gewonnenen Erkenntnisse bereits abschätzen, dass die effizienteste Methode zur Entfernung von dünnen Scale-Schichten die Verwendung von geringen Spannungsamplituden und Energien bei gleichzeitig hoher Impulswiederholrate ist. In einem nachfolgenden Projekt müssen anhand von Versuchen an realen Proben und im Labor geeignete Arbeitspunkte herausgearbeitet werden. Daraus lassen sich dann in Abhängigkeit der Ablagerungsdicke Empfehlungen für Impulsparameter ableiten.

Des Weiteren war das gelöste Material am Rohr 1 sehr fein und verursachte eine starke Trübung im Wasser. Eine Größenbestimmung der abgelösten Scales fand im Rahmen der Versuche nicht statt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Feianteile mit Wasser auszirkuliert werden können.

Die dickeren Scale-Ablagerungen am Rohr 2 wurden mit einer Amplitude von 150 kV und einer Impulsenergie von 48 J erfolgreich gelöst. Auch hier hatte sich gezeigt, dass nicht nur der Bereich der am nächsten zur Elektrode war, bearbeitet wurde, sondern auch ein flächiger Abtrag an der Rohrwand erfolgte. Zudem wurde gezeigt, dass ein teilweises Abheben des umliegenden Bereichs erfolgte. Das heißt, dass nicht nur der bearbeitete Bereich vom Rohr gelöst wurde, sondern auch umliegende Scales abgehoben wurden. Daraus lässt sich ableiten, dass das EIV ein mögliches Verfahren in der Reinigung von Bauteilen in Aufbereitungsbetrieben darstellt.

Die erfolgreichen Funktionsnachweise für beide Probekörper sind in Abbildung 2.42 dargestellt.

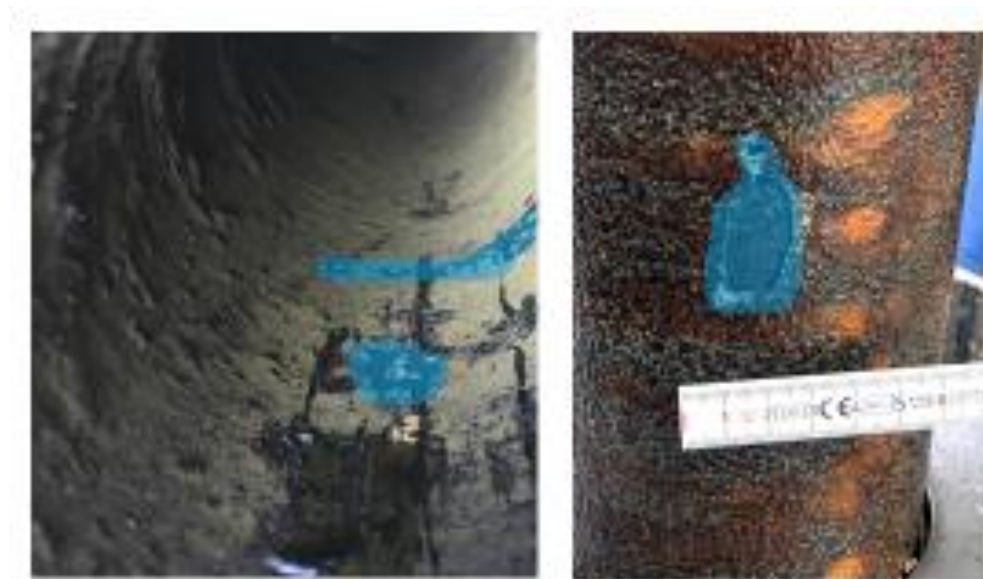


Abbildung 2.42: Funktionsnachweis des EIV für beide Probekörper

## 2.5 AP 5 – Dimensionierung des Impulsspannungsgenerators

Ziel des Arbeitspaketes 5 war es anhand der bereits festgelegten Parameter (Durchmesser, Temperatur, Druck, Elektrodengeometrie und Scale-Zusammensetzung) einen Impulsspannungsgenerator mit entsprechender Leistung zu dimensionieren. Die Auslegung musste parallel zur Auslegung der Elektrode stattfinden.

Als Impulsspannungsgenerator wurde ein System nach Marx mit Funkenstrecken verwendet. Die Funktionsweise wird nachfolgend dargestellt, s. Abbildung 2.43. Die wesentlichen Komponenten der Schaltung sind die Kondensatoren, Funkenstrecken und Induktivitäten. Die Kondensatoren dienen als Energiespeicher und werden parallel mit einer definierten Ladespannung aufgeladen. Durch eine gezielte Überspannung wird die erste Funkenstrecke zum Durchschlag gebracht. Durch den damit hervorgerufenen Spannungsimpuls werden auch die nachfolgenden Funkenstrecken gezündet. In der Folge werden durch die Lichtbögen der Durchschläge die Kondensatoren in Reihe geschaltet. Dadurch addieren sich die Ladespannungen der einzelnen Stufen entsprechend der Stufenanzahl auf und es wird ein Impuls an den Ausgang weitergeleitet. Die Induktivitäten werden verwendet, um die Reihenschaltung im Moment des Zündens zu gewährleisten.



Das Prinzip nach Marx mit Funkenstrecken wurde aus mehreren Gründen der Impulserzeugung mit Leitungsgeneratoren, Impulstransformatoren oder sogenannten Solid State Generatoren vorgezogen.

*Leitungsgeneratoren* sind in der Lage sehr steil ansteigende Impulse zu generieren. Dies bietet insbesondere für die Effizienz des EIV einen Vorteil, da prozessbedingt die Isolierwirkung des Fluides zu nimmt, je steiler die Impulse sind. Die Generatoren haben jedoch auch zwei für die Umsetzung sehr entscheidende Nachteile. Üblicherweise wird die Impulsenergie dieser Generatoren in Kabeln definierter Länge gespeichert. Dabei wird das Kabel selbst als Kondensator betrachtet, der aus einem Innenleiter, der Isolierung bzw. dem Dielektrikum und der äußeren Schirmung besteht. Durch eine Funkenstrecke wird die im Kabel gespeicherte Impulsenergie auf die angeschlossenen Elektroden geleitet. Durch den Schaltvorgang entsteht ein sehr schneller Impuls mit Anstiegszeiten bis in den einstelligen Nanosekundenbereich. Bauartbedingt muss allerdings der Generator mit der doppelten Ladespannung geladen werden, wodurch der Isolieraufwand stark erhöht wird.

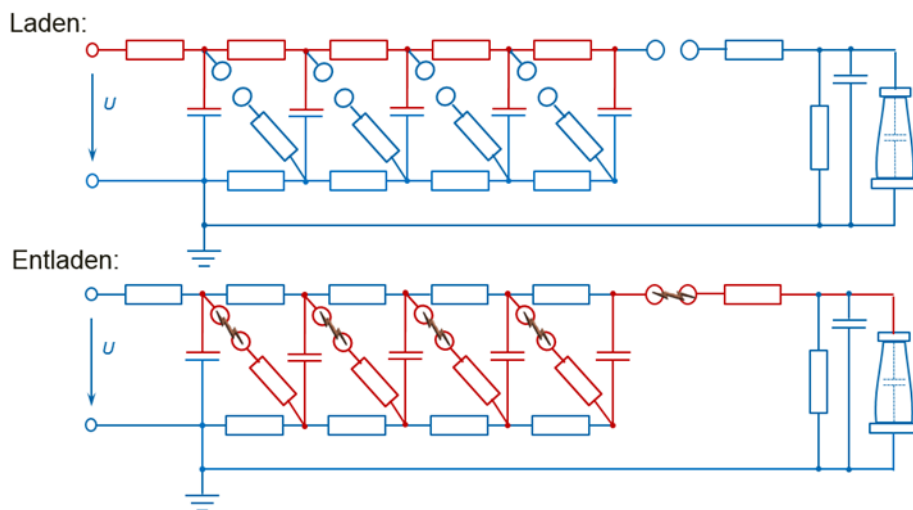


Abbildung 2.43: Funktionsschema eines kaskadierten Marxgenerators

*Impulstransformatoren* oder umgangssprachlich Zündspulen haben den Vorteil, dass sie mit sehr geringen Spannungen arbeiten können und auch für hohe Impulswiederholraten ausgelegt sind. Jedoch steigt der Isolieraufwand sehr stark an, wenn Spannungen von bis zu 200 kV am Ausgang erreicht werden sollen. Zudem speichern sie die Impulsenergie im Magnetfeld, durch den begrenzten Bauraum ist auch hier die Energiemenge stark reduziert.

*Solid State Generatoren* sind ähnlich dem klassischen Marxgenerator aufgebaut. Jedoch werden die Schaltvorgänge nicht mit Zündfunkenstrecken erreicht, sondern mit Halbleiterbauteilen. Diese sind jedoch nach jetzigem Stand noch nicht in der Lage, die für das Projekt gewünschten Spannungen zuverlässig zu schalten. Jedoch ist insbesondere hinsichtlich des zunehmenden Bedarfs an hochspannungsfesten und hochtemperaturtauglichen Halbleitern damit zu rechnen, dass geeignete Komponenten verfügbar sind. Insbesondere im Bereich Kühlung, Bauraumreduktion und Schaltgenauigkeit sind hier für die Impulserzeugung Vorteile gegenüber Funkenstrecken zu erwarten.

### 2.5.1 Randbedingungen für die Umsetzung

Für die Auslegung des Impulsspannungsgenerators wurden hinsichtlich Bauraum und Umgebungsbedingungen die Werte analog der Reinigungselektroden angenommen, s. Kapitel 2.4.

Insbesondere der Bauraum stellte bei Temperaturen von 150 °C eine große Herausforderung dar. Zur Verdeutlichung wird die Bauräumeausnutzung in Abbildung 2.44 gezeigt.

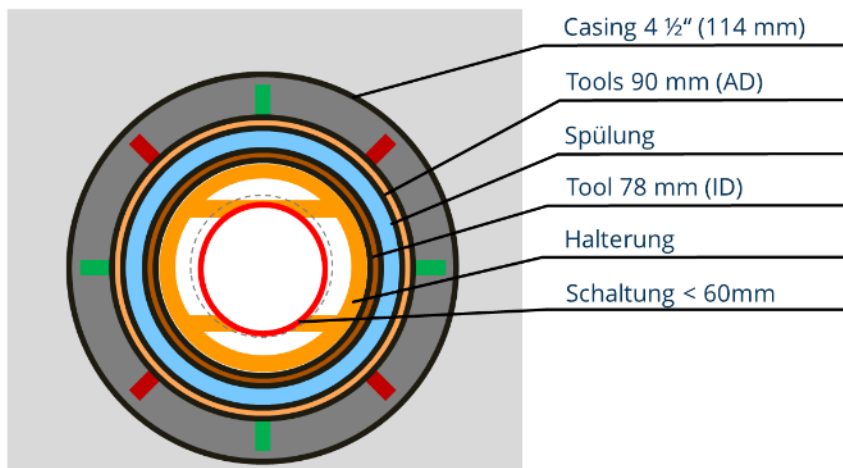


Abbildung 2.44: Bauräumeaufteilung des Impulsspannungsgenerators

## 2.5.2 Auslegung der Schaltung

Für die grundlegende Auslegung wurden zunächst die Impulsspannung und die notwendige Impulsenergie abgeschätzt. Anhand dieser Werte konnte bereits die notwendige Kapazität und in Abhängigkeit der Stufenanzahl die Ladespannung bestimmt werden.

Die zu Grunde liegenden Gleichungen sind:

$$E_{imp} = \frac{1}{2} \cdot n_{St} \cdot C_{St} \cdot U_L^2 \quad (1)$$

$$U_{imp} = n_{St} \cdot U_L \quad (2)$$

$E_{imp}$  Impulsenergie

$C_{St}$  Stufenkapazität

$n_{St}$  Stufenanzahl

$U_L$  Ladespannung

$U_{imp}$  Impulsspannung

Die Impulsenergie  $E_{imp}$  orientiert sich an den Parametern in den Vorversuchen.

Für die Auslegung wurden folgenden Annahmen getroffen:

Annahme:  $U_{imp}$ : 200 kV

$E_{imp}$ : 50 J

$n_{St}$ : 10

Daraus ergibt sich eine theoretische Ladespannung und Stufenkapazität von:

Rechnerische Ladespannung  $U_L$ : 20 kV

Rechnerische benötigte Stufenkapazität  $C_{St}$ : 26 nF

Für die Konstruktion ließen sich aus der Schaltung folgende Randbedingungen ableiten. Zum einen eine möglichst platzsparende Anordnung der Komponenten im vorhandenen Bauraum (Kondensatoren, Induktivitäten, Funkenstrecken) und zum anderen die optische Verbindung der Funkenstrecken, damit die Zündreihenfolge in der Kaskade eingehalten werden kann.

Theoretisch ist es möglich, den Stoßspannungsgenerator auch mit ohmschen Widerständen auszustatten. Jedoch würden dabei bei jedem Laden des Generators ohmsche Verluste entstehen, die zu einer zusätzlichen Erwärmung der Schaltung führen. Da beim Entladen die Spannungsimpulse nur wenige Nanosekunden dauern, funktionieren die Spulen als Sperrelement und sorgen dafür, dass während des Zündens kein parasitärer Stromfluss zur Erdung des Generators fließt.

Die Auslegungskriterien für die Dimensionierung der Stoßspannungsquelle wurden anhand der durchgeführten Scale-Tests definiert. Um eine effiziente Reinigung der Tubings und Casings zu erreichen, war es wichtig die Impulsenergie und die Impulsspannung an die jeweilige Dicke der Verschmutzung anzupassen. Durch eine geeignete Auslegung der Schaltung lässt sich eine große Variabilität oder Spreizung erreichen. Unter der Spreizung wird an dieser Stelle verstanden, dass ohne eine Änderung der Schaltung, nur durch Änderung der Ladespannung, die Impulsenergie und Impulsamplitude angepasst wird.

Um die Spreizung für die künftige Schaltung zu definieren, wurden die Versuche aus Kapitel 2.3 verwendet. Der Vorteil dieser Spreizung ergibt sich aus der Leistungsbetrachtung. Der elektrische Leistungsbedarf der Stoßspannungsquelle lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_{GEN} = E_{IMP} \cdot IRR \quad (3)$$

$IRR$  Impulse repetition rate in  $s^{-1}$

Das bedeutet unter Berücksichtigung von Gleichung (1) bei angenommener konstanter Generatorleistung  $P_{GEN}$ , dass es bei einer Halbierung der Ladespannung möglich ist, die Impulswiederholrate zu vervierfachen. Unter den bisher getroffenen Annahmen ergaben sich die in Abbildung 2.45 dargestellten Leistungsparameter.

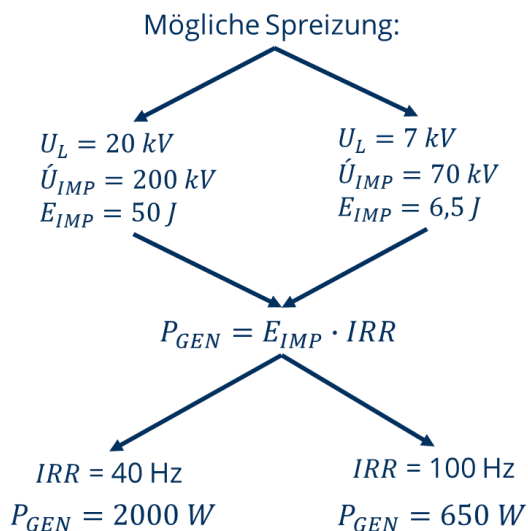


Abbildung 2.45: Auslegung der Schaltung für eine geeignete Spreizung

Welche Spreizung möglich ist und welche Impulswiederholraten genutzt werden können, wurde durch die verfügbaren Kondensatoren bestimmt. Die Kondensatoren besitzen einen Verlustfaktor der frequenzabhängig eine Erwärmung der Kondensatoren hervorruft. Diese Erwärmung kann zum Verlust der Kapazität oder zur Zerstörung des Bauteils führen. Daher wurde bei der Qualifizierung der Kondensatoren nicht nur die Spannungsfestigkeit, sondern auch die Erwärmung bei definierten Impulswiederholraten erfasst.

### **2.5.3 Auswahl und Qualifizierung der Kondensatoren**

Im ersten Schritt wurden anhand der verfügbaren Kondensatoren mögliche Anordnungen für die Schaltung im Bauraum entwickelt. Die bisher in anderen Stoßspannungsquellen verwendeten Keramikkondensatoren stellten aufgrund ihres Durchmessers von 60 mm keine Alternative dar. Sie würden den empfohlenen Bauraum vollständig ausfüllen, so dass kein Platz für Leitungen oder die optische Verbindung der Funkenstrecken zur Verfügung steht.

Als Alternative dazu wurden Kondensatoren ausgewählt, die deutlich kleiner sind. Die Vorteile dieser MLCC's (Multi Layer Ceramic Capacitor) ist die höhere Energiedichte und die Möglichkeit zur automatisierten Verarbeitung bei der Bestückung der Platinen. Nachteilig ist, dass ein einzelner Kondensator nicht die gewünschten Spannungsanforderungen erfüllt. Daher musste eine Reihenschaltung umgesetzt werden, mit der eine Ladespannung von 20 kV ermöglicht werden konnte. Als Prämisse für die Auswahl wurde daher gezielt nach der notwendigen Spannungsfestigkeit und Kapazität bei gleichzeitig geringem Bauraum gesucht. Eine Auswahl geeigneter Kondensatoren mit einer Vorsortierung ist in Tabelle 2.9 zusammengefasst.

Im Hinblick auf den Preis wurde der Kondensator CAP CER 3300PF 5KV X7R 2225 von Vishay Vitramon ausgewählt. Durch die Spannungsfestigkeit von 5 kV müssten mindestens vier Kondensatoren in Reihe geschaltet werden. Um eine höhere Lebensdauer der Kondensatoren zu gewährleisten, wurden fünf Kondensatoren in Reihe geschaltet. Damit würde man die Belastung für jeden einzelnen Kondensator um 20 % reduzieren. Für die Umsetzung im Stoßspannungsgenerator wurden entsprechende kleine Platinen umgesetzt, die durch eine geeignete Verschaltung die entsprechende Stufenkapazität ergeben. (s. Abbildung 2.46)

Tabelle 2.9: Vorauswahl geeigneter Kondensatoren

	Bewertung	
Vishay Vitramon (MLCC): CAP CER 5.6 NF 6KV X7R 3640 (10,07970EUR/Stck) CAP CER 3.3 NF 8KV X7R 3640 (8,23048EUR/Stck.) CAP CER 3300PF 5KV X7R 2225 (1,28189EUR/Stck)	X X ok	zu teuer zu teuer
Knowles Novacap: CAP CER 0.022UF 6KV X7R RAD (31,07105EUR/Stck) CAP CER 0.022UF 8KV X7R RAD (16,79625EUR/Stck) CAP CER 10000PF 10KV X7R RAD (39,34420EUR/Stck)	- - X	Technisch möglich Technisch möglich Zu groß
Vishay Cera-Mite: CAP CER 10000PF 6KV Z5U RADIAL (2,23658EUR/Stck) WIMA: 6kV, 10nF	- -	Technisch möglich Technisch möglich
TDK (Doorknob) 30 kV, 3,3nF Z5U Prototyp CAP CER 2500PF 20KV Z5T DISK 46,52EUR/Stck Disk FHV-4AN 55,30EUR/Stck 38mmx27mm	X X X	Zu groß Zu groß Zu groß

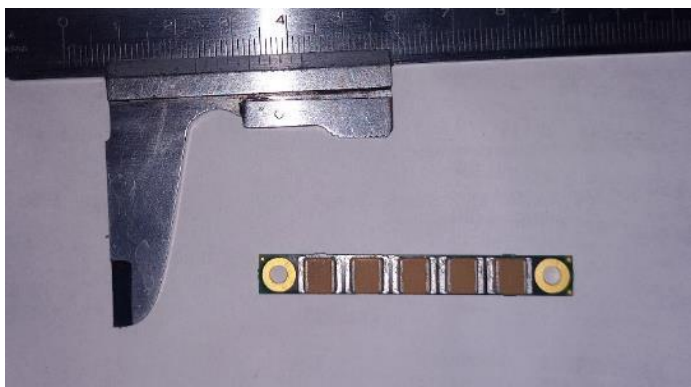


Abbildung 2.46: Stack für weitere Betrachtung

Für die Untersuchung wurde folgendes Versuchsprogramm aufgestellt. Im Vordergrund stand dabei die Veränderung der Impulswiederholrate, da bei geringerer Ladespannung höhere Impulswiederholraten bei gleicher elektrischer Leistung möglich sind. Aufgrund dessen wurde bei den jeweiligen Parametern auch die elektrische Leistung angegeben, die bei dem jeweiligen Test umgesetzt wurde. Während der Versuche wurde parallel die Temperatur an einem Kondensator in definierten Zeiträumen dokumentiert. Nach Abschluss des jeweiligen Versuchs wurden die Temperaturen an allen Kondensatoren erfasst. Hintergrund der Messung war zu erfassen, ab wann sich eine Beharrungstemperatur einstellte bzw. ob sich die Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Belastung veränderte. Die Versuchsschaltung und der zugehörige Versuchsplan sind in Abbildung 2.47 dargestellt. Es handelte sich dabei um eine einstufige Stoßspannungsschaltung mit den Einstellparametern  $U_L$  und  $IRR$ . Die nebenstehende Leistung wurde anhand der Einstellparameter berechnet. Während der Versuche wurde die Temperatur zu Beginn, nach 5 min, 10 min, 20 min und 30 min erfasst.





Versuch #	UL kV	IRR Hz	Leistung W
1	5	10	0,83
2	5	20	1,65
3	5	40	3,30
4	5	50	4,13
5	5	70	5,78
6	5	100	8,25
7	10	10	3,30
8	10	20	6,60
9	10	40	13,20
10	10	50	16,50
11	10	70	23,10
12	15	10	7,43
13	15	20	14,85
14	15	40	29,70
15	15	50	37,13
16	20	10	13,20
17	20	20	26,40
18	20	40	52,80

Abbildung 2.47: Einstufige Stoßspannungsschaltung und Versuchsplan zur Erprobung von Kondensatoren

In Abbildung 2.48 sind die absolvierten Messreihen dargestellt. Zusätzlich zu den vorhandenen Messpunkten wurde für die Versuche bei 40 Hz im Bereich bis 5 min an weiteren Messpunkten die Temperatur erfasst. Dadurch wurde das Erwärmungsverhalten der Kondensatoren dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.49 dargestellt.

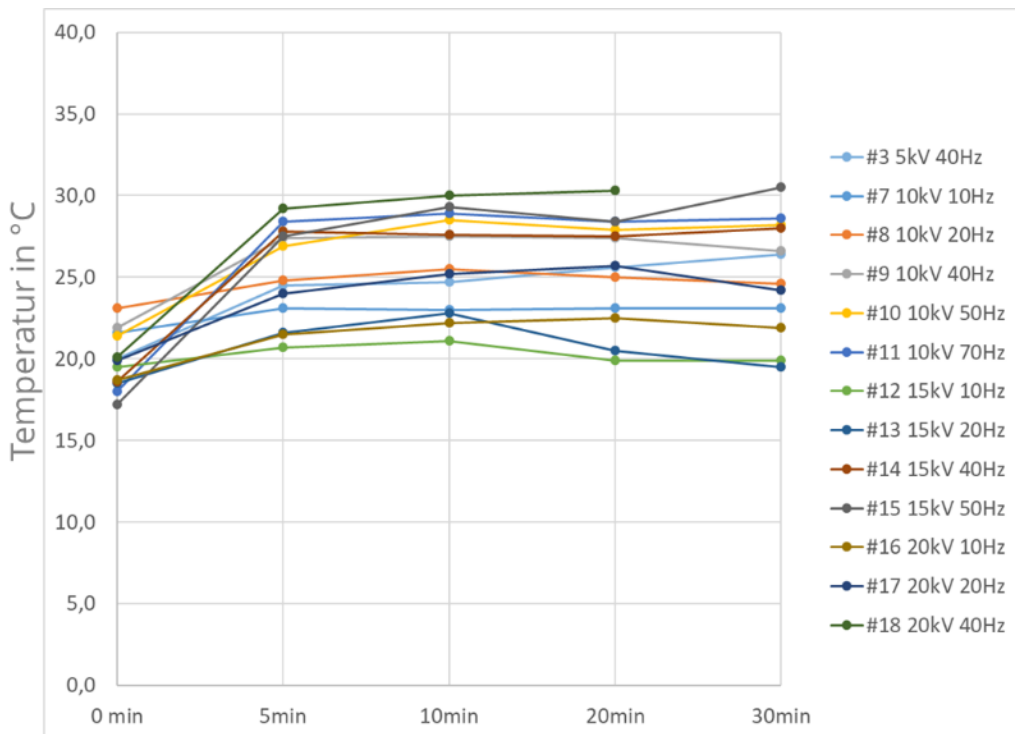


Abbildung 2.48: Ergebnisse der Qualifizierungsversuche

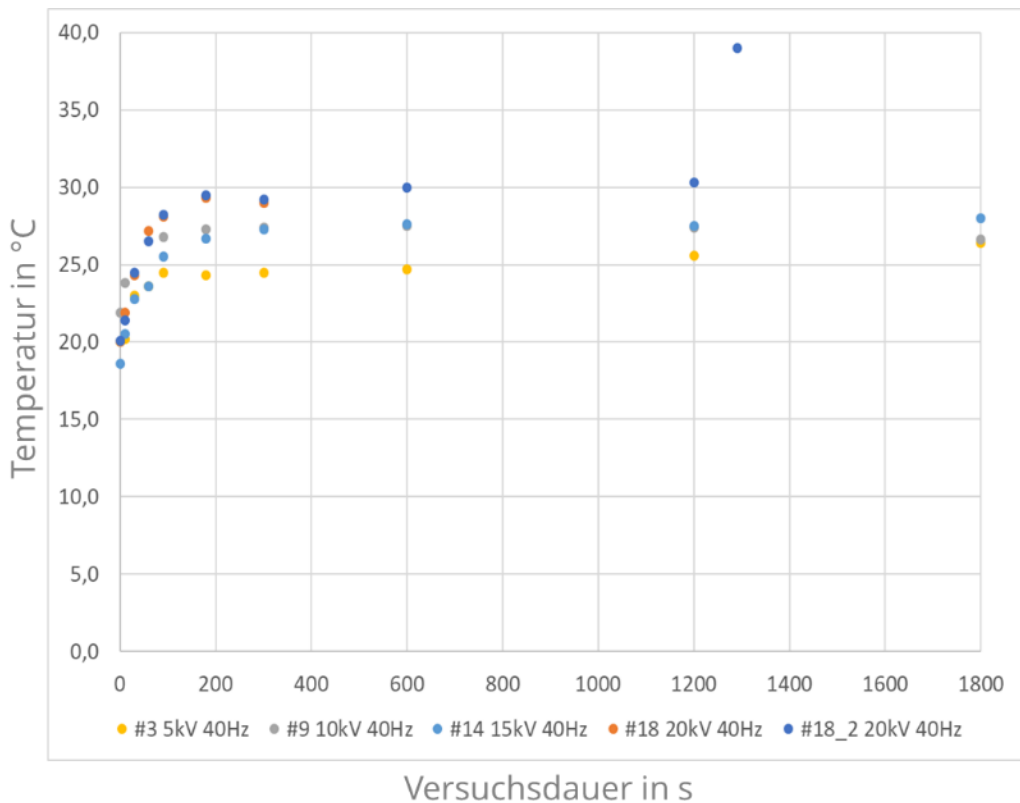


Abbildung 2.49: Erwärmungsverhalten bei 40 Hz

Die Versuchsreihe bei 20 kV und 40 Hz wurde zweimal wiederholt. In beiden Versuchen wurde der Prüfkörper durch elektrische Durchschläge zerstört. In beiden Versagensfällen gingen Teilentladungen an den Einzelkondensatoren voraus, die mit einem sprunghaften Temperaturanstieg verbunden waren.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen drei wichtige Erkenntnisse:

1. Es stellte sich eine Beharrungstemperatur deutlich unterhalb der Belastungsgrenze der Kondensatoren ein.
2. Ein sprunghafter Anstieg der Temperatur deutete auf Teilentladungen hin und kündigte das Versagen von Komponenten an.
3. Die Kondensatoren sind prinzipiell für den Einsatz in der Impulsspannungsquelle geeignet.

Für die weiteren Untersuchungen wurde der Versuch mit 20 kV und 40 Hz wiederholt, wobei der Kondensator in Öl getaucht wurde, um Teilentladungen zu vermeiden. Dabei wurde die vollständige Versuchsdauer von 30 min ohne Probleme erreicht. Die Messung der Temperatur konnte durch das umgebende Öl nicht durchgeführt werden.

Für die weitere Konstruktion bestand anschließend die Möglichkeit die Schaltung – ausgenommen der Funkenstrecken – im Öl zu betreiben oder die Kondensatorstacks selbst mit speziellen Schutzmitteln (Underfiller) zu versehen. Die Tests mit den Underfillern konnten im Rahmen des Projektes noch nicht durchgeführt werden.

#### 2.5.4 Konstruktion der Schaltung und Umsetzung des Prototyps

Die Schaltungsentwicklung erfolgte in drei wesentlichen Stufen. Der erste Schritt war die Umsetzung und Erprobung einer Einzelstufe auf der Basis der gewählten Komponenten und Leistungsparameter. Daraus wurde ein Prototyp einer mehrstufigen Schaltung abgeleitet,

umgesetzt und erprobt. Anschließend wurde ein weiterer Prototyp konstruiert, der die praktischen Gegebenheiten bei den Aufwältigungsarbeiten, wie maximale Länge und Gewicht, berücksichtigt.

Zunächst ist der Durchmesser des Gehäuses durch die Standards der Bohrtechnik festgelegt. Das heißt, für jeden Casing-Durchmesser gibt es einen entsprechenden Driftdurchmesser, der den maximalen Werkzeugdurchmesser definiert. Für eine 4 1/2"-Rohrtour beträgt der Driftdurchmesser 97 mm.

Bohrungen werden in der Regel durch einen sogenannten Bohrlochkopf (s. Abbildung 2.50, E-Kreuz) verschlossen, welches alle Armaturen und Zugänge beinhaltet, mit denen sowohl die Förderung als auch die Maßnahmen zur Bohrlochkontrolle durchgeführt werden können. Da die Lagerstätten im Falle von Öl- und Gasbohrungen unter Druck stehen, werden auf diesem Bohrlochkopf Schleusen montiert, welche den Zugang von Aufwältigungswerkzeugen auch unter Druck ermöglichen. Diese Schleusen werden aus Segmenten zusammengesetzt, die in der Regel eine Länge von 3 m haben und ebenfalls einen standardisierten Innendurchmesser, der dem Driftdurchmesser entspricht. Für ein besseres Handling und eine einfachere Montage sollte dieser jedoch unterschritten werden. Es wird daher ein Durchmesser für den Prototyp von 90 mm angestrebt. Daraus ergibt sich analog Abbildung 2.44 in Kapitel 2.5.1 unter Berücksichtigung von Wandstärke und Isolierabständen ein Schaltdurchmesser von < 60 mm. Die Länge sollte maximal 3 m betragen oder der Prototyp muss segmentierbar sein.

Eine weitere Randbedingung war das Gewicht des Prototyps. Da in der Regel eine Workover-Anlage zur Aufwältigung verwendet wird (s. Abbildung 2.51), ist der Bauraum oberhalb des Bohrlochkopfes mit einem Kran nur schwer zugänglich, bzw. der Einsatz nur kleiner Hebezeuge möglich. Zudem sind zum Teil Bohrlokationen zu klein, so dass keine Stellfläche für einen Kran zur Verfügung steht. Daher müssen die Werkzeuge manuell oder mit leichten Hebezeugen zugeführt werden. Die Obergrenze für das handhabbare Gewicht wurde daher mit 80 bis 100 kg festgelegt. Allerdings ist bei der Fortführung der Entwicklungsarbeit eine weitere Reduzierung des Gewichts der einzelnen Komponenten geplant, um den zusätzlichen Einsatz von Geräten und Maschinen zu minimieren und die Arbeitsschritte zu erleichtern.



Abbildung 2.50: Bohrlochkopf einer Förderbohrung [21]



Abbildung 2.51: Aufwältigung mit Coiled tubing [22]

## Funktionsmuster

Zunächst wurde, aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Versuchen mit den Scales und der Qualifizierung der Kondensatoren, ein Funktionsmuster einer Stufe umgesetzt. Da ein einzelner der gewählten Kondensatoren nicht die gewünschten Parameter für die Ladespannung oder Kapazität besitzt, mussten diese zu sogenannten Stacks verschaltet werden. Die vorgeschlagene Lösung ist in Abbildung 2.52 dargestellt.

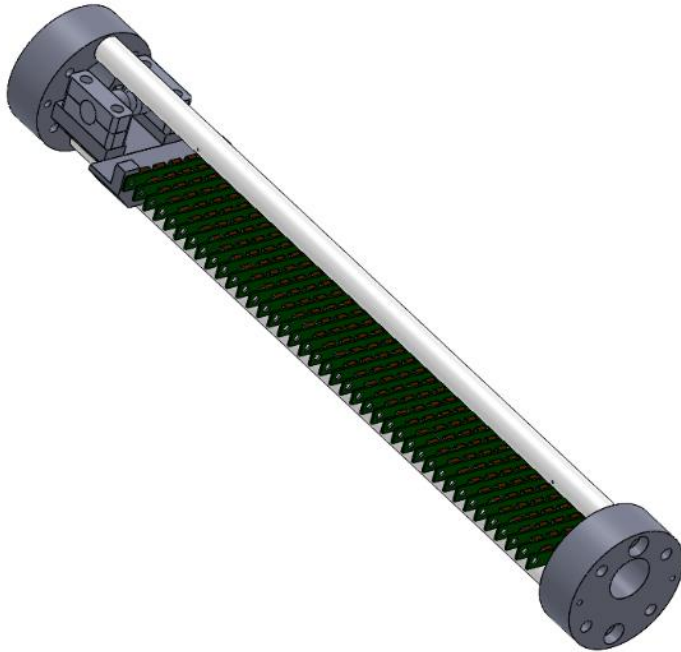
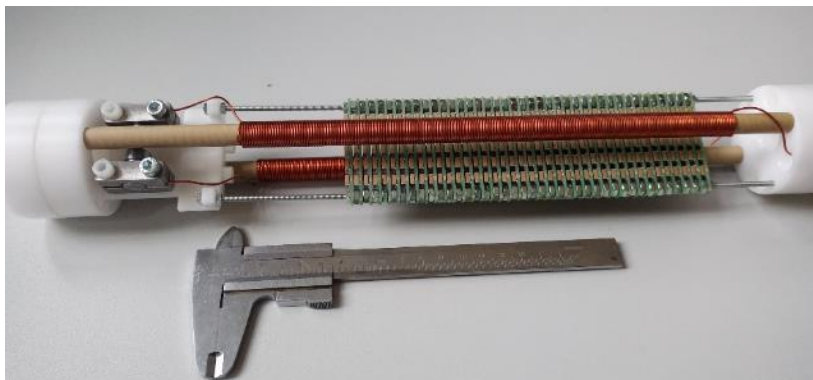


Abbildung 2.52: Aufbau einer Stufe mit MLCC

Ziel war zum einen die MLCC's, die Stacks und auch die Stufe insgesamt hinsichtlich ihrer Eignung zu untersuchen (vgl. Abbildung 2.53). Die Stufe besitzt eine Länge von 380 mm und hat einen Durchmesser von 56 mm. Damit entspricht sie den Vorgaben hinsichtlich des Bauraums. Für jede Stufe wurden fünf MLCC's in Reihe auf einzelnen Leiterplatten verbaut und 40 Leiterplatten parallelgeschaltet. Somit ergeben sich insgesamt 200 Kondensatoren für jede Stufe. Jede Leiterplatte hat eine Spannungsfestigkeit von 25 kV. Durch die Begrenzung der Ladespannung auf 20 kV wird die Belastung auf die Komponenten reduziert und die zu erwartende Lebensdauer erhöht.



<b>Ladespannung:</b>	<b>20 kV</b>
<b>Stufenenergie:</b>	<b>5,2 J</b>
<b>Länge:</b>	<b>380 mm</b>
<b>Durchmesser:</b>	<b>56 mm</b>

Abbildung 2.53: Stufe und Parameter

Mit der Stufe wurden verschiedene Funktionstests hinsichtlich maximaler Ladespannung (bis 20 kV) und Impulswiederholrate (bis 25 Hz) durchgeführt und konnten erfolgreich abgeschlossen

werden. Der Fokus der Tests lag darauf, dass lokal keine Überhitzung in den Kondensatoren (Abfallen der Stufenkapazität und damit Verkürzung der Ladezeit) oder Teilentladungen an den Löt- und Verbindungsstellen (optische Kontrolle) auftraten. Diese sind potenzielle Fehlerquellen, die im Dauereinsatz zum Versagen einzelner Kondensatoren und in der Folge der Schaltung führen können.

## **1. Generation Prototyp**

Die größte Herausforderung bei der Reduktion des Bauraums bestand in der zuverlässigen Gewährleistung der Isolierfestigkeit. Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen bei der Bearbeitung des Projekts und den Erfahrungen aus der Entwicklung von EIV-Bohrwerkzeugen wurde eine zwölfstufige Stoßspannungsschaltung umgesetzt und erprobt. Dabei stand zunächst der Nachweis der Funktionalität im Vordergrund. Optimierung hinsichtlich Impulswiederholrate oder Lebensdauer wurden dabei noch nicht unternommen und sollten Gegenstand anschließender Forschungsarbeiten sein.

Da eine Stoßspannungsquelle mit Funkenstrecken eingesetzt werden soll, muss diese isoliert werden. Dafür wurde eine Gasisolierung vorgesehen. Die Isolierfestigkeit von Gasen kann durch die Anhebung des Gasdrucks erhöht werden. Dieser Zusammenhang folgt den Gesetzen von Paschen und ist im betrachteten Bereich nahezu linear. Bei der Auslegung war jedoch zu beachten, dass sowohl Funkenstrecken als auch Schaltung dem gleichen Gasdruck ausgesetzt sind. Das bedeutet, dass durch die Steigerung des Drucks die Isolierfestigkeit zum Gehäuse verbessert wird. Zudem wird auch die Zündspannung der Funkenstrecken erhöht. Das kann bis zu einem gewissen Abstand durch Verkleinerung des Funkenstreckenabstands kompensiert werden, jedoch müssen die Funkenstrecken mit sehr geringen Toleranzen abgestimmt werden. Beispielsweise zündet bei einem Gasdruck von 20 bar eine Funkenstrecke mit einer Schlagweite von 1 mm erst bei einer Spannung von 40 kV. Das heißt, dass theoretisch die Schlagweite auf 0,5 mm halbiert werden müsste, um eine Zündspannung von 20 kV zu erreichen. Bei diesen geringen Abständen haben schon kleine Abweichungen infolge von Fertigungstoleranzen oder Verschleiß auf den Oberflächen der Funkenstrecken einen großen Einfluss auf das Zündverhalten. Das führt zu einem erheblichen Abstimmungs- und Einstellungsaufwand, wenn von einer zwölfstufigen Stoßspannungsquelle mit zwölf Funkenstrecken ausgegangen wird. Um den Aufwand für die Abstimmung der Funkenstrecken zu reduzieren, wurde sich an einem Generatordruck von etwa 10 bar orientiert.

Die Stufen wurden im Vergleich zu den Funktionsmustern montagefreundlicher gestaltet und um Zentrierringe erweitert, welche die Schaltung zentrisch im Gehäuse positionieren. Eindrücke vom Aufbau der Schaltung und den Zusammenbau einschließlich der Musterelektroden werden in Abbildung 2.54 gezeigt.

Das Gehäuse besteht aus Baustahl und besitzt noch keine Spülungsführung, da der Fokus vorerst nur auf dem reinen Löseprozess lag. Über die Gewinde an beiden Enden wurde es mittels gesonderten Endstücken verschlossen. Die Endstücke sind im nachfolgenden CAD-Modell dargestellt. (s. Abbildung 2.55) Vorteil ist, dass beide Seiten beim Öffnen einen Zugang zum vollen Querschnitt ermöglichen und die Schaltung so in beide Richtungen montiert bzw. demontiert werden kann. Die Gesamtlänge des Prototyps beträgt 5950 mm bei einem Gewicht von 80 kg. Somit erfüllt er die Anforderung, dass er beim praktischen Einsatz auch durch zwei Personen manuell bewegt werden kann.





Abbildung 2.54: Montage des Prototypen und Aufbau des Funktionstests

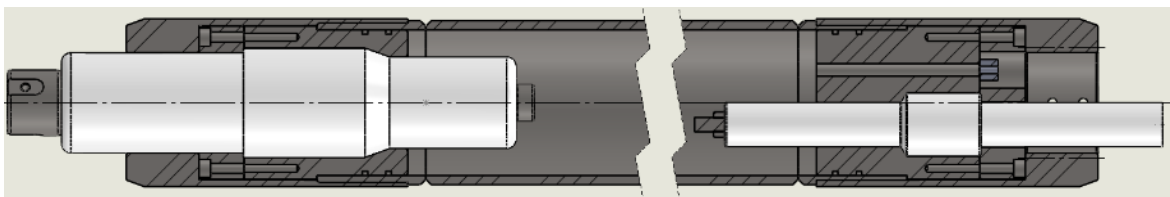


Abbildung 2.55: Endstücke des Gehäuses des Prototyps (Hochspannungsausgang links, Ladespannungsdurchführung rechts)

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme wurden am umgesetzten Prototyp sowohl die Funktionsmuster der Elektroden als auch die Probeelektroden aus den Scale-Tests angeschlossen. In beiden Fällen wurde erfolgreich eine Zerstörung bzw. ein Abtrag der Scales und damit die Funktion des Prototyps nachgewiesen.

## 2. Generation Prototyp

Bei der Betrachtung der Stoßspannungsschaltung fällt auf, dass ein wesentlicher Teil des Bauraums für Isolierabstände benötigt wird. Das ist auf die Verwendung des Druckgases zurückzuführen, welches sowohl die Zündspannung der Funkenstrecken steuert als auch die Isolierung zur Gehäusewand gewährleistet. Durch die Trennung dieser Funktion und die Substitution der äußeren Isolierung ist es möglich, den Bauraum für die Schaltung zu verkleinern.

Es wurde sich dabei auf das Öl als Isoliermedium orientiert, damit eine selbstheilende Isolierung vorliegt. Selbstheilend bedeutet, dass durch Rekombination oder Vermischung die Stellen, an denen ein elektrischer Durchschlag erfolgt ist, wieder ihre Isolierwirkung herstellen. Dabei muss im Öl darauf geachtet werden, dass Abbrandrückstände auszirkuliert und soweit möglich gefiltert werden. Das zugehörige Modell ist in Abbildung 2.56 dargestellt.

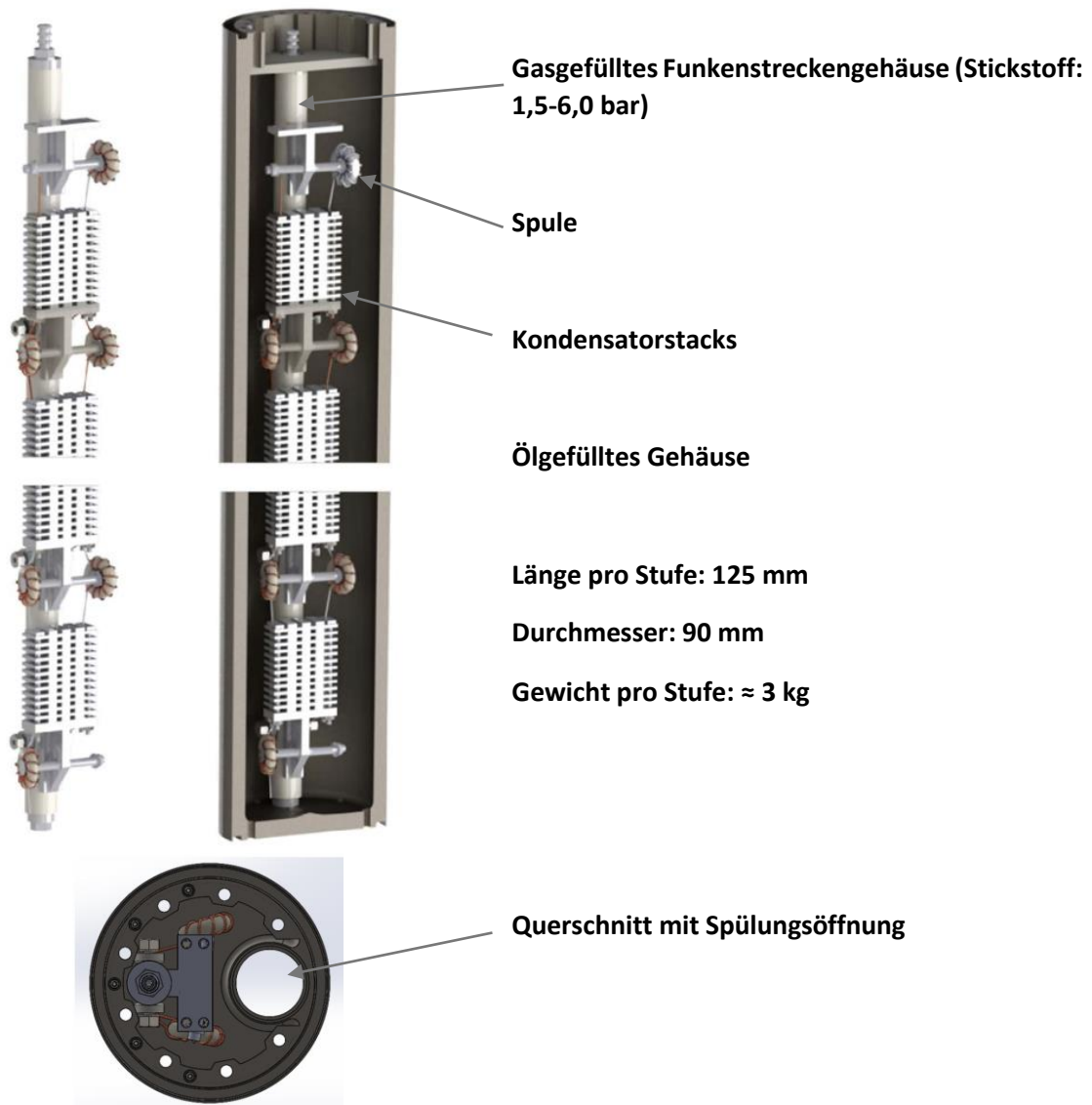


Abbildung 2.56: Lösungsvariante für eine ölgefüllte Stoßspannungsquelle

Die Schaltung beinhaltet ein separates Druckrohr, welches die Funkenstrecken beinhaltet und gasgefüllt ist. Durch die Verwendung additiver Fertigungsverfahren lassen sich geeignete und bauraumangepasste Halter für Kondensatorstacks und Induktivitäten herstellen. Zudem bietet der Aufbau die Möglichkeit einen Spülungskanal zu integrieren, der für das Auszirkulieren des gelösten Materials verwendet werden kann. Die Lösungsvariante für den zweiten Prototyp ist in Abbildung 2.56 dargestellt. Dieser Prototyp wurde im laufenden Projekt nicht umgesetzt, stellt aber den nächsten Entwicklungsschritt zu einem anwendungsfähigen Aufwältigungswerkzeug dar.

## 2.6 AP 6 – Untersuchung zum Abtrag vollflächiger Scales in einem Rohr

Ziel des Arbeitspaketes 6 war es, das EIV hinsichtlich der Eignung zur Beseitigung vollflächiger Scales, sowie den Einfluss des EIV auf die Zementation hinter dem Casing zu untersuchen. Dafür sollten Rohrabschnitte aus realen Bohrungen, mit aufgezüchteten Scales und mit einer Zementierung verwendet werden.

Aufgrund des Rohrdurchmessers von 4 ½“, wurden Ablagerungen dicker als 15 mm als vollflächiger Verschluss definiert. Vollflächig bezieht sich hierbei darauf, dass das Casing ab dieser Dicke nicht mehr als Gegenelektrode benutzt werden kann. Es wurde daher das Konzept verfolgt, dass die Elektrode vollflächig eine Art Pilotbohrung erstellt, bis zu einer verbleibenden

restlichen Scale-Dicke von 5 mm. Der am Rohr verbliebene Scale, wird anschließend mit der auskonstruierten Reinigungsgeometrie aus den Versuchen entfernt.

Für die Erstellung der Pilotbohrung wurde eine Elektrodengeometrie gewählt, wie sie auch zum Bohren eingesetzt wird. In diesem Fall ist die aktive Elektrode sternförmig ausgeformt und von einer geerdeten Elektrode umgeben (s. Abbildung 2.57). Der Durchschlag erfolgt immer entlang des Wegs des geringsten elektrischen Widerstandes. Bei entsprechender Anstiegszeit und Impulsspannungsamplitude ist das der Feststoff bzw. Scale. Ist dieser Bereich gelöst, füllt sich dieser mit der umgebenden Flüssigkeit und wird elektrisch fester. Somit erfolgen die nachfolgenden Durchschläge im Feststoff/Scale.

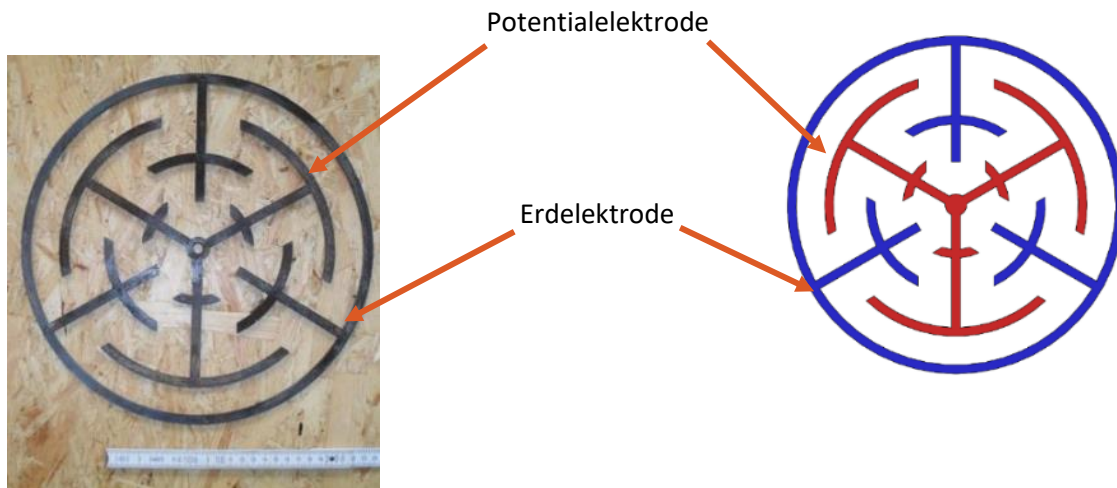


Abbildung 2.57: Sternelektrode für die Erstellung der Pilotbohrung

Zum Nachweis des Prinzips wurden an kleinen Rohrproben mit vollständigem Verschluss Versuche durchgeführt. Die Rohrwand fungierte dabei als geerdete Elektrode. Das Ergebnis dieser Versuche wird in Abbildung 2.58 gezeigt. Der Abstand zwischen Elektrode und Rohrwand betrug 15 mm. Die Bilder zeigen, dass ein vollflächiger Abtrag mit den gewählten Impulsparametern wie im Vorversuch möglich war und somit die Weiterentwicklung der Aufwältigungselektrode erfolgen konnte.

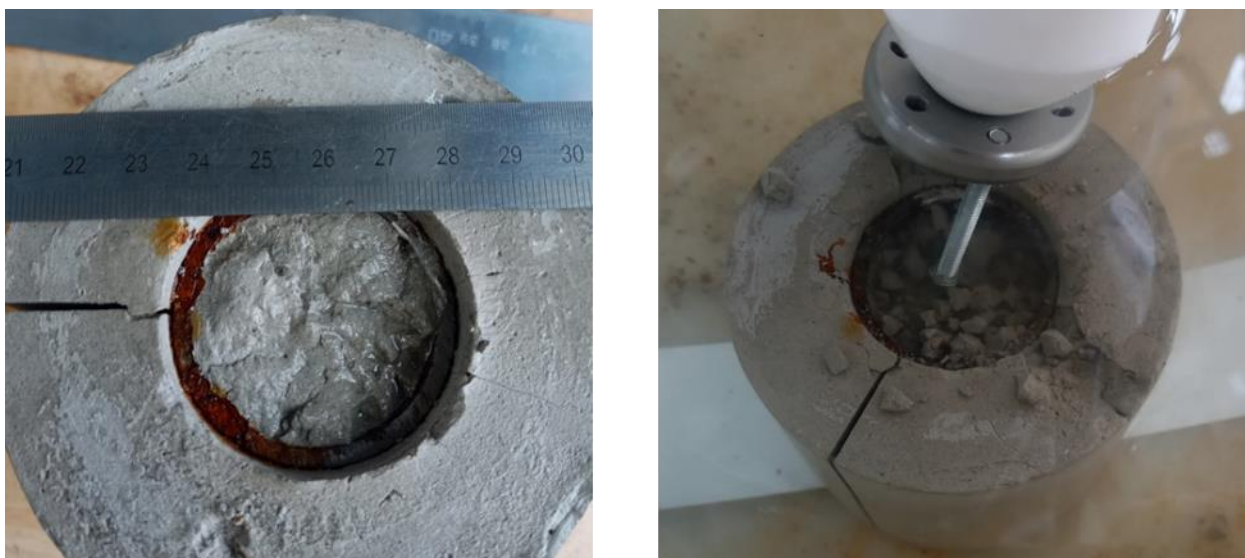


Abbildung 2.58: Funktionstest zum vollflächigen Abtrag an einem vollverschlossenen Rohrstück



Aufgrund der Tatsache, dass das Casing als geerdete Elektrode verwendet werden soll, wurden die Polaritäten der Sternelektroden aus Abbildung 2.57 vertauscht. Damit wird der innere Teil der Elektrode zur Erdelektrode und der äußere Teil zur aktiven Elektrode. Das Schema und die umgesetzte Elektrode sind in Abbildung 2.59 dargestellt. Der gezeigte Aufbau wurde an einer Impulsspannungsquelle im Labor erfolgreich erprobt. Dabei wurde insbesondere ein vollflächiger Abtrag im Zentrum erreicht.



Abbildung 2.59: Lösungsvariante für eine Abbauelektrode für vollflächigen Verschluss, Aktive Elektrode rot, Passive Elektrode blau

Der Vorteil des Vertauschens der Polarität ist, dass die Spannungsführung einfacher erfolgen kann und das Potenzial direkt am äußeren Ring der Elektrode anliegt. Es bietet sich sogar die Möglichkeit, den Stützring oberhalb der aktiven Elektrode als Gegenelektrode zu nutzen und so zu vermeiden, dass die Impulse ins Casing schlagen. Das ist insbesondere notwendig, wenn ein elektrisch nicht leitfähiges Material für das Casing verwendet wird.

#### *Untersuchungen zur Zementation hinter dem Rohr*

Die Zementation ist ein wichtiges Bindeglied zwischen dem Untergrund und der Verrohrung der Bohrung. Da diese nicht beschädigt werden darf, wurde im Laufe des Projektes der Einfluss des EIV's auf die Zementation hinter dem Rohr untersucht. Die dafür verwendeten Probekörper stellte die TU-Bergakademie Freiberg (TUBAF) zur Verfügung, s. Kapitel 2.2.2. Um einen Schaden nach dem EIV-Einsatz festzustellen wurde die instationäre Anlage der TUBAF zur Permeabilitätsmessung verwendet, s. Abbildung 2.60. Die Permeabilität gibt Auskunft darüber wie gut ein Fluid oder Gas unter einem bestimmten Druck durch einen Feststoff fließen kann. Ist die Permeabilität niedrig, fließt wenig Fluid/Gas durch den Feststoff. Ist sie dagegen hoch, dann ist auch die Durchflussrate des Fluides/Gases durch den Feststoff hoch. Für die Untersuchungen der Zementation bedeutet dies, dass eine Permeabilitätsmessung vor und nach dem EIV-Einsatz durchgeführt werden musste. Ist die Permeabilität nach dem EIV-Einsatz höher als vor dem Versuch, dann ist davon auszugehen, dass eine Schädigung der Zementation vorliegt.

Für die Messungen an der stationären Anlage musste die Probe mittels der Abdeckungen am oberen und unteren Ende so abgedichtet sein, dass eine Durchströmung des Strömungsfluides nur durch den Zementmantel stattfindet. Mit einer Gummihülse ummantelt wurde die Probe anschließend in den Autoklav der instationären Anlage eingebaut. Der Einbau ist in Abbildung 2.61 dargestellt.



Abbildung 2.60: instationäre Anlage zur Permeabilitätsbestimmung der Zementation

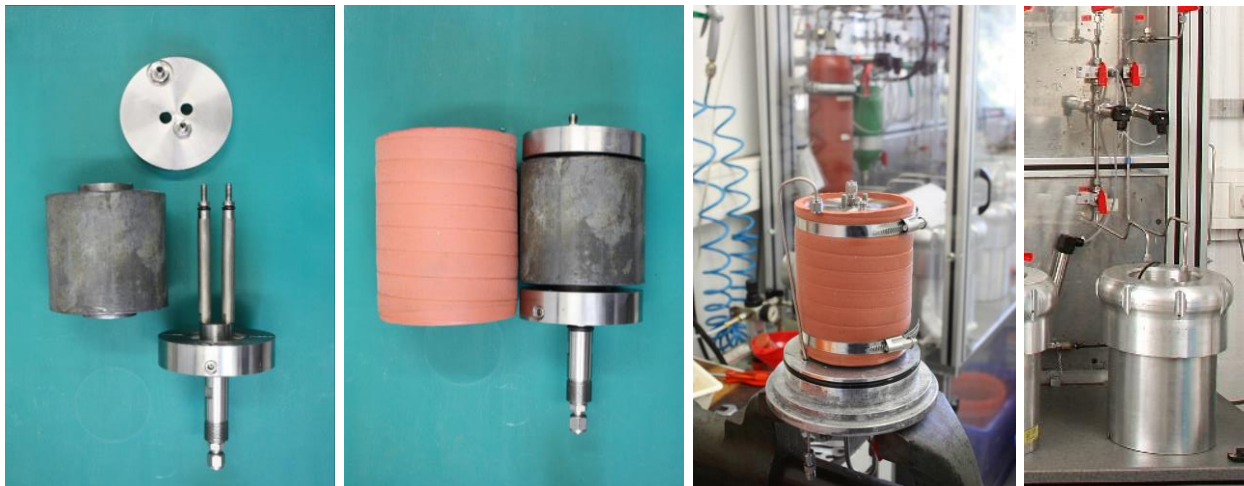


Abbildung 2.61: Probeneinbau in instationäre Anlage

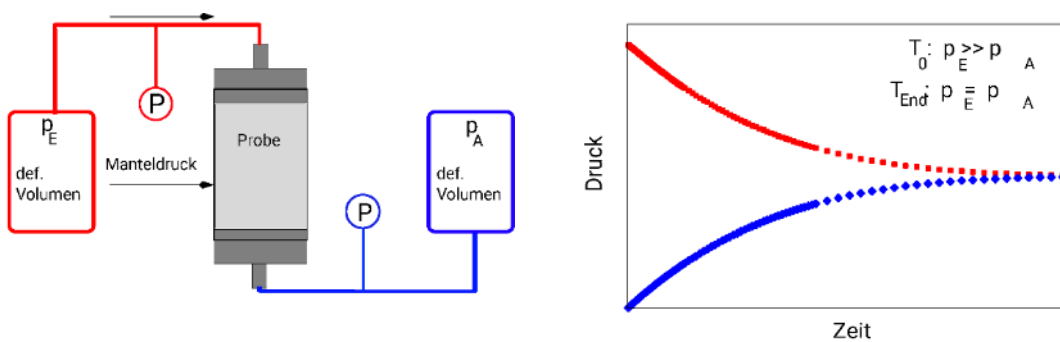


Abbildung 2.62: Funktionsschema instationäre Anlage

Für die Untersuchungen wurde ein Manteldruck von 20 bar und ein Eingangsdruck von 10 bar eingestellt. Als durchströmendes Fluid wurde Wasser verwendet. Über die zeitabhängige



Messung von Temperatur, dem Eingangs- und Ausgangsdruck und des Druckausgleichs, kann über ein Berechnungsmodell die Permeabilität bestimmt werden. Ein Funktionsschema ist in Abbildung 2.62 dargestellt.

Aufgrund dessen, dass die Zementation bei Temperaturschwankungen schnell Schaden nahm und auch Transportschäden nicht ausgeschlossen werden konnten, wurde eine EIV-Versuchsanlage am Institut für Aufbereitungsmaschinen der TUBAF verwendet. Insgesamt konnten acht Probekörper untersucht werden. Die Impulsenergie bei den durchgeführten Versuchen betrug 80 J. Vier Probekörper wurden mit 20 Impulsen und die restlichen vier mit 50 Impulsen beaufschlagt. Bei keinem dieser Körper konnte eine Schädigung der Zementation durch das EIV nachgewiesen werden. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.63 für die zementierten Proben 1 und 3 aufgezeigt.

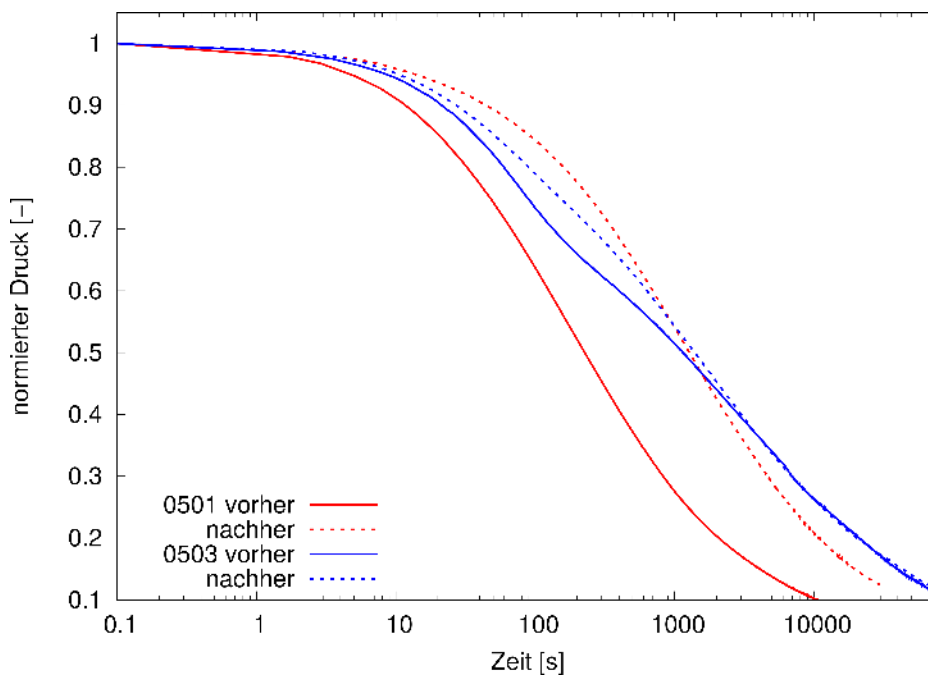


Abbildung 2.63: Druckverlauf der zementierten Probekörper 1 und 3 vor und nach dem EIV-Einsatz

Wie in Abbildung 2.63 gut zu erkennen ist, zeigen die normierten Druckverläufe über der Zeit einen ähnlichen Kurvenverlauf. Bei einem übereinanderliegen der Vorher-Nachher-Kurven - wie z. B. bei den blau eingefärbten Kurven der Probe 3 - bedeutet dies, dass keine Änderung der Permeabilität vorliegt und somit auch keine Schädigung durch das EIV verursacht wurde. Betrachtet man nun die roten Kurven der Probe 1 fällt auf, dass die Kurve der Messung nach dem EIV-Einsatz weiter rechts liegt (rot gestrichelt) als die Kurve vor dem EIV-Einsatz (rot durchgehend). Das bedeutet, dass die Permeabilität nach dem EIV-Einsatz niedriger geworden ist. Allerdings ist dies nur bei drei Proben der Fall und liegt darin begründet, dass zwischen den beiden Messungen Vorher und Nachher ein längerer Zeitraum von mehr als 14 Tagen lag. Da der Aushärtungsprozess von Zement kontinuierlich fortschreitet, hatte dies zur Folge, dass die Permeabilität heruntergegangen ist. Bei den restlichen Proben waren die Zeitabstände zwischen den Messungen um ein vielfaches geringer und die Kurven lagen nah beieinander, bzw. aufeinander.

## 2.7 AP 7 – Entwicklung Gesamtkonzept

Ziel im Arbeitspaket 7 war es, die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete zusammenzufassen und daraus die relevanten Erkenntnisse in Bezug auf das Ziel des Forschungsvorhabens abzuleiten und ein technisches Gesamtkonzept zu entwickeln.

Nach aktuellem Projektstand wird eine Wireline-Lösung vorgeschlagen, bei der der Impulsspannungsgenerator von Übertage versorgt wird. Die Zirkulation wird dabei um das Gehäuse herumgeführt, damit der Platz im Inneren ausschließlich der Impulserzeugung und der Isolierung dient.

Die Länge des Systems ist durch den Aufbau der Workover-Anlagen und der Schleusen begrenzt. Theoretisch sind Längen bis zu 30 m denkbar. Im Bereich von Öl- und Gasbohrungen sind bei der Montage jedoch die Platzbedingungen am Bohrloch zu beachten. Es wird derzeit angestrebt ein segmentierbares System zu entwickeln, dessen Einzelsegmente bis maximal 3000 mm lang sind. Das Gewicht soll im Bereich bis zu 100 kg liegen um eine manuelle Handhabung durch mehrere Arbeiter zu ermöglichen. Für eine bessere Handhabung ist es allerdings von Vorteil das Gewicht der Einzelsegmente weiter zu reduzieren.

Im Bereich von Geothermiebohrungen sind deutlich längere und schwerere Segmente möglich, da hier eine bessere Zugänglichkeit vorliegt.

### 2.7.1 Spannungsversorgung mittels Wireline und Grainacher

Die Stoßspannungsquelle benötigt eine Ladespannung von bis zu 20 kV bei einer Anschlussleistung von bis zu 5 kW. Konventionelle Wireline-Kabel sind jedoch nicht für das genannte Spannungsniveau ausgelegt. Zudem sind die verfügbaren Kandidaten für eine Leistung von 5 kW begrenzt. Sogenannte Mono-Conductor sind aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften ausgeschlossen. Es gibt zwar Kabel die, die entsprechenden Leistungen transportieren können, jedoch sind die zugehörigen Versorgungseinheiten in den übertägigen Anlagen nicht dafür ausgelegt. In Abstimmung mit Industriepartnern wurde ein geeignetes Kabel ausgewählt. Es zeigt exemplarisch, dass es bereits Standardprodukte gibt, die für die Versorgung der Stoßspannungsquelle verwendet werden können.


	Diameter	33/64" (13,2 mm)
	Minimum Scheiben Diameter (Umlenkungrolle)	26"(660mm)
	Max. Leiterspannung	1.000 V (AC)
	AWG Rating	20 (max 1,5 A)
	Temp. Rating	232 °C

Abbildung 2.64: Aufbau und Spezifikationen des ausgewählten Kabels [23]

Der Aufbau und die Spezifikationen des Kabels sind Abbildung 2.64 zu entnehmen.

Gewählt wird ein Kabel mit sieben Adern, die jeweils eine Stromtragfähigkeit von 1,1 A pro Leiter bei einer Spannungsbelastbarkeit von 1000 V (AC) aufweisen. Diese Spannung muss in die entsprechende Ladespannung umgewandelt werden. Hier ergeben sich zwei Wege: Zum einen können die Leitungen mit Wechselspannung betrieben werden und zum anderen mit Gleichspannung.

Die Nutzung von Wechselspannung führt bei den sehr langen Kabellängen vorwiegend zu hohen induktiven Verlusten. Jedoch ist eine einfache Umwandlung der Ausgangsspannung in die Ladespannung mittels einer Greinacher Schaltung möglich. Dabei handelt es sich um einen Aufbau bestehend aus Dioden und Kondensatoren, die eine Vervielfachung der Spannung hervorrufen. Das grundlegende Prinzip ist in Abbildung 2.65 dargestellt. Die Schaltung beinhaltet keine beweglichen Teile und kann mit handelsüblichen Hochtemperaturbauelementen aufgebaut werden. In einer Simulation wurde diese Schaltung bereits untersucht, s. Abbildung 2.66. Ein zugehöriger Prototyp wird im Anschluss an das Projekt umgesetzt und erprobt. In einem nachfolgenden Projekt müssen Leistungstests – insbesondere bei voller Anschlussleistung – die Standsicherheit dieser Lösung demonstrieren.

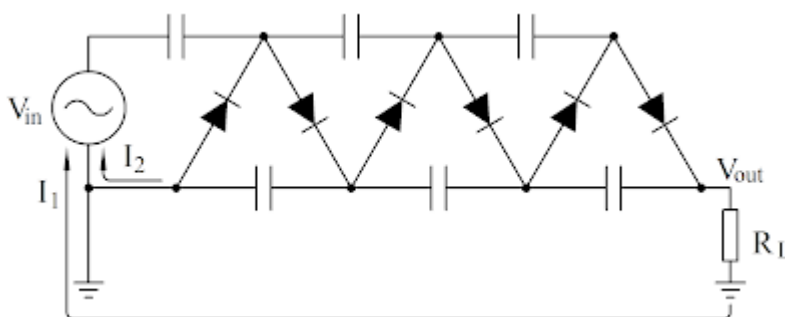


Abbildung 2.65: Schema für eine Greinacher Schaltung

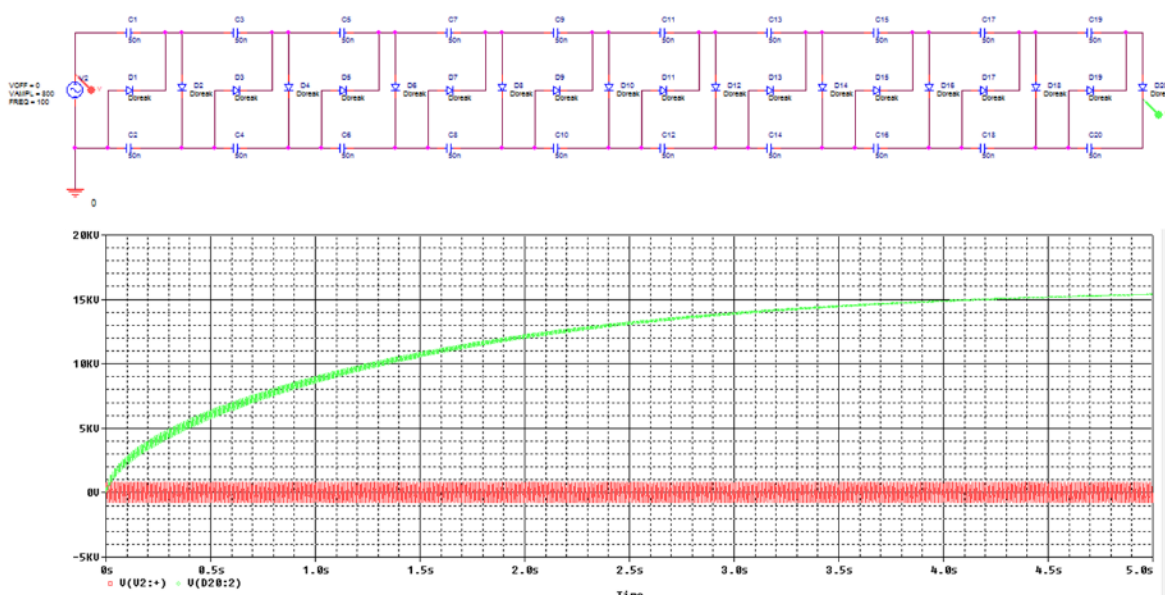


Abbildung 2.66: Simulationsmodell für die Greinacher Schaltung (Eingangsspannung (rot), Ausgangsspannung (grün))

Bei der Verwendung von Gleichspannung im Kabelstrang muss eine Umwandlung in eine Wechselspannung erfolgen, damit diese ebenfalls über eine Greinacher Schaltung entsprechend umgeformt wird. Dazu wird vorgeschlagen, Gleichspannungsmotoren zu verwenden, die mit

permanenterregten Generatoren gekoppelt sind. Zur Reduktion des Aufwands zur Synchronisierung der Generatoren wird jedem Generator eine Greinacher Schaltung nachgeschaltet und diese auf der Gleichspannungsseite zusammengeführt.

Sowohl die Generatoren, Motoren und Greinacher-Schaltungen können in einzelnen Gehäuseteilen verbaut und untergebracht werden, so dass die Segmentlängen und Gewichte für die Handhabung im Einsatz eingehalten werden.

Grenzen für die Verwendung von Motoren und Generatoren sind im Bauraum zu finden, da sich die elektrischen Maschinen nicht beliebig verkleinern lassen. Die Verwendung von Wechselspannung im Kabel und der Einsatz der Greinacher Schaltung lässt sich für deutlich kleinere Durchmesser als 4 1/2" einfacher umsetzen. Die genaue Umsetzung muss allerdings in Abstimmung mit dem Anwendungsfall erfolgen.

### **2.7.2 Spannungsversorgung mittels Spülung**

Das EIV zum Scale-Abtrag soll nicht nur auf den Einsatz als Wireline-Tool beschränkt bleiben. Im Bereich von Öl- und Gasbohrungen und vor allem, aufgrund der größeren Bohrdurchmesser, in der Geothermie ist es üblich, Coiled Tubing-Anlagen zu verwenden. Diese führen das Werkzeug an einem aufgespulten langen Stahlrohr (Coiled Tubing). Der Vorteil dieser Anlagen ist, dass sie zum einen sehr leicht und mobil sind und zum anderen zeitaufwändiges Verschrauben und Brechen des Bohrstrangs entfallen. Durch das Stahlrohr kann Spülung in der Bohrung zirkuliert werden und somit auch ein Austrag des Bohrkleins oder der gelösten Scales erfolgen.

Ein Teil der hydraulischen Leistung, die über den Spülungsstrom transportiert wird, kann zum Antrieb eines elektrischen Generators verwendet werden, der die elektrische Energie für die Versorgung des EIV-Reinigungswerkzeuges zur Verfügung stellt. Das Prinzip wird bereits in der Tiefbohrtechnik für den Antrieb von Messtechnik oder im experimentellen Maßstab für den Betrieb eines EIV-Bohrkopfs verwendet. Die Anpassung an die geforderten Leistungsparameter (siehe 2.5) sind auch unter Berücksichtigung des geringen Bauraums denkbar. Für die weitere Umsetzung wird jedoch empfohlen, in Labortests diese Art der Spannungsversorgung insbesondere für kleinere Durchmesser (< 4 1/2") zu validieren.

## Literaturverzeichnis

- [1] N. Mundhenk, P. Huttenloch, J. Scheiber, A. Genter, R. Zorn und T. Kohl, „Corrosion and Scaling in the Geothermal cycle of Soultz-sous-Forêts (France),“ *CORROSION 2014 - Collaborate. Educate. Innovate. Mitigate.*, 2014.
- [2] H. S. Klapper, J. Lehr und A. Bartetzko, „Hydrogeochemical Modelling to Monitor Scaling and Corrosion During Geothermal Energy Production in the North German Basin,“ New Orleans, Louisiana, U.S.A., 2017.
- [3] K. U. Raju, „Successful Scale Mitigation Strategies in Saudi Arabian Oil Fields,“ The Woodlands, Texas, U.S.A., 2009.
- [4] M. D. Yuan und A. C. Todd, „Prediction of Sulfate Scaling Tendency in Oilfield Operations,“ Houston, Texas, U.S.A., 1989.
- [5] C. Gang, L. He, S. Guochen, W. Guoqing, X. Zhongwen, R. Huaifeng und Z. Ying, „Technical Breakthrough in PCPs' Scaling Issue of ASP Flooding in Daqing Oil Field,“ Anaheim, California, U.S.A., 2007.
- [6] M. Crabtree, P. Eslinger, P. Fletcher, M. Miller, A. Johnson und G. King, „Fitting Scale - Removal and Prevention,“ *Oilfield Review* (11.3), p. 30–45, 1999.
- [7] B. Brown, „Full Scale Attack,“ *The BP Technology Magazine*, p. 30–32, Okt. - Dez. 1998.
- [8] W. W. Frenier und M. Ziauddin, „Formation, Removal, and Inhibition of Inorganic Scale in the Oilfield Environment,“ Richardson, Texas, U.S.A., 2008.
- [9] WEG, „Allgemeiner Leitfaden für CT-Einsätze,“ August 2008. [Online]. Available: <https://www.bveg.de/wp-content/uploads/2021/09/WEG-Merkblatt-fuer-Coiled-Tubing-Einsaetze-Technische-Regel.pdf>.
- [10] B. Hölting und W. G. Coldewey, *Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [11] K. Beier, „CO<sub>2</sub>-sequestration on laboratory scale: Geochemical interactions between injected CO<sub>2</sub>, saline fluid phases and potential reservoir materials,“ Disserrtation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2012.
- [12] M. Müller und M. Amro, „Untersuchung zum Auskristallisationsverhalten gesättigter Sole beim Abkühlungsprozess,“ Abschlussbericht, Freiberg, 2014.
- [13] G. Löschan, „Übersicht anorganischer Scales,“ E-Mail, Geothermal Engineering GmbH, 2017.
- [14] T. Muschalle und M. Amro, „Influence of oxygen impurities on underground gas storage and surface equipment, Literature study,“ DGMK, Hamburg, 2013.



- [15] J. Biela, „Solid State Modulator for Plasma Channel Drilling,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Bd. 16, Nr. 4, p. 1093–1099, 2009.
- [16] G. Kunze, E. Anders, S. Grossmann, J. Speck, K. Krätzschar, M. Reich, H. Strauss, T. Mutschler, M. Peters, D. Alfermann, S. Praetorius, M. Sohmer, A. Nadan, H. Kreuter, J. Brentle und S. Gutekunst, „Studie für ein Vortriebssystem zur Herstellung von tiefen Geothermiebohrungen im Festgestein mittels Elektro-Impuls-Verfahren (EIV),“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektträger Jülich, Förderkennzeichen 0327664, 2009.
- [17] G. Kunze, E. Anders, M. Voigt, H. Strauss und F. Lehmann, „Entwicklung und Erprobung eines EIV-Bohrkopfes für Tiefengeothermie : Förderprogramm des BMWI zu Forschung und Entwicklung im Bereich Geothermie,“ Abschlussbericht, Herausgegeben von Projektträger Jülich, PLATTFORM ENARGUS, Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften, Universitätsbibliothek, 2014. [Online]. Available: <https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:845043560/>.
- [18] F. Will, E. Anders, M. Voigt, F. Lehmann, H. Strauss, M. Reich, J. Lehr, A. Lienert und M. Hohmuth, „Entwicklung und In-situ-Test eines EIV - Bohrsystems (FKZ 0325788),“ Herausgegeben von Projektträger Jülich, PLATTFORM ENARGUS, Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften, Universitätsbibliothek, 2019.
- [19] M. Voigt, „Electric Impulse Technology – from laboratory to practice – drilling under borehole like conditions,“ Celle, 2016.
- [20] Geolitho Stiftung gemeinnützige GmbH, August 2021. [Online]. Available: <https://www.mineralienatlas.de/>.
- [21] „Hartmann Valves,“ April 2023. [Online]. Available: <https://www.hartmann-valves.com/en/products/wellheads/>.
- [22] „middleeast,“ April 2023. [Online]. Available: <https://middleeast.com/images/demo/projects/9-10-POGC.jpg9-10-POGC.jpg>.
- [23] „7-CONDUCTOR 7/32" VS 1/2" VS 33/64",“ Wanda Cable, 2023. [Online]. Available: [https://www.wandaescable.com/logging\\_cable/logging\\_cable-44.html](https://www.wandaescable.com/logging_cable/logging_cable-44.html).

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: „Coiled-Tubing“ [9] .....	7
Abbildung 2.2: Methoden zum Entfernen von Scales .....	7
Abbildung 2.3: Homogene und heterogene Entstehung von Scales [6] .....	9
Abbildung 2.4: Ablagerungen in einem Produktionsrohr nach [6].....	9
Abbildung 2.5: Schema des EIV-Wirkmechanismus .....	10
Abbildung 2.6: Konzept des EIV-Bohrsystems .....	11
Abbildung 2.7: Demonstrationsmodell Marxgenerator (li.) und Elektrodenanordnung (re.) .....	12
Abbildung 2.8: Eisensulfid-Probe nach fünf Impulsen.....	12
Abbildung 3.1: Löseergebnis von Vorversuchen an einer Gewindekappe .....	15
Abbildung 3.2: Probe Barium-/Strontiumsulfat .....	16
Abbildung 3.3: Probe Asphalten und Paraffinablagerung.....	16
Abbildung 3.4: Probekörper für Vorversuche (Scaleschicht auf Casingsegment < 1mm links, Scherben bis 10 mm rechts).....	17
Abbildung 3.5: Impulsspannungsgeneratoren für die Versuche .....	17
Abbildung 3.6: Präparierte Probe, Versuchsaufbau und Ergebnis der Funktionstests (von links nach rechts) .....	18
Abbildung 3.7: Vergleich Impulsanzahl und Bewegung der Elektrodengeometrie.....	18
Abbildung 3.8: links: beblitzte Probe, rechts: beblitzte Probe vergrößert unter dem Digitalmikroskop .....	19
Abbildung 3.9: Flächenabtrag durch das EIV mit 7 J, links: Probe 1, rechts: Wertetabelle Proben 1 - 6.....	20
Abbildung 3.10: Flächenabtrag durch das EIV mit 60 J, links: Probe 8, rechts: Wertetabelle Proben 7 und 8.....	20
Abbildung 3.11: Schaliges Abplatzen von Scaleschichten .....	21
Abbildung 3.12: Schema Sol-Gel-Verfahren .....	22
Abbildung 3.13: Metalloberflächen der Proben .....	23
Abbildung 3.14: Korngrößenverteilung der verschiedenen Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Presslingen .....	26
Abbildung 3.15: links: Probenhalter zerlegt, rechts: Probenhalter zusammengesetzt .....	27
Abbildung 3.16: Pressling.....	27
Abbildung 3.17: Ba/SrSO <sub>4</sub> -Pressling .....	28
Abbildung 3.18: Calcit-Pressling.....	28
Abbildung 3.19: Rohrprobe mit Zement vergossen als Vollverschluss.....	28
Abbildung 3.20: Rohrprobe mit äußerer Zementummantelung .....	28
Abbildung 3.21: Probe nach dem Entfernen des Drahtes der Versuchsreihe mit tägl. frischer Lösung und gerührt .....	29

Abbildung 3.22: REM-Aufnahme mit EDX-Analyse auf eine Fläche bezogen .....	31
Abbildung 3.23: Schadensbild des EIV, Bild 1 Foto der Probe, Bilder 2-4 Tisch-REM-Aufnahmen.....	32
Abbildung 3.24: Vergleich EIV-Abtrag, links Calcit-Pressling, rechts Calcit-Scale.....	33
Abbildung 3.25: EIV-Durchschlag mit Rissbildung an einem Ba/SrSO <sub>4</sub> -Presslings, links Vorderseite, rechts Rückseite.....	33
Abbildung 3.26: Darstellung der Abstandparameter für die Reinigungselektroden.....	35
Abbildung 3.27: Elektrodenanordnung für die Untersuchung des Durchschlages.....	36
Abbildung 3.28: Stoßspannungsquelle für .....Versuchsreihen > 5 J.....	36
Abbildung 3.29: Stoßspannungsquelle für Versuchsreihe mit 50 kV und 5 J.....	36
Abbildung 3.30: Probekörper und Messschriebe (Scale links, Pressling rechts).....	39
Abbildung 3.31: Vergleich der Durchschlagswerte für verschiedene Probekörper.....	40
Abbildung 3.32: Variante 1- Linearführung. Aktive Elektrode rot, Passive Elektrode grün.....	41
Abbildung 3.33: Variante 2 Starres System Aktive Elektrode rot, Isoliermaterial weiß.....	42
Abbildung 3.34: Variante 3 Lamellen, links: Funktionsmuster, rechts: Fertige Konstruktion.....	43
Abbildung 3.35: vereinfachte Lamellenelektrode.....	44
Abbildung 3.36: Löseergebnis an dünnen Scales.....	44
Abbildung 3.37: Aufbau von Gussform und fertiger Probekörper.....	45
Abbildung 3.38: Löseergebnis in betonierten Scales.....	45
Abbildung 3.39: Versuchsaufbau für Versuche außerhalb des Labors.....	46
Abbildung 3.40: Versuchsaufbau auf dem Betriebsgelände des Geothermiekraftwerks.....	47
Abbildung 3.41: Funktionsnachweis an realer Rohrprobe mit unterschiedlichen Impulsparametern.....	48
Abbildung 3.42: Funktionsnachweis des EIV für beide Probekörper.....	49
Abbildung 3.43: Funktionsschema eines kaskadierten Marxgenerators.....	50
Abbildung 3.44: Bauraumaufteilung des Impulsspannungsgenerators.....	51
Abbildung 3.45: Auslegung der Schaltung für eine geeignete Spreizung.....	52
Abbildung 3.46: Stack für weitere Betrachtung.....	54
Abbildung 3.47: Einstufige Stoßspannungsschaltung und Versuchsplan zur Erprobung von Kondensatoren.....	55
Abbildung 3.48: Ergebnisse der Qualifizierungsversuche.....	55
Abbildung 3.49: Erwärmungsverhalten bei 40 Hz.....	56
Abbildung 3.50: Bohrlochkopf einer Förderbohrung [21].....	57
Abbildung 3.51: Aufwältigung mit Coiled tubing [22].....	57
Abbildung 3.52: Aufbau einer Stufe mit MLCC.....	58
Abbildung 3.53: Stufe und Parameter.....	58
Abbildung 3.54: Montage des Prototypen und Aufbau des Funktionstests.....	60

Abbildung 3.55: Endstücke des Gehäuses des Prototyps (Hochspannungsausgang links, Ladespannungsdurchführung rechts) .....	60
Abbildung 3.56: Lösungsvariante für eine ölgefüllte Stoßspannungsquelle.....	61
Abbildung 3.57: Sternelektrode für die Erstellung der Pilotbohrung .....	62
Abbildung 3.58: Funktionstest zum vollflächigen Abtrag an einem vollverschlossenen Rohrstück .....	62
Abbildung 3.59: Lösungsvariante für eine Abbauelektrode für vollflächigen Verschluss, Aktive Elektrode rot, Passive Elektrode blau .....	63
Abbildung 3.60: instationäre Anlage zur Permeabilitätsbestimmung der Zementation .....	64
Abbildung 3.61: Probeneinbau in instationäre Anlage .....	64
Abbildung 3.62: Funktionsschema instationäre Anlage.....	64
Abbildung 3.63: Druckverlauf der zementierten Probekörper 1 und 3 vor und nach dem EIV-Einsatz .....	65
Abbildung 3.64: Aufbau und Spezifikationen des ausgewählten Kabels [23] .....	66
Abbildung 3.65: Schema für eine Greinacher Schaltung.....	67
Abbildung 3.66: Simulationsmodell für die Greinacher Schaltung (Eingangsspannung (rot), Ausgangsspannung (grün) .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Eigenschaften von Mineralen [20] die in Rohren auch als Scale vorliegen können	14
Tabelle 3.2: Eigenschaften natürlich vorkommender Bitumen [20] .....	15
Tabelle 3.3: Überblick vorbehandelte Proben .....	24
Tabelle 3.4: Versuchsergebnisse zur Scale-Züchtung im Labor .....	24
Tabelle 3.5: Versuchsmatrix zum Durchschlag in Abhängigkeit von Amplitude und Energie ....	35
Tabelle 3.6: Einstellparameter für die Generatoren .....	36
Tabelle 3.7: Auswertung Versuchsreihe 50 kV und 5 J.....	37
Tabelle 3.8: Auswertung des vollständigen Versuchsprogramms .....	37
Tabelle 3.9: Vorauswahl geeigneter Kondensatoren .....	54