

Institut für Fördertechnik und Baumaschinen der  
Technischen Universität Dresden

**Untersuchung zur Verfahrens- und Geräteentwicklung für eine  
ökologische Natursteinbearbeitung mit der  
Elektroimpulstechnik**

Kurztitel:  
Elektroimpulsverfahren

Abschlussbericht

gefördert unter dem Az: 21705 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze  
Dipl.-Ing. Erik Anders  
cand. Ing. Tim Beyer

Dresden, Juli 2007

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	4
Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen.....	6
Verzeichnis der verwendeten Symbole.....	7
Zusammenfassung .....	9
1 Einleitung.....	10
2 Wirkungsweise des Elektroimpulsverfahrens .....	11
3 Beschreibung des Versuchsaufbaus .....	14
3.1 Aufbau des Versuchsstands .....	14
3.2 Messsystem .....	18
3.3 Versuchsparameter.....	21
4 Versuchsplan.....	21
4.1 Vergleich der Elektrodenform.....	21
4.2 Einfluss des Elektrodenabstandes .....	22
4.3 Einfluss der Durchschlagsspannung.....	22
4.4 Untersuchung der Vorschubgeschwindigkeit .....	23
5 Versuchsablauf.....	23
6 Durchführung der Experimente .....	24
6.1 Elektrodenform.....	24
6.2 Elektrodenabstand .....	29
6.3 Durchschlagsspannung .....	33
6.4 Vorschubgeschwindigkeit.....	39
6.5 Bestimmung der spezifischen Schnittleistung .....	43
6.6 Untersuchung der Plattenstärke.....	45
6.7 EMV .....	46
6.8 Bewegungssystem.....	47
7 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	48
Fazit.....	51
Literaturverzeichnis.....	53
Anlagen.....	54

## Abbildungsverzeichnis

<b>Bild 1</b> Elektrodenanordnung auf Gestein mit elektrischem Feld, dielektrischem Medium und Streamerentladung .....	11
<b>Bild 2</b> Durchschlagsfestigkeit verschiedener Stoffe als Funktion der Zeit für den Spannungsanstieg bis zum Durchschlag bei einem Elektrodenabstand von 10 mm [7] .....	12
<b>Bild 3</b> Aufbau des Laborprüfstandes .....	14
<b>Bild 4</b> Aufspannungstransformator und Gleichrichterschaltung.....	15
<b>Bild 5</b> Generatöraufbau .....	15
<b>Bild 6</b> Schaltfunkenstrecke .....	16
<b>Bild 7</b> Pumpe ungeschirmt rechts und geschirmt links .....	17
<b>Bild 8</b> Bewegungssystem .....	18
<b>Bild 9</b> Messung der Ladespannung (rechts) und der Stossspannung (links) .....	19
<b>Bild 13</b> Komponenten des Messsystems .....	20
<b>Bild 11</b> Schnittbild a) Vanga Rosso, b) Branco Micaela; Rundstahlelektrode jeweils links, Flachstahlelektrode jeweils rechts .....	28
<b>Bild 12</b> Bearbeitungsspuren auf Branco Micaela, v.l.n.r. 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm ....	31
<b>Bild 18</b> Bearbeitungsspuren auf Vanga Rosso, v.l.n.r. 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm .....	32
<b>Bild 14</b> Rissbildung im Vanga Rosso (links), unkontrolliertes Risswachstum (rechts) .....	33
<b>Bild 15</b> Bearbeitungsspuren mit verschiedenen Durchschlagsspannungen, v.l.n.r. $U_P = 280$ kV, 230 kV, 330 kV .....	36
<b>Bild 16</b> Bearbeitungsspuren mit verschiedenen Durchschlagsspannungen, v.l.n.r. $U_P = 280$ kV, 230 kV; nicht beendeter Schnitt; 330 kV.....	37
<b>Bild 17</b> Bearbeitungsspuren mit $U_P = 230$ kV, 280 kV, 330 kV .....	38
<b>Bild 18</b> Vorschubuntersuchung mit $U_P = 280$ kV auf Branco Micaela, v.l.n.r. $v = 6$ mm/s, 5 mm/s, 4 mm/s, 3 mm/s, 2 mm/s.....	40
<b>Bild 19</b> Vorschubuntersuchung mit $U_P = 230$ kV auf Branco Micaela, v.l.n.r. $v = 6$ mm/s, 5 mm/s, 4 mm/s, 3 mm/s .....	42
<b>Bild 20</b> Schnittergebnis mit Rundstahlelektroden im Sandstein .....	44
<b>Bild 21</b> Plattenstärke Vanga Rosso.....	45

<b>Bild 22</b> Plattenstärke Branco Micaela .....	46
<b>Bild 23</b> Verdrehung der Elektroden durch Querkräfte .....	47
<b>Bild 20</b> Schnittvergleich.....	50

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> Stossspannungsmessung zum Abschnitt Elektrodenform.....	25
<b>Tabelle 2</b> Messergebnisse zum Abschnitt Elektrodenform.....	26
<b>Tabelle 3</b> Überschnitte im Vergleich.....	27
<b>Tabelle 4</b> Stossspannungsmessung zum Abschnitt Elektrodenabstand mit Flachstahl- elektroden und den Elektrodenabständen von 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm.....	29
<b>Tabelle 5</b> Messergebnisse zum Abschnitt Elektrodenabstand .....	30
<b>Tabelle 6</b> Überschnitte in Abhängigkeit des Elektrodenabstands.....	31
<b>Tabelle 7</b> Variationen des Generatorinnendruckes .....	34
<b>Tabelle 8</b> Messergebnisse zum Abschnitt Ladespannung .....	34
<b>Tabelle 9</b> Überschnitte in Abhängigkeit des Generatordruckes.....	39
<b>Tabelle 10</b> Schnittdaten für die Vorschubuntersuchung bei $U_P = 280$ kV .....	40
<b>Tabelle 11</b> Schnittdaten für die Vorschubuntersuchung bei $U_P = 230$ kV .....	41
<b>Tabelle 12</b> Überschnitte in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit .....	42
<b>Tabelle 13</b> Schnittvergleich zu Beginn und am Ende der Versuchsreihen des Branco Micaela .....	50
<b>Tabelle 14</b> spezifische Schnittleistung verschiedener Gesteinsbearbeitungsmaschinen [9] .....	51

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

ca.	zirka
EIV	Elektroimpulsverfahren
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit

## Verzeichnis der verwendeten Symbole

$b_{FI}$	Breite der Flachstahlelektrode	[mm]
$b_P$	Plattenstärke	[mm]
$b_S$	Schnittbreite	[mm]
$C$	elektrische Kapazität	[F]
$C_{KG}$	Kapazität der Kondensatoren im Generator	[F]
$C_{KT}$	Kapazität der Kondensatoren in der Triggerung	[F]
$d_{RE}$	Durchmesser der Rundstahlelektrode	[mm]
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke	[V/m]
$EA$	Elektrodenabstand	[mm]
$\vec{F}$	Kraftwirkung im elektrischen Feld	[N]
$G_{VE}$	Leitwert des VE-Wassers	[ $\mu$ S/cm]
$I$	elektrische Stromstärke	[A]
$n_I$	Anzahl der Impulse	
$n_{IF}$	Anzahl der Fehlimpulse	
$n_{KG}$	Anzahl der Kondensatoren im Generator	
$n_{KT}$	Anzahl der Kondensatoren in der Triggerung	
$P_{el}$	elektrische Leistung	[W]
$p_G$	Druck des Isoliergases im Generator	[bar]
$Q$	elektrische Ladung	[C]
$R$	Lastwiderstand	[ $\Omega$ ]
$s$	Schlagweite der Funkenstrecke	[mm]
$s_{EU}$	Überschnitt	[mm]
$T_1$	Anstiegszeit	[ns]
$T_2$	Durchschlagszeit	[ns]
$t_s$	Schnitttiefe	[mm]
$t_{UE}$	Zeit für einen Bearbeitungsüberlauf	[s]
$t_z$	Triggerfrequenz	[1/s]
$U_L$	Ladespannung	[kV]
$U_{LG}$	Ladespannung des Generators	[V]

$U_{LT}$	Ladespannung der Triggerung	[V]
$U_P$	Durchschlagsspannung	[kV]
$v$	Vorschubgeschwindigkeit	[mm/s]
$W$	elektrische Energie	[Ws]
$W_I$	elektrische Energie eines Impulses	[Ws]
$W_{SG}$	elektrische Energie einer Impulsfolge	[kWh]
$W_{spez}$	spezifische Schnittenergie	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{SD}$	Druckfestigkeit des Gesteins	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\eta$	Wirkungsgrad	

## Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Elektroimpulsverfahrens bezüglich des Einsatzes in der Natursteinbearbeitung wurden die für den Zerstörungsprozess bestimmenden Parameter herausgearbeitet und nach einem aufgestellten Versuchsplan analysiert. Im Mittelpunkt der Versuche standen dabei:

- Elektrodenform
- Elektrodenabstand
- Durchschlagspannung
- Vorschubgeschwindigkeit.

Die Schnittqualität wurde im Vergleich zu den anfänglichen Versuchseinstellungen stark verbessert. Jedoch konnte die Schnittgüte noch nicht erreicht werden, wie sie bei konventionellen mechanischen Werkzeugmaschinen, wie Gattersäge oder Blocksäge, üblich ist. Der Grund dafür ist vor allem in den begrenzten Fähigkeiten des Hochspannungsgenerators und der Anordnung der Elektroden zu sehen.

Es wurde allerdings eine deutliche Einsparung des spezifischen Energiebedarfs festgestellt.

Bei der Fortführung des Projektes müssen daher die Gestaltung der Elektroden und die Verbesserung des Stossspannungsgenerators im Vordergrund stehen.

Die Vorarbeiten zu diesem Forschungsprojekt wurden entsprechend [1, 2, 3, 4] veröffentlicht und auf Tagungen einem Fachpublikum präsentiert. Ebenso wird dieser Abschlussbericht öffentlich zugänglich gemacht.

Das Vorhaben wurde durch die DBU unter dem Az. 21705 – 21/0 gefördert und in Kooperation mit:

- Zeidler & Wimmel Steinbruch- und Steinmetzbetriebe, Kirchheim
- Q-Systems Int AG, Boltersen
- Polytechnische Universität Tomsk, Hochspannungsinstitut
- Steine- und Erden-Industrieverband Sachsen e.V., Dresden

durchgeführt.

Seitens des Instituts für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der TU - Dresden hat es insbesondere bei der Versuchsdurchführung und beim Aufbau der Hochspannungsanlage eine wertvolle Unterstützung gegeben.

## 1 Einleitung

Die Entwicklung des Elektroimpulsverfahrens (EIV) ist auf Forschungen in der ehemaligen Sowjetunion, Mitte des 20. Jahrhunderts, zurückzuführen. Im Zuge wissenschaftlicher Studien und Forschungsaktivitäten wurde das Potential des EIV für die Bearbeitung von Hartgestein entdeckt.

Der Fokus bisheriger Untersuchungen lag auf der Zerstörung und Bearbeitung von Natursteinen mit dem Elektroimpulsverfahren. Deren Resultate flossen in einen konzeptionellen Entwurf einer Tunnelbohrmaschine (TBM) ein, um zu zeigen, wie das EIV in eine praktische Anwendung übertragen werden kann [4, 5].

Konventionellen Technologien zur Natursteinbearbeitung sind in durch hohen Werkzeugverschleiß, intensive Geräusch-, Staub- und Schadstoffemission, hohen Primärenergieverbrauch und starre unflexible Maschinensysteme gekennzeichnet.

Als Beispiele für die herkömmlichen Werkzeuge zur Natursteinbearbeitung werden an dieser Stelle Pendelgattersäge, Brückensäge und Trennsäge genannt.

Durch das EIV werden diese negativen Eigenschaften beseitigt. Damit sich der Einsatz dieses neuen und innovativen Verfahrens bei der Bearbeitung von Natursteinen ökonomisch und ökologisch sinnvoll gestaltet, müssen die Prozessparameter so gewählt werden, dass ein Schnittergebnis mit einer Güte, vergleichbar den konventionellen Technologien, erzielt wird. Dieses ist charakterisiert durch eine kleine, gleichmäßig verlaufende Schnittfuge mit minimalem Materialabtrag an den Schnittflächen und –kanten.

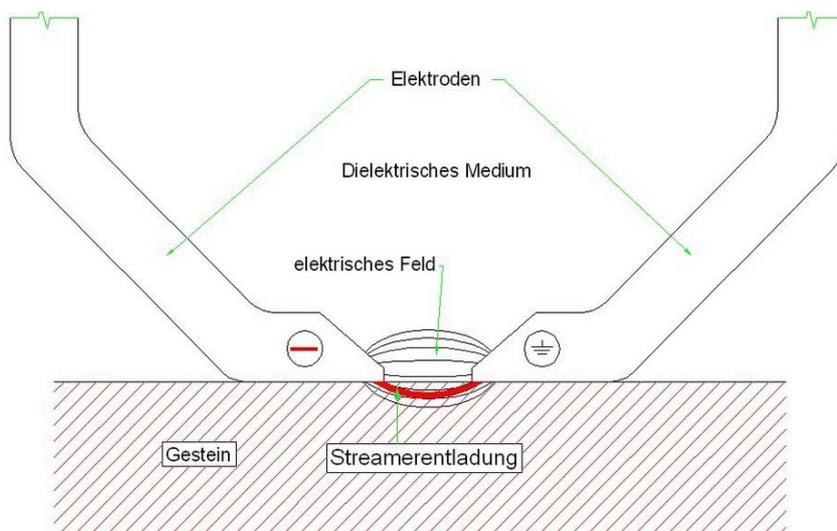
Zur Umsetzung dieser Zeile erfolgen die Entwicklung und der Aufbau eines Versuchsstandes an dem Versuche zur Natursteinbearbeitung mittels EIV durchgeführt werden.

Die Entwicklung des Versuchsstandes beinhaltet den Bemessung, Fertigung und Inbetriebnahme der elektrischen, mechanischen und mechatronischen Komponenten. Anschließend werden diese Komponenten zusammengeführt und montiert. Nach ausführlichen Tests und der Bestimmung der Prozessparameter wird mit den Versuchen begonnen.

## 2 Wirkungsweise des Elektroimpulsverfahrens

Das Arbeitswerkzeug zur Verrichtung der Lösearbeit ist eine Streamerentladung, die sich zwischen zwei Elektroden unterschiedlichen elektrischen Potentials ausbildet. Der Potentialunterschied, zwischen den beiden Elektroden, wird durch eine hohe gleichgerichtete, negative Blitzstoßspannung an der Potentialelektrode und dem Erdpotential der passiven Elektrode hervorgerufen. Durch die äußerst hohe Konzentration des Energieimpulses und der schlagartigen Ausdehnung des Streamers (Plasma) werden erhebliche Zerreisspannungen im Festkörper erzeugt, die zu einem Spröbruch und damit zum Materialabtrag führen. Trotz der hohen Temperaturen im Durchschlagskanal sind keine thermischen Einflüsse auf das Gestein nachweisbar [6].

Eine stark vereinfachte Darstellung der Elektrodenanordnung auf dem Gestein, mit elektrischem Feld und Streamerentladung, ist in Bild 1 abgebildet.



**Bild 1** Elektrodenanordnung auf Gestein mit elektrischem Feld, dielektrischem Medium und Streamerentladung

Ein Materialabtrag findet nur statt, wenn die Entladung durch das Gestein erfolgt. Dafür sind das Aufliegen der Elektroden auf dem zu bearbeitenden Gestein und ein den Prozessraum umhüllendes dielektrisches Medium (Isolator) erforderlich. Dieses dielektrische Medium muss dabei eine höhere elektrische Festigkeit (Durchschlagsfestigkeit) aufweisen, als das zu bearbeitende Gestein. Unter dem Begriff elektrischer Festigkeit ist der Wider-

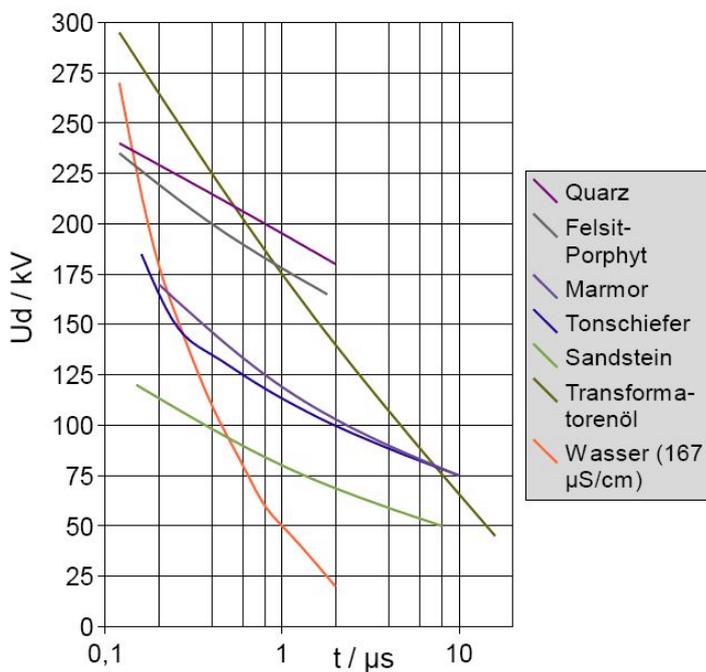
stand zu verstehen, den ein Stoff einer elektrischen Belastung entgegensetzt. Je höher die elektrische Festigkeit eines Stoffes ist, desto größere elektrische Belastungen sind notwendig, um einen Durchschlag durch ihn hindurch zu erzeugen.

Im Allgemeinen gilt, dass die elektrische Festigkeit von Feststoffen größer ist, als die von Flüssigkeiten und diese ist wiederum größer, als die elektrische Festigkeit von Gasen.

Eine Ausnahme bilden hier einige Flüssigkeiten, deren elektrische Festigkeit sich in Abhängigkeit von der Spannungsexposition verändern.

Bei hinreichend kleinen Spannungsexpositionen steigt die elektrische Festigkeit einiger Flüssigkeiten rapide an und übertrifft jene von festen Nichtleitern und Felsgestein (Bild 2). Diese Eigenschaft ermöglicht ihren Einsatz als dielektrisches Medium beim Elektroimpulsverfahren.

Darüber hinaus wirken Flüssigkeiten als selbstheilende Isolatoren. Ein erfolgter Durchschlag hinterlässt immer einen leitfähigen Kanal, der den darauf folgenden Durchschlag begünstigt. In Fluiden können diese Kanäle oder Spuren weggespült, verdünnt oder entionisiert werden, wodurch die Isolationswirkung wieder hergestellt wird.



**Bild 2** Durchschlagsfestigkeit verschiedener Stoffe als Funktion der Zeit für den Spannungsanstieg bis zum Durchschlag bei einem Elektrodenabstand von 10 mm [7]

Für die Versuche wird vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) als dielektrisches Medium verwendet. Die zu bearbeitenden Gesteinsproben, zwei Hartgesteine, sind die beiden Granitsorten Branco Micaela und Vanga Rosso mit einer Druckfestigkeit von  $\sigma_{SD} = 213 \text{ N/mm}^2$  [8].

Durch den Potentialunterschied der Elektroden baut sich zwischen ihnen ein elektrisches Feld auf und führt zur Ionisation der Prozessumgebung (Gestein und VE-Wasser).

Ionisation (Feldionisation) heißt, es werden Ladungsträger durch ein hinreichend starkes elektrisches Feld aus ihrer Bindung gelöst. Durch die Kraftwirkung innerhalb des elektrischen Feldes werden die Ladungsträger zur Bewegung angeregt, kollidieren mit anderen neutralen Teilchen und schlagen dabei wieder neue Ladungsträger aus ihrer Bindung heraus. Die nun eingetretene und durch die Kraftwirkung begünstigte Stoßionisation lässt die Zahl der freien Ladungsträger sehr schnell ansteigen. Es wird hier von einer Lawinenentladung gesprochen.

Die Zündbedingung ist erfüllt, wenn  $10^8$  freie Ladungsträger vorhanden sind. Es kommt zur Streamerentladung zwischen den beiden Elektroden. Unter der Annahme eines ausreichend schnellen Feldaufbaus und der damit verbundenen höheren Durchschlagsfestigkeit des dielektrischen Mediums, wird dieses weniger stark ionisiert. Der Ort der größten Ladungsträgerkonzentration befindet sich demnach im Gestein. Die Entladung erfolgt durch den festen Nichtleiter.

Die im Versuch eingesetzten Elektroden bestehen aus einfachem Baustahl und liegen nur locker auf dem Gestein auf.

Aus diesem Grundprinzip des Elektroimpulsverfahrens lassen sich folgende Vorteile gegenüber den konventionellen Bearbeitungsverfahren ableiten:

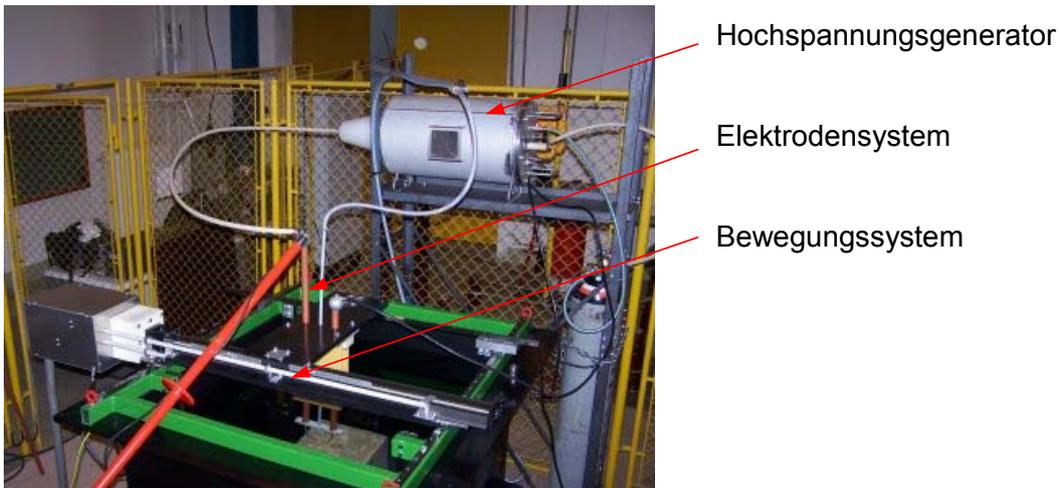
- geringe Geräusentwicklung
- Staubfreiheit
- alle nichtleitenden Gesteine bearbeitbar
- preiswertes Werkzeug
- geringer Werkzeugverschleiß.

### 3 Beschreibung des Versuchsaufbaus

#### 3.1 Aufbau des Versuchsstands

Grundsätzlich lässt sich der Aufbau des Versuchstands in folgende Komponenten einteilen (Bild 3):

- Energieversorgung
- Aufspannungstransformator
- Hochspannungstransformator
- Triggerung
- Elektrodensystem
- Wasserführung
- Bewegungssystem
- Messsystem.

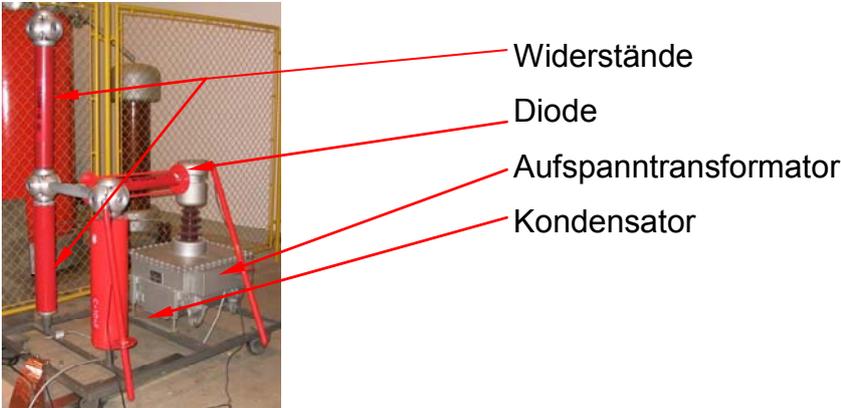


**Bild 3** Aufbau des Laborprüfstandes

Die Energieversorgung der Triggerung, des Pumpensystems und des Messsystems erfolgt durch 230 V Wechselspannung. Der Aufspannungstransformator wird mit 380 V Wechselspannung versorgt. Beide Spannungen werden an einem Schaltschrank abgegriffen.

Über ein manuell zu bedienendes Potentiometer wird die Eingangsspannung des Transformators in eine Wechselspannung zwischen 0 kV und 30 kV transformiert. Diese wiederum wird mit der Gleichrichterschaltung, bestehend aus Kondensator, Widerständen

und Diode, in eine wellige Gleichspannung umgewandelt. Die Anordnung der Gleichrichterschaltung und der Aufspanntransformator sind in Bild 4 zu sehen.



**Bild 4** Aufspannungstransformator und Gleichrichterschaltung

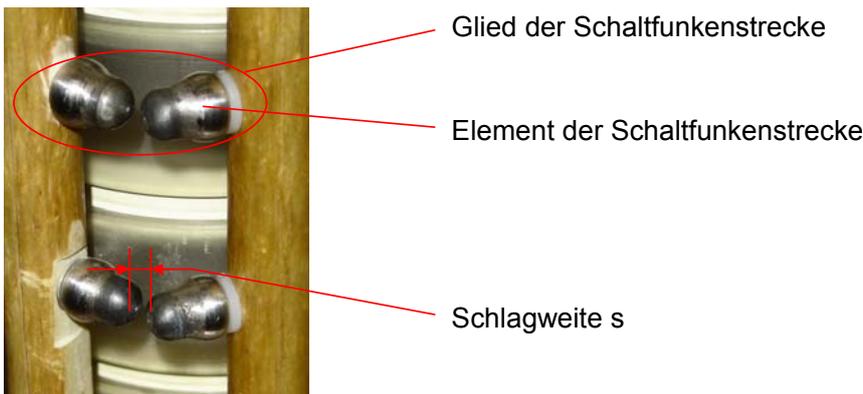
Die von der Gleichrichterschaltung transformierte Spannung wird zum Hochspannungsgenerator geleitet. Der Generator besteht aus zehn Kondensatoren, in Kaskadenschaltung, mit dazugehörigen Ladewiderständen, Leitungsmaterial und dem Generatorgehäuse (Bild 5). Mit der am Generatoreingang anliegenden Ladespannung ( $U_L = 0 \text{ kV bis } 30 \text{ kV}$ ), können die Kondensatoren parallel geladen werden. Die Entladung erfolgt dann über eine Reihenschaltung, so dass sich die einzelnen Kondensatorspannungen zur Gesamtspannung am Generatorausgang addieren.



**Bild 5** Generatöraufbau

Durch die Reihentladung sind kurze Anstiegszeiten der Spannungen realisierbar, die einen schnellen Feldaufbau zur Folge haben, damit die Durchschlagsfestigkeit des VE - Wassers, die des Gesteins übersteigt.

Das Durchzünden der Funkenstrecke, wie sie in Bild 6 zu sehen ist, wird durch einen Spannungsimpuls von 18 kV gesteuert. Dieser wird mit einer Frequenz von  $t_z = 1/s$  von der Triggerung abgegeben.



**Bild 6** Schaltfunkenstrecke

Der Impuls der Triggerung verursacht am ersten Glied der Funkenstrecke einen Funkenüberschlag, der die Schlagweite  $s$  überwindet und eine elektrisch leitende Verbindung zwischen den beiden Gliedern herstellt. Der erste Kondensator wird entladen. Dessen Spannung liegt dann am zweiten Element der Funkenstrecke an und verursacht dort ebenfalls einen Spannungsüberschlag. Dieser Prozess setzt sich, in nur wenigen Nanosekunden, durch die gesamte Funkenstrecke fort. Danach liegt die Gesamtspannung am Generatorausgang an.

Durch eine zu hohe Ladespannung ist ein selbsttätiges Zünden der Funkenstrecke möglich. Um diese Selbstzündung zu vermeiden, sind die Elemente der Funkenstrecke durch die Schlagweite  $s$  voneinander entfernt. Zusätzlich wird der Generator mit einem Isoliergas (hier Stickstoff bis 8,6 bar) befüllt.

Über ein Einleiterkabel wird die Spannung vom Generator an die Potentialelektrode (aktive Elektrode) weitergeleitet. Es kommt im Prozessraum um die Elektroden zu den bereits beschriebenen Ionisierungsprozessen, den darauf folgenden Durchschlag durch das Festgestein und die damit verbundene Verrichtung von Lösearbeit.

Nach erfolgtem Durchschlag bricht das elektrische Feld wieder zusammen. Die Kondensatoren sind zu diesem Zeitpunkt vollständig entladen. Durch den Zusammenbruch des elektrischen Feldes sinkt die Kraftwirkung auf die Ladungsträger. Der Ionisierungsprozess kommt zum Erliegen, die Anzahl freier Ladungsträger nimmt ab und der Streamer erlischt. Das Umgebungsmedium (VE-Wasser) entionisiert sich über den Selbstheilungsprozess:

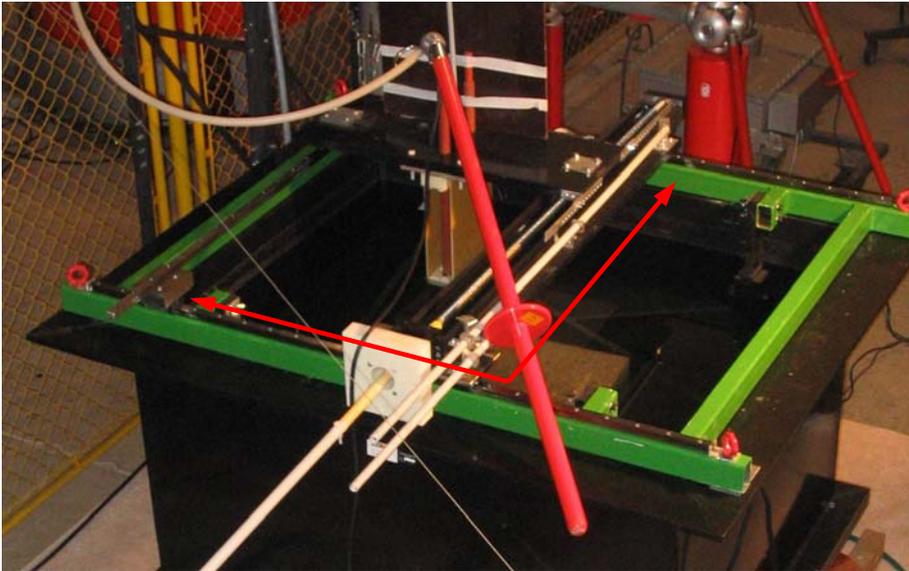


Um geladene Teilchen und gelöstes Gestein rasch zu entfernen, wird ständig gefiltertes VE-Wasser in den Prozessraum zwischen den Elektroden gepumpt. Dafür steht eine seriengefertigte Pumpe zur Verfügung. Sie entnimmt VE-Wasser aus dem Wasserbecken, säubert es über drei Filterstufen von groben Verschmutzungen und fördert es gereinigt wieder in den Prozessraum. Die Spülwasserpumpe wird mit einer Schirmung versehen, um die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Pumpe zu erhöhen (Bild 7). Unter elektromagnetischer Verträglichkeit wird die Eigenschaft eines elektrischen Gerätes verstanden, zum einen nicht durch eigene Emissionen andere Geräte zu stören und zum anderen aber auch die Fähigkeit, trotz der Anwesenheit fremder Störsignale zufriedenstellend zu funktionieren.



**Bild 7** Pumpe ungeschirmt rechts und geschirmt links

Für die Realisierung der Quer- und Längsbewegungen des Elektrodenhalters mit den Elektroden ist dieser auf ein Linearführungssystem mit Flanschswagen montiert (Bild 8). Der konstante Vorschub des Elektrodenhalters in der Versuchsphase erfolgt durch Handbetrieb.



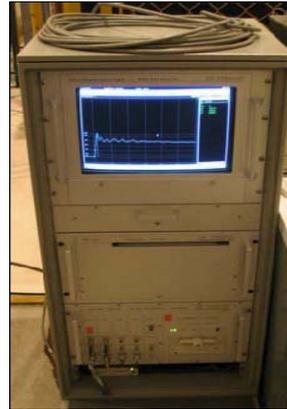
**Bild 8** Bewegungssystem

### 3.2 Messsystem

Das Messsystem diente zur Erfassung der Eigenschaften der Entladungen und weiterer Größen, die den Elektroimpuls-Prozess beeinflussen und die Randbedingungen darstellen. Zu den Impulseigenschaften zählen:

- Durchschlagsspannung
- Anstiegszeit der Durchschlagsspannung
- Durchschlagszeit der Durchschlagsspannung
- Höhe der Ladespannung.

Die Messanlagen zur Ermittlung der Ladespannung und die Stoßspannungsanlage sind in Bild 9 abgebildet.



**Bild 9** Messung der Ladespannung (rechts) und der Stossspannung (links)

Die Ladespannung wurde sowohl zur Stoßspannungsmessung als auch während der laufenden Versuche gemessen. Sie hat eine große Bedeutung für den Durchschlagsprozess, denn die Höhe der Ladespannung hat direkten Einfluss auf die Entwicklung der Durchschlagsspannung. Das heißt, dass eine konstante Ladespannung eine gleich bleibende Durchschlagsspannung bewirkt. Geringfügige Schwankungen der Durchschlagsspannung resultieren aus dem Schwingverhalten des elektromagnetischen Schwingkreises, welcher sich aus den im Versuchstand verbauten Induktivitäten (Leiterschleifen) und Kapazitäten (Kondensatoren) ergab.

Weiterhin dient die Ladespannung als Kontrollgröße für die Funktionsfähigkeit des Generators während der Versuchsdurchführung. Eine plötzlich eintretende Veränderung der Ladespannung, die nicht auf eine Verstellung des Potentiometers zurückzuführen ist, gilt als Indikator für eine Schädigung des Generators.

Die Durchschlagsspannung, die Anstiegs- und Durchschlagszeit wurden vor den jeweiligen Versuchsreihen ermittelt. Aufgrund des hohen Stoßspannungswertes (z.B. 360 kV) konnte die Stossspannungsmessanlage nicht direkt an die Elektroden angeschlossen werden. Um den Betrag der Spannung auf einen geeigneten Wert zu verkleinern wurde ein Spannungsteiler mit entsprechenden Widerständen zwischen der Anlage und den Elektroden geschaltet.

Die gewonnen Messwerte lieferten eine Aussage darüber, ob die Entladungen für einen Gesteinsdurchschlag geeignet waren und bei welcher Spannung dieser erfolgte.

Die Messwerte zur Kontrolle der Umgebungsparameter wurden in regelmäßigen Abständen aufgenommen.

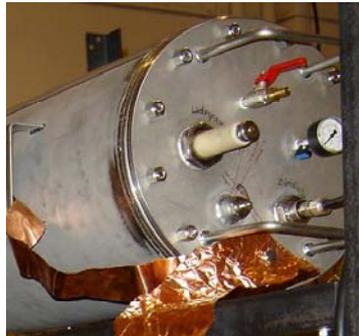
Dazu gehören:

- der Generatorinnendruck,  $p_G$
- der Leitwert des VE-Wassers,  $G_{VE}$
- der Lastwiderstand der Elektrodenkonfiguration,  $R$ .

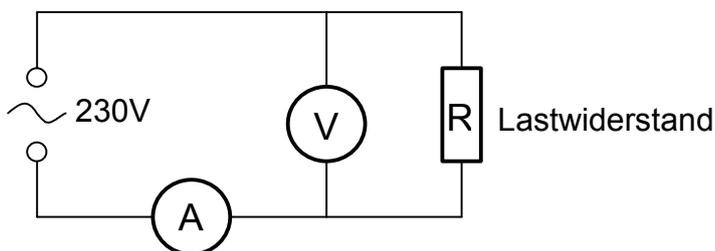
Auch hier gilt, dass gleichbleibende Umgebungsbedingungen vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Ermittlung des Leitwertes des VE-Wassers erfolgte durch ein Leitwertmessgerät (Bild 10a)). Eine Veränderung des Leitwertes beeinflusst den Lastwiderstand des Systems. Dieser setzt sich aus der Summe der Einzelwiderstände des VE-Wassers, der Widerstände der Elektroden und des Gesteins zusammen. Der Generatorinnendruck wird über ein analoges Manometer bestimmt (Bild 10c)). Für die Ermittlung des Lastwiderstandes wurden der Strom und die anliegende Spannung mit einem Digital-Multimeter gemessen (Bild 10b)).



a) Leitwertmessgerät



b) Manometer



c) Schaltung zur Bestimmung des Lastwiderstandes

**Bild 10** Komponenten des Messsystems

### 3.3 Versuchsparameter

Aus der Wirkungsweise des EIV werden die prozessbestimmenden Parameter abgeleitet und in einem Versuchsplan zusammengefasst.

Für die Untersuchung der Einflussmöglichkeiten werden Parameter messtechnisch untersucht, die an dem vorhandenen Versuchstand gut reproduzierbare und zuverlässige Ergebnisse gewährleisten.

Folgende Parameter werden bei den Experimenten untersucht:

- Elektrodenform
- Elektrodenabstand
- Ladespannung (Energiegradient)
- Vorschubgeschwindigkeit.

Die Abstufung der einzelnen Prozessparameter wird dabei hinreichend groß gewählt, um den Einfluss auf das Messergebnis möglichst deutlich herauszuarbeiten.

## 4 Versuchsplan

### 4.1 Vergleich der Elektrodenform

Bei diesem Versuch werden Flachstahlelektroden der Breite  $b_{FL}$  und Rundstahlelektroden mit dem Durchmesser  $d_{RE}$  verwendet. Weiterhin wird der Einfluss der Elektrodenform auf den Überschneidung untersucht. Dieser ergibt sich aus der Differenz der Schnittbreite  $b_S$  und der Breite jeweiligen Elektrode.

$$s_{EU} = b_S - b_{FL} \quad (4.1)$$

$$s_{EU} = b_S - d_{RE} \quad (4.2)$$

Bei Einsatz der Flachstahlelektrode wird eine kleinere Schnittbreite erwartet, da sie mit  $b_S = 3 \text{ mm}$  eine geringere Materialstärke im Vergleich zur Rundstahlelektrode mit  $d_{RE} = 8 \text{ mm}$  hat. Die Rundstahlelektrode weist einen deutlich größeren Materialquerschnitt

auf als die Flachstahlelektrode. Während des Schnittprozesses ist der Streamer bestrebt, sich im näheren Umfeld der Elektroden auszubilden, um den Potentialausgleich herzustellen. Das bedeutet, dass der Streamer bei breiteren Elektroden in einem größeren Raum ausgebildet werden kann. Die größere Schnittbreite, wird demzufolge mit den breiteren Rundstahlelektroden erwartet.

## **4.2 Einfluss des Elektrodenabstandes**

Der Elektrodenabstand beeinflusst das Widerstandsverhalten des Versuchsaufbaus und somit auch auf das Zeitverhalten und die Durchschlagsspannung. Für diesen Versuch werden die besseren Schnittergebnisse mit den kleineren Elektrodenabständen, also eine geringere Schlagweite, prognostiziert. Der Streamer bildet hier nur einen relativ kurzen Durchschlagskanal aus. Auf diese Weise sollen kleinere Materialstücken aus dem Gestein gelöst werden, was zu einer geringeren Zerklüftung der Schnittflächen führen soll. Die Versuche werden mit den Elektrodenabständen 6 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm durchgeführt.

Bedingt durch die konstruktive Ausführung des Versuchsaufbaus mit der Komponente Elektrodenhalter, sind Versuche mit Elektrodenabständen kleiner als 6 mm nicht möglich. Es besteht hier die Gefahr, dass sich die beiden Elektroden berühren und einen Kurzschluss des Hochspannungsgenerators verursachen.

## **4.3 Einfluss der Durchschlagsspannung**

Eine höhere Durchschlagsspannung bewirkt eine größere Kraftwirkung des elektrischen Feldes, was die Bildung eines energiestärkeren Streamers zur Folge hat. Dadurch soll die Schnittfuge tiefer und breiter werden, weil mehr Material aus dem Gefüge gelöst wird. Damit einhergehend ist zu erwarten, dass die Schnittflächen und -kanten wesentlich rauer werden und merklich mehr Abplatzer oder Zerklüftungen aufweisen, als bei den Schnitten mit einer geringeren Durchschlagsspannung.

Dazu wird die Durchschlagsspannung im Intervall von 50 kV (330 kV → 280 kV → 230 kV) gesenkt.

#### **4.4 Untersuchung der Vorschubgeschwindigkeit**

Es wird erwartet, dass die Experimente mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit  $v$  ein besseres Schnittbild hervorbringen, auch wenn für die Ausbildung eines ausreichend bewertbaren Schnittes mehr Überläufe notwendig sein werden.

Das gelöste Volumen wird bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten geringer sein, als bei langsamen Vorschüben. Der Grund dafür ist, dass die Wirkräume der Entladungen weiter von einander entfernt sind. Die Vorschädigungsprozesse und Zerstörprozesse können sich so nicht bündeln. Es werden fünf verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten untersucht  $v = 6 \text{ mm/s}$ ,  $5 \text{ mm/s}$ ,  $4 \text{ mm/s}$ ,  $3 \text{ mm/s}$ ,  $2 \text{ mm/s}$ .

Es wird die Anzahl an Überfahrten durchgeführt, bis bei allen Einstellungen ein ausreichend bewertbares Schnittergebnis vorliegt.

#### **5 Versuchsablauf**

Als Versuchsmaterial für die Experimente stehen die beiden Granitsorten Branco Micaela (grau) und Vanga Rosso (rot), sowie VE-Wasser als Dielektrikum zur Verfügung. Die beiden Gesteinsorten befinden sich gleichzeitig im Wasserbecken, um gleiche Versuchsbedingungen, wie zum Beispiel elektrischer Leitwert oder die Verschmutzung des Wassers zu gewährleisten. Die Gesteine werden nacheinander bearbeitet.

Es werden pro Gestein 20 Überfahrten verteilt auf 5 Abschnitte durchgeführt. Die Ausnahme bilden die Versuche zur Vorschubgeschwindigkeit. Bei diesen Experimenten werden so viele Überfahrten durchgeführt, bis ein Schnittergebnis vorliegt, dass eine Beurteilung der Güte erlaubt.

Zu Beginn jeder Versuchsreihe, werden die notwendigen Parameter eingestellt. Dazu gehören die Ladespannung, die Montage der zu untersuchenden Elektroden und der Elektrodenabstand. Zudem wird vor jeder Versuchsreihe eine Stoßspannungsmessung durchgeführt, der Lastwiderstand des Versuchsaufbaus ermittelt und der Leitwert des VE-Wassers bestimmt.

Die Änderung der Ladespannung des Systems erfolgt durch die Anpassung des Gasdruckes im Generator. Ein höherer Gasdruck ermöglicht einer größere Ladespannung und

damit auch eine größere Durchschlagsspannung. Die eingestellte Ladespannung und Durchschlagsspannung wird nach jeder Änderung kontrolliert.

Die während der Versuche aufgenommenen Messwerte, die zu Beurteilung der jeweiligen Parametereinflüsse geeignet sind, werden nachfolgend zusammengefasst:

- spezifischer Leitwert des VE-Wassers;  $G_{VE}$
- Ladespannung;  $U_L$
- Durchschlagsspannung;  $U_P$
- Impulsanzahl;  $n_I$
- Fehlimpulsanzahl;  $n_{IF}$
- Überlaufzeit;  $T_{UE}$ .

Nach der Bearbeitung der Gesteinsprobe werden diese aus dem Wasserbecken gehoben und die Schnitte an fünf Punkten vermessen. Extremwerte werden dabei nach Möglichkeit nicht berücksichtigt. Anschließend wird aus den gewonnenen Schnittdaten ein Mittelwert gebildet.

Da die Betrachtung der Geometrie des Schnittes allein nicht genügt, wird eine visuelle Bewertung des Schnittbildes vorgenommen. Dabei stehen die Kontur der Schnittkanten, die Anzahl an Ausbrüchen von großen Gesteinsbrocken und die Gestalt des Fugengrundes im Mittelpunkt.

## **6 Durchführung der Experimente**

### **6.1 Elektrodenform**

Für diesen Versuch wurden jeweils nur 12 Überfahrten pro Gestein durchgeführt, da das Schnittbild die Erwartungen eindeutig bestätigte. Anhand der Messergebnisse für die Schnittgeometrie, ist es ersichtlich, dass das Schnittergebnis bei sonst gleichen Systemparametern von der Elektrodenform abhängig ist.

Tabelle 1 zeigt die Einstellungen mit denen die Versuche durchgeführt wurden.

	<b>Elektrodenform</b>	<b>Rundstahlelektrode</b>	<b>Flachstahlelektrode</b>
<b>Branco Micaela</b>	Ladespannung [kV]	30,3	33,0
	Durchschlagsspannung [kV]	284,5	300,3
	ohmscher Widerstand der Elektroden [ $\Omega$ ]	14709	16719
	Anstiegszeit [ns]	93	95
	Durchschlagszeit [ns]	109	106
<b>Vanga Rosso</b>	Ladespannung [kV]	30,4	29,9
	Durchschlagsspannung [kV]	280,2	268,3
	ohmscher Widerstand der Elektroden [ $\Omega$ ]	8894	9407
	Anstiegszeit [ns]	100	92
	Durchschlagszeit [ns]	112	104

**Tabelle 1** Stossspannungsmessung zum Abschnitt Elektrodenform

Die Ergebnisse der Untersuchung der Elektrodenform sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Bearbeitungsüberfahrten mit der Rundstahlelektrode verursachten bei dem roten Granit, Vanga Rosso, eine durchschnittliche Schnitttiefe von 19,9 mm. Die durchschnittliche Schnitttiefe der Flachstahlelektrode beträgt 10,8 mm. Der Vergleich der Schnittbreite zeigt, dass die Rundstahlelektrode mit 20,5 mm die Schnittbreite der Flachstahlelektrode von 15,2 mm überschreitet.

Die Schnittergebnisse auf dem grauen Granit, Branco Micaela, zeigen, dass die Bearbeitung mit der Flachstahlelektrode einen Schnitt erzeugt, der in seiner Breite und Tiefe geringer ist als der Schnitt durch die Rundstahlelektroden. Dieses Ergebnis entspricht den in Abschnitt 4.1 Vergleich der Elektrodenform getroffenen Aussagen.

Einen Einfluss auf die Anzahl von Fehlimpulsen konnte nicht festgestellt werden. Bei dem Versuch mit der Rundstahlelektrode lag der Fehlzündanteil bei 5,1 % und 5,9 %. Die Flachstahlelektrode verursachte einen Fehlzündanteil von 3,7 % und 4,3 %.

	<b>Gesteinsart</b>	<b>Rundstahlelektrode</b>	<b>Flachstahlelektrode</b>
Branco Micaela	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	3,2	4,5
	Impulszahl	1265	1590
	Fehlimpulse	64	50
	prozentualer	5,1	3,7
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>15,7</b>	<b>9,5</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>20,7</b>	<b>15,4</b>
Vanga Rosso	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	4,2	4,6
	Impulszahl	1285	1240
	Fehlimpulse	76	53
	prozentualer	5,9	4,3
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>19,9</b>	<b>10,8</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>20,5</b>	<b>15,2</b>

**Tabelle 2** Messergebnisse zum Abschnitt Elektrodenform

Bei der Betrachtung des Querschnittes (Tabelle 3) ist festzustellen, dass die Flachstahlelektroden einen größeren Querschnitt verursachen. Ursächlich für dieses Ergebnis ist die gestiegene elektrische Leistung der Elektrodenkonfiguration mit Flachstahl. Die Durchschlagsspannung war hier zwar mit 280,2 kV niedriger als die der Rundstahlelektroden, doch der Elektrodenwiderstand wies einen wesentlich kleineren Wert auf. Da die Flachstahlelektrode eine wesentlich größere Manteloberfläche besitzt, wird der an der Oberfläche fließende Strom weniger behindert. Die Stoßionisation wird begünstigt und es erfolgt ein schnellerer Feldaufbau. Der Streamer ist energiereicher und kann damit mehr Material aus dem Gefüge lösen.

$$I = \frac{U_P}{R} \quad (6.1)$$

$$Q = \int_t I(t) dt \quad (6.2)$$

aus (6.1) und (6.2) ergibt sich:

$$W = Q \cdot U_p \quad (6.3)$$

	<b>Rundstahlelektrode</b>	<b>Flachstahlelektrode</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	12,7 mm	12,4mm
Vanga Rosso (roter Granit)	12,5 mm	13,2 mm

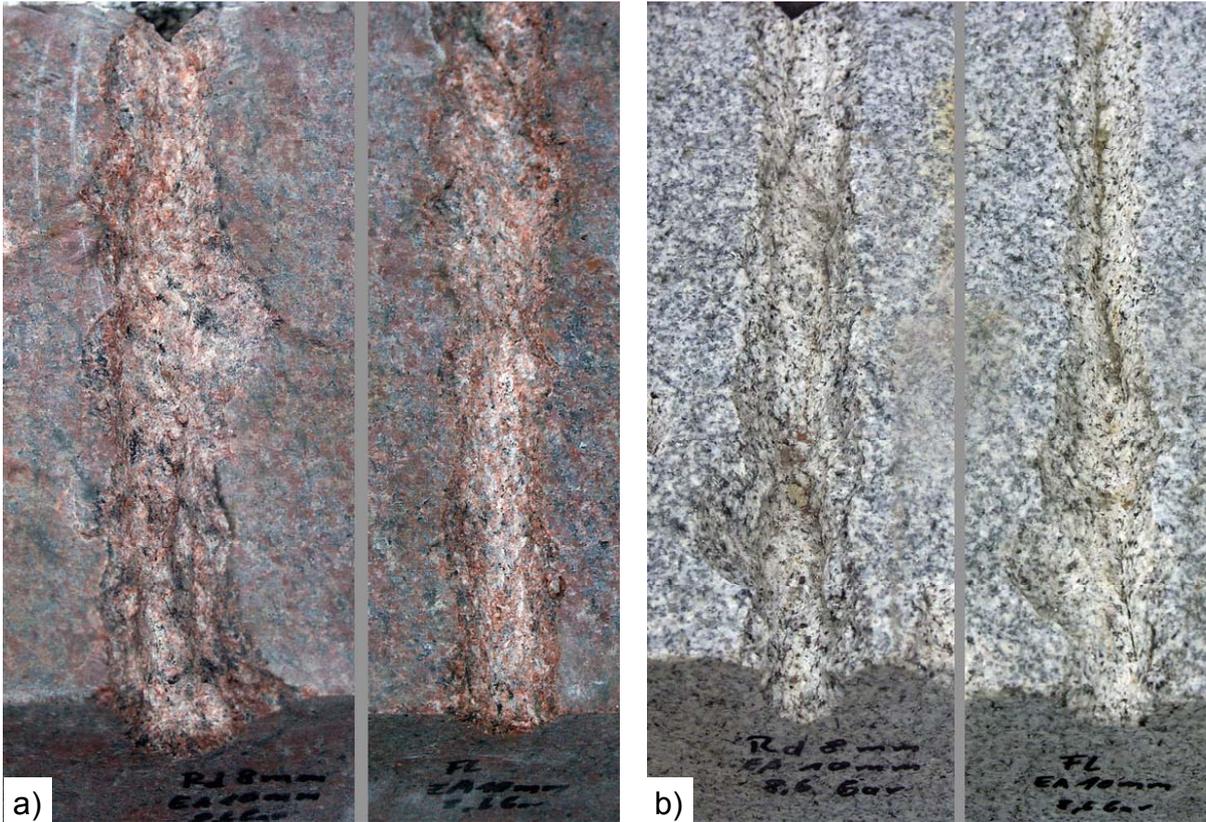
**Tabelle 3** Überschnitte im Vergleich

Auch eine Verschiebung der Elektroden gegeneinander spielt eine Rolle bei der Bildung des Überschnittes. Es besteht die Möglichkeit, dass eine Elektrode an der Schnittfuge des Gesteins hängen bleibt und sich durch die Vorschubkraft relativ zu der zweiten Elektrode verschiebt. Dadurch erstreckt sich der Durchschlagskanal über einen breiteren Bereich und löst mehr Gestein.

Die Betrachtung der Bearbeitungsspur des Granit Vanga Rosso (Bild 11 a)) zeigt eine erkennbar breitere Schnittkontur. Die groben Materialausbrüche in der Mitte der Bearbeitungsspur ist auf ein Verklemmen der Elektroden und dem darauf folgendem Freisprengen zurückzuführen.

Trotz des nahezu gleichen Überschnitts, der mit der Flachstahlelektrode erreicht wurde, ist die Bearbeitungsspur von besserer Qualität. Sie zeigt eine geringere Stufenbildung am Schnittgrund und weniger Abplatzer und Ausbrüche an den Schnittkanten.

Im Bild 11 b) sind die Bearbeitungsspuren des Granits Branco Micaela abgebildet. Beide Schnitte zeigen im unteren Drittel deutliche Ausbrüche an der linken Schnittkante, die das bereits erwähnte Verklemmen der Elektroden als Ursache haben. Es ist zu erkennen, dass die Bearbeitungsspur durch die Rundstahlelektrode deutlich breiter ist, als die der Flachstahlelektrode. Hierbei ist wiederum der Schnitt mit der Flachstahlelektrode von weniger groben Materialausbrüchen gekennzeichnet, doch die Differenzierung zwischen den beiden Elektroden fällt in diesem Fall nicht so deutlich aus, wie beim Vanga Rosso.



**Bild 11** Schnittbild a) Vanga Rosso, b) Branco Micaela; Rundstahlelektrode jeweils links, Flachstahlelektrode jeweils rechts

Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen aus der Vorbetrachtung. Die Schnittfugen mit den Flachstahlelektroden sind deutlich schmaler, weisen jedoch noch grobe Ausbrüche auf. Dies ist ein Hinweis darauf, dass noch keine ideale Einstellung der Prozessparameter gefunden wurde.

Jedoch bedeuten die besseren Schnittgüten, der Schnitte mit Flachstahlelektroden, dass diese Elektrodenform für den weiteren Einsatz besser geeignet ist.

## 6.2 Elektrodenabstand

Durch eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Elektrodenabstands werden der ohmsche Widerstand der Elektrodenkonfiguration und somit der Feldaufbau, die Anstiegs- und Durchschlagszeiten der Spannungen und schließlich die Höhe der Durchschlagsspannung verändert.

In Tabelle 4 sind die Werte der Stoßspannungsmessung beider Gesteine dargestellt. Mit zunehmendem Elektrodenabstand steigt der ohmsche Widerstand für beide Gesteinsorten an. Eine gleiche Tendenz ist für die Anstiegs- und Durchschlagszeiten, sowie der Durchschlagsspannung zu erkennen.

	<b>Elektrodenabstand [mm]</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	Ladespannung [kV]	25,7	25,6	26,8	27,5
	Durchschlagsspannung [kV]	267,4	286,4	280,2	295,4
	ohmscher Widerstand der Elektroden [ $\Omega$ ]	2625	2503	3500	3391
	Anstiegszeit [ns]	95	103	100	108
	Durchschlagszeit [ns]	106	116	112	112
Vanga Rosso (roter Granit)	Ladespannung [kV]	27,5	27,0	27,4	27,5
	Durchschlagsspannung [kV]	273,6	284,4	268,3	292,9
	ohmscher Widerstand der Elektroden [ $\Omega$ ]	2813	2566	3754	3445
	Anstiegszeit [ns]	96	96	92	102
	Durchschlagszeit [ns]	100	107	104	117

**Tabelle 4** Stosspannungsmessung zum Abschnitt Elektrodenabstand mit Flachstahlelektroden und den Elektrodenabständen von 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm

Tabelle 5 fasst die gemessenen Werte nach den Bearbeitungsüberläufen zusammen. Anhand der Werte für den Granit Branco Micaela ist zu erkennen, dass mit größerem Abstand der Elektroden auch ein tieferes Schnittergebnis erzielt wird. Die Schnitttiefe, die bei einem Elektrodenabstand (EA) von 6 mm etwa 8 mm beträgt, erreicht bei EA = 12 mm bereits 20 mm. Der Überlauf mit der Einstellung EA = 10 mm verursachte den höchsten Wert für die Schnittbreite mit 24,3 mm.

Die Schnittbreite nimmt bei diesem Versuch ebenfalls mit größerem Elektrodenabstand zu (11,7 mm bei EA = 6 mm → 17,5 mm bei EA = 12 mm).

Einen Einfluss der Durchschlagswahrscheinlichkeit konnte nicht festgestellt werden. Der niedrigste gemessene Wert liegt bei 0,1 % mit EA = 8 mm und der höchste Wert bei 2,3 % mit EA = 10 mm.

	<b>Elektrodenabstand [mm]</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	7,9	8,9	7,4	8,5
	Impulszahl	2090	2130	2085	2135
	Fehlimpulse	16	3	47	24
	prozentualer Fehlzündanteil	0,8	0,1	2,3	1,1
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>8,0</b>	<b>11,8</b>	<b>24,3</b>	<b>20,2</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>11,7</b>	<b>13,5</b>	<b>17,8</b>	<b>17,5</b>
Vanga Rosso (roter Granit)	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	11,5	12,7	7,8	10,2
	Impulszahl	2100	2090	2095	2135
	Fehlimpulse	34	41	9	13
	prozentualer Fehlzündanteil	1,6	2,0	0,4	0,6
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>5,7</b>	<b>14,0</b>	<b>21,0</b>	<b>35,6</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>14,2</b>	<b>17,5</b>	<b>20,2</b>	<b>15,1</b>

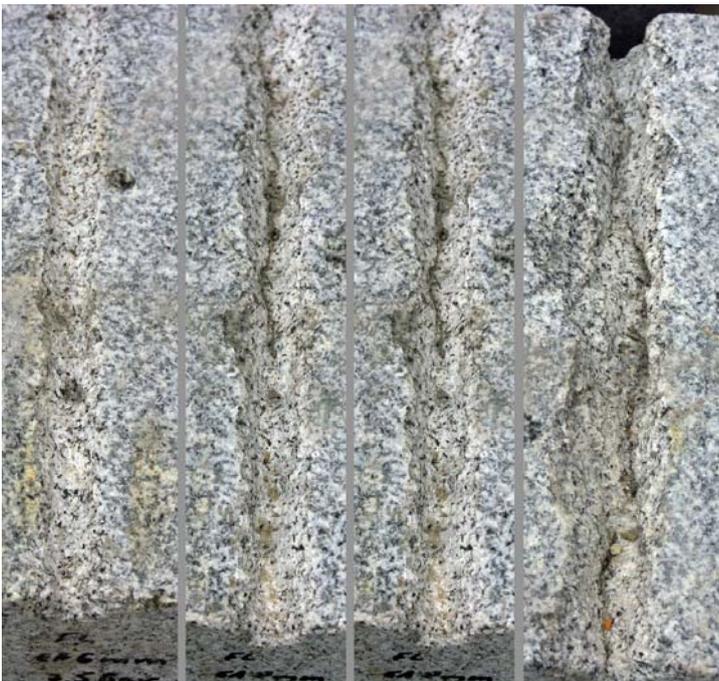
**Tabelle 5** Messergebnisse zum Abschnitt Elektrodenabstand

Im Vergleich zum Branco Micaela ist der beim Vanga Rosso erreichte Überschritt (Tabelle 6) auch bei kleineren Elektrodenabständen größer. Die Schnitttiefe erreicht ein Maximum von 35,6 mm bei EA = 12 mm.

Elektrodenabstand [mm]	6	8	10	12
Branco Micaela (grauer Granit)	8,7 mm	10,5 mm	14,8 mm	14,5 mm
Vanga Rosso (roter Granit)	11,2 mm	14,5 mm	17,2 mm	12,1mm

**Tabelle 6** Überschnitte in Abhängigkeit des Elektrodenabstands

Wie im Bild 12 zu erkennen ist, liefern kleinere Elektrodenabstände ein gleichmäßigeres und sauberes Schnittbild. Die Einstellung EA = 6 mm (links im Bild 12) zeigt einen relativ geraden und annähernd gleichmäßigen Schnittverlauf. Die Schnittkante und der Schnittgrund lassen wenige Ausbrüche und lokal verstärkten Materialabtrag erkennen. Die Schnitte mit den Elektrodenabständen 10 mm und 12 mm hingegen (1. und 2. von rechts im Bild 12), zeigen einen sehr unsauberen Schnitt. Deutlich sind die großen Ausbrüche der Schnittkanten bei der Einstellung EA = 12 mm zu erkennen. Hier ist ebenfalls zu sehen, dass sich kein gerader Schnitt ausgebildet hat.



**Bild 12** Bearbeitungsspuren auf Branco Micaela, v.l.n.r. 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm

Im Granit Vanga Rosso lässt sich ebenfalls bei kleinen Elektrodenabständen das gleichmäßigere Schnittbild erreichen. Schnittbreite und Schnitttiefe steigen mit zunehmenden Abständen der Elektroden an. Bild 13 zeigt die einzelnen Bearbeitungsspuren. Darauf ist

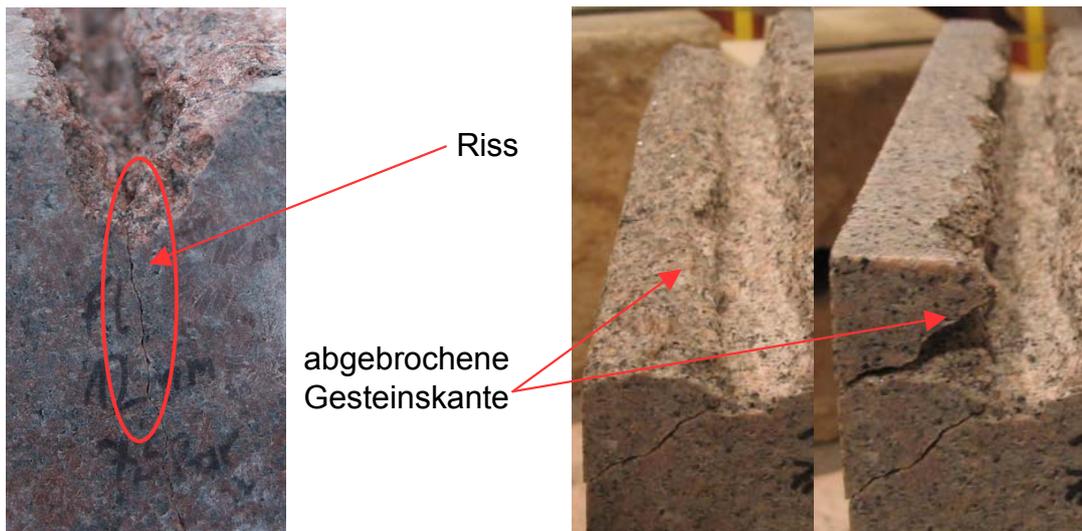
zu erkennen, dass die Bearbeitungsspuren im Vergleich zum Branco Micaela (Bild 12) von geringerer Qualität sind. Selbst der Versuch mit dem Elektrodenabstand 6 mm hat eine unsaubere Schnittkontur ergeben (Bild 13, links). Bereits bei EA = 8 mm werden Überschneidungswerte erreicht, die sich beim Branco Micaela erst bei EA = 10 mm eingestellt haben.



**Bild 13** Bearbeitungsspuren auf Vanga Rosso, v.l.n.r. 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm

Der Grund für den Anstieg von Schnitttiefe und Schnittbreite mit größerem Elektrodenabstand, ist der größere Wirkraum der Streamerentladung. Dadurch kommt es bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit zur Bündelung der einzelnen Entladungen und somit zu einer erhöhten Löseleistung im Hartgestein.

Bei dem Versuch mit EA = 12 mm kam es zur Rissbildung am Fugengrund. Für die Bearbeitung von Natursteinen mit dem Elektroimpulsverfahren ist ein solcher Anriss nachteilig, denn diese Schädigung kann ein unkontrolliert einsetzendes Risswachstum zur Folge haben. In diesem Fall ist das Absprengen von großen Materialstücken sehr wahrscheinlich, wie die Ergebnisse in vorangegangenen Untersuchungen gezeigt haben (Bild 14).



**Bild 14** Rissbildung im Vanga Rosso (links), unkontrolliertes Risswachstum (rechts)

Die Schnittergebnisse zeigen, dass bei beiden Granitsorten mit dem Elektrodenabstand von 6 mm die besten Schnittergebnisse, im Hinblick auf die Qualität zur Folge erzielt werden. Die Qualität der Schnitte des Branco Micaela ist dabei höher, als die des Vanga Rosso einzustufen. Daraus wird deutlich, dass ein möglichst geringer Elektrodenabstand anzustreben ist, um die Schnittqualität zu verbessern.

Wie bereits beschrieben liegt das daran, dass der Wirkraum der Streamerentladung verkleinert wird. Das heißt es wird ein kleineres Gebiet vorgeschädigt bzw. bearbeitet. Auf diese Weise wird verhindert, dass es zu den angesprochenen unkontrollierbaren Vorschädigungen kommt. Deshalb werden die Experimente mit dem an der Versuchsanlage kleinstmöglichen Elektrodenabstand von 6 mm fortgesetzt.

### 6.3 Durchschlagsspannung

In Tabelle 7 sind die Werte für die Einstellungen des Generatordruckes und die daraus resultierenden Ladespannungen dargestellt.

Gemäß den Erwartungen ist das Schnittbild bei den Versuchen mit einer Durchschlagsspannung von 230 kV gleichmäßiger ausgefallen, als die beiden anderen Einstellungen mit  $U_P = 280$  kV und  $U_P = 330$  kV. In der Tabelle 8 sind die Messergebnisse für beide Gesteine zusammengefasst.

<b>Generatorinnendruck [bar]</b>	<b>5,5</b>	<b>6,5</b>	<b>8,4</b>
Ladespannung [kV]	21,3	22,5	27,8
Durchschlagsspannung [kV]	230	280	330
Anstiegszeit [ns]	42	43	38
Durchschlagszeit [ns]	127	114	103

**Tabelle 7** Variationen des Generatorinnendruckes

	<b>Durchschlagsspannung [kV]</b>	<b>230</b>	<b>280</b>	<b>330</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	4,0	5,1	12,6
	Impulszahl	2100	2075	2115
	Fehlimpulse	0	10	13
	prozentualer Fehlzündanteil	0,0	0,5	0,6
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>4,9</b>	<b>14,4</b>	<b>14,9</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>10,9</b>	<b>10,5</b>	<b>14,7</b>
Vanga Rosso (roter Granit)	Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	3,9	5,3	14,2
	Impulszahl	2080	2110	2135
	Fehlimpulse	2	11	7
	prozentualer Fehlzündanteil	0,1	0,5	0,3
	<b>Schnitttiefe [mm]</b>	<b>6,8</b>	<b>9,7</b>	<b>9,8</b>
	<b>Schnittbreite</b>	<b>20,1</b>	<b>16,4</b>	<b>17,8</b>

**Tabelle 8** Messergebnisse zum Abschnitt Ladespannung

Es ist zu erkennen, dass das gelöste Volumen mit der sinkenden Durchschlagsspannung abnimmt. Dieses Ergebnis ist auf die Kraftwirkung des elektrostatischen Feldes zurückzuführen. Es wird davon ausgegangen, dass die elektrische Feldstärke  $\vec{E}$  sich proportional zur Durchschlagsspannung  $U_P$  verhält. Ebenso gilt das proportionale Verhalten der elektrischen Ladung  $Q$  zum Produkt der Ladespannung  $U_L$  und Kapazität  $C$ .

$$\vec{E} \sim U_p \quad (6.4)$$

$$Q = C \cdot U_L \quad (6.5)$$

Wird die Durchschlagsspannung verringert, hat das eine geringere Stärke des Feldes zur Folge. Nach Gleichung (6.6) führt das zu einer verminderten Kraftwirkung des elektrischen Feldes.

$$\vec{F} \sim \vec{E} \cdot Q_p \quad (6.6)$$

Eine geringere Kraftwirkung des Feldes wirkt sich nachteilig auf die Ionisationsprozesse im Feld aus und verursacht längere Anstiegs- und Durchschlagszeiten. Da während der Versuche keine Veränderung des Lastwiderstandes (ohmscher Widerstand) vorgenommen wurde, muss sich bei sinkender Durchschlagsspannung auch die Stromstärke reduzieren.

$$R = \frac{U_D}{I} \quad (6.7)$$

$$P_{el} = U_D \cdot I \cdot \eta \quad (6.8)$$

Eine geringere Stromstärke  $I$  führt nach (6.8) zur Senkung der Streamerleistung und damit auch der Löseleistung, wodurch die gelösten Materialstücke kleiner werden und sich eine gleichmäßigere Schnittfuge ausbildet.

Die Messwerte zeigen, dass die Schnitttiefe im Branco Micaela mit 4,9 mm bei 230 kV Durchschlagsspannung deutlich kleiner ist, als bei den beiden anderen Einstellungen mit 14,4 mm und 14,9 mm bei 280 kV bzw. 330 kV. Die Schnittbreite nimmt den kleinsten Wert bei 280 kV mit 10,5 mm an und ist damit geringfügig kleiner als bei 230 kV ist mit 10,9 mm.

Anhand dieser Werte ist abzusehen, dass eine größere Durchschlagsspannung einen breiteren und tieferen Schnitt zur Folge hat. Die Schnittbreite spielt für die Schnittgüte eine wichtige Rolle, daher ist die Einstellung mit 280 kV Durchschlagsspannung zu bevorzugen. Die visuelle Beurteilung der Schnittergebnisse stellt auch in diesem Fall ein wichtiges Kriterium dar. Bild 15 zeigt, dass bei  $U_p = 230$  kV der qualitativ beste Schnitt der drei Einstel-

lungen erzeugt wurde. Die Schnittfuge bei 280 kV und 330 kV lassen erhebliche Materialausbrüche an den Kanten und Grubenbildung am Schnittgrund erkennen.

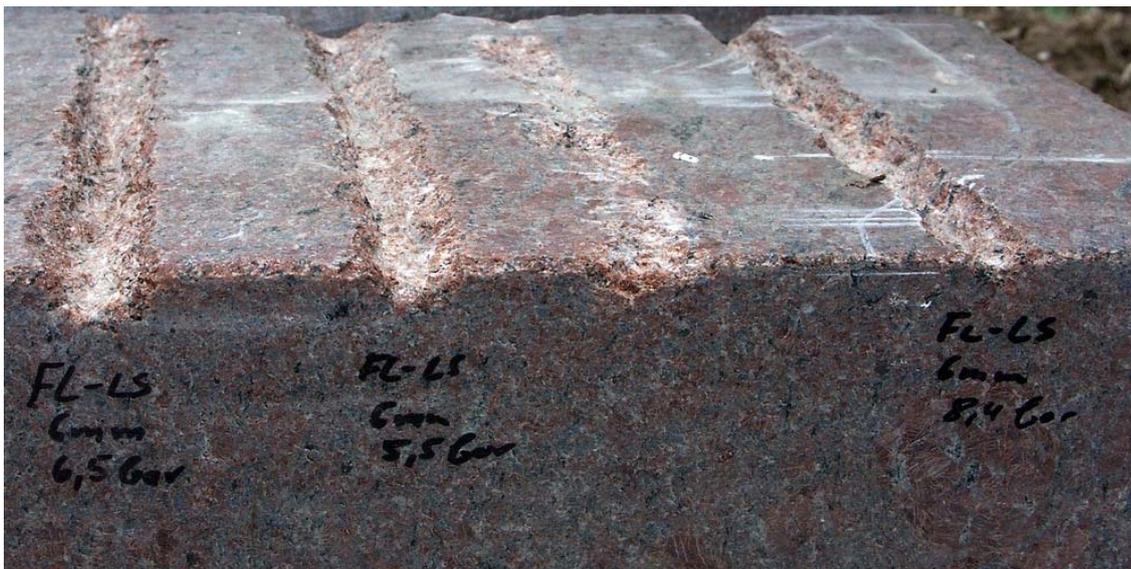


**Bild 15** Bearbeitungsspuren mit verschiedenen Durchschlagsspannungen, v.l.n.r.  $U_P = 280 \text{ kV}, 230 \text{ kV}, 330 \text{ kV}$

Ein ähnliches Ergebnis zeigen die Messwerte des Vanga Rosso (Tabelle 8). Hier liegt die geringste Schnitttiefe ebenfalls bei dem Versuch  $U_P = 230$  kV. Die Schnitttiefen mit  $U_P = 280$  kV und  $330$  kV unterscheiden sich um wenige Zehntel. Der Schnittbreitenwert des Vanga Rosso mit  $230$  kV Durchschlagsspannung ist im Vergleich zu den beiden anderen Versuchseinstellungen sehr hoch.

Die auf Bild 16 und Bild 17 abgebildeten Schnittverläufe zeigen, dass die große Schnittbreite bei mit  $U_P = 230$  kV auf Ausbrüche in der Schnittfuge zurückzuführen ist. Der ausgebrochene Bereich ist der Start- und Endpunkt einer Bearbeitungsüberfahrt.

Im Vergleich zum Branco Micaela sind die Schnittverläufe hier wesentlich ungleichmäßiger. Bereits in den vorangegangenen Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Schnitte im Vanga Rosso eine geringere Schnittgüte aufweisen. Diese Entwicklung ist auf die gröbere Gefügestruktur des Gesteins zurückzuführen. Dadurch werden größere Gesteinsbrocken gelöst.



**Bild 16** Bearbeitungsspuren mit verschiedenen Durchschlagsspannungen, v.l.n.r.  $U_P = 280$  kV,  $230$  kV; nicht beendeter Schnitt;  $330$  kV



**Bild 17** Bearbeitungsspuren mit  $U_P = 230 \text{ kV}$ ,  $280 \text{ kV}$ ,  $330 \text{ kV}$

Die auf Branco Micaela und Vanga Rosso durchgeführten Schnittversuche hatten einen breiteren Schnitt zur Folge als erwartet. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die Systemkonfigurationen. Wie aus der Tabelle 7 entnommen werden kann steigt mit geringerer werdender Durchschlagsspannung die Durchschlagszeit an. Bei der Einstellung  $U_P = 230 \text{ kV}$  beträgt sie bereits  $127 \text{ ns}$ . Bei zu hohen Durchschlagszeiten sinkt die Wahrscheinlichkeit, der Streamerentladung durch das Gestein. Die Entladungen erfolgen dann häufiger über das VE-Wasser. Weiterhin wird mit hohen Durchschlagszeiten die Bildung von Büschelentladungen begünstigt. Der technologische Eindringeffekt wird geringer, ein flacher Schnitt ist die Folge. Diesem Effekt kann mit einem geringeren Elektrodenabstand entgegengewirkt werden. Dieser ist jedoch aus den genannten Gründen noch nicht realisierbar gewesen.

Die Werte für Überschnitte für die Versuche mit den einzelnen Durchschlagsspannungen sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

<b>Generatordruck [bar]</b>	<b>5,5</b>	<b>6,5</b>	<b>8,4</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	7,9 mm	7,9 mm	11,7 mm
Vanga Rosso (roter Granit)	17,1 mm	13,4 mm	14,8 mm

**Tabelle 9** Überschnitte in Abhängigkeit des Generatordruckes

#### **6.4 Vorschubgeschwindigkeit**

Die Schnitte sind im Laufe der Versuchsreihen gleichmäßiger und schmaler geworden. Daher wird für diese Untersuchung eine weitere Verkleinerung der Schnitte, bei optimalen Einstellungen der Vorschubgeschwindigkeit erwartet. Im Abschnitt 6.3 Einfluss der Durchschlagsspannung gestaltete sich die messtechnische Erfassung der Schnittbreite bei geringen Schnitttiefen sehr schwierig. Dieses Problem vergrößerte sich, je mehr Ausbrüche an den Schnittkanten vorhanden waren. Um den Messungenauigkeiten in diesem Versuch entgegenzuwirken, wurden alle Bearbeitungsdurchläufe nur mit dem Granit Branco Micaela durchgeführt. Der Stein Vanga Rosso hat im Unterschied zum Branco Micaela eine Gefügestruktur, bei der im Löseprozess recht grobe Gefügeteilchen herausgelöst werden. Dadurch entstehen tendenziell mehr Abplatzer an den Schnittkanten.

Aufgrund der schmalen Schnittgeometrie bei 280 kV und der besseren Schnittqualität bei 230 kV Durchschlagsspannung werden die Versuche zur Vorschubgeschwindigkeit mit diesen beiden Durchschlagsspannungen durchgeführt.

Die erste Bearbeitung des Gesteins erfolgte mit der Durchschlagsspannung 280 kV. Die Messdaten der Schnittergebnisse sind in der Tabelle 10 enthalten. Die Schnitte sind in Bild 18 dargestellt. Die Versuche mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/s wurden nach 10 Überfahrten abgebrochen, da bereits ersichtlich war, dass die Schnittqualität schlechter als bei den anderen Einstellungen ist.

	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	6	5	4	3	2
Branco Micaela (grauer Granit) $U_p = 280 \text{ kV}$ $EA = 6 \text{ mm}$	Impulszahl	840	1020	1280	2540	2540
	Zahl der Überfahrten	20	20	20	20	10
	Fehlimpulse	2	8	3	5	11
	prozentualer Fehlzündanteil	0,2	0,8	0,2	0,2	0,4
	Schnitttiefe [mm]	7,2	4,1	6,2	8,7	6,9
	Schnittbreite [mm]	9,1	8,0	11,7	11,0	11,4

**Tabelle 10** Schnittdaten für die Vorschubuntersuchung bei  $U_p = 280 \text{ kV}$



**Bild 18** Vorschubuntersuchung mit  $U_p = 280 \text{ kV}$  auf Branco Micaela, v.l.n.r.  $v = 6 \text{ mm/s}$ ,  $5 \text{ mm/s}$ ,  $4 \text{ mm/s}$ ,  $3 \text{ mm/s}$ ,  $2 \text{ mm/s}$

Die Werte der Schnitttiefe und Schnittbreite verhalten sich umgekehrt proportional zu denen der Vorschubgeschwindigkeit (Tabelle 10). Wie erwartet, steigen die Schnittbreite und Schnitttiefe mit der Verminderung der Vorschubgeschwindigkeit an. Dass die Schnitttiefe

bei  $v = 2 \text{ mm/s}$  kleiner ist als die Werte bei  $v = 3 \text{ mm/s}$ , liegt an der geringeren Zahl der Bearbeitungsdurchgänge.

Die bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten erzeugten Schnittfugen, zeigen einen ungleichmäßig verlaufenden Schnitt. Die Materialausbrüche sind gut erkennbar. Die Schnitte mit  $6 \text{ mm/s}$  und  $5 \text{ mm/s}$  Vorschubgeschwindigkeit sind dagegen gleichmäßig ausgeprägt.

Anschließend wurde die Untersuchung der Vorschubgeschwindigkeit mit  $U_p = 230 \text{ kV}$  durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit  $2 \text{ mm/s}$  wurde aufgrund der schlechten Ergebnisse aus den Voruntersuchungen nicht berücksichtigt. Tabelle 11 fasst die Messwerte zusammen und Bild 19 gibt einen optischen Eindruck der Schnittfugen.

Die Qualität der Schnitte ist tendenziell schlechter, als die Schnitte bei  $U_p = 280 \text{ kV}$ . Sie sind ungleichmäßiger am Fugengrund, sowie an den Schnittkanten und Schnittflanken.

	<b>Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
Branco Micaela (grauer Granit)	Impulszahl	840	1020	1280	2540
	Zahl der Überfahrten	20	20	20	20
	Fehlimpulse	5	1	2	2
$U_p = 230 \text{ kV}$	prozentualer Fehlzündanteil	0,6	0,1	0,2	0,1
EA = 6mm	Schnitttiefe [mm]	6,5	6,0	6,6	11,3
	Schnittbreite [mm]	12,2	12,4	12,6	13,0

**Tabelle 11** Schnittdaten für die Vorschubuntersuchung bei  $U_p = 230 \text{ kV}$



**Bild 19** Vorschubuntersuchung mit  $U_P = 230$  kV auf Branco Micaela, v.l.n.r.  $v = 6$  mm/s, 5 mm/s, 4 mm/s, 3 mm/s

Die Werte aus der Tabelle 12 zeigen keinen signifikanten Zuwachs bei den Abmessungen der Schnitte bis zur Vorschubgeschwindigkeit von 3 mm/s. Hier ist der Wert für die Schnitttiefe erheblich größer. Das bedeutet, dass kein großer Unterschied im gelösten Volumen für die Vorschubgeschwindigkeiten 6 mm/s bis 4 mm/s besteht. Die Zahl der Fehlimpulse der Vorschubgeschwindigkeiten unterscheidet sich ebenfalls nur geringfügig. Ein Einfluss des Fehlzündverhaltens ist nicht festzustellen.

Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	6	5	4	3	2
Durchschlagsspannung 280 kV	6,1 mm	5,0 mm	8,7 mm	8,0 mm	8,4 mm
Durchschlagsspannung 230 kV	9,2 mm	9,4 mm	9,6 mm	10,0 mm	k.A.

**Tabelle 12** Überschnitte in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Der Überschchnitt hat sich bei der Durchschlagsspannung 280 kV mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit vergrößert. Die Einstellung von  $U_P = 230$  kV hatte einen größeren Überschchnitt zur Folge, der sich mit sinkender Vorschubgeschwindigkeit kaum vergrößerte. Das bedeutet, dass die Schnittbreite nahezu konstant geblieben ist und breiter war, als bei der höheren Durchschlagsspannung von 280 kV. Auf Grund der hohen Anzahl von Bearbeitungsüberfahrten konnte sich ein ausreichend tiefer Schnitt bilden, so dass eventuelle Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Messpunkte minimiert wurden.

Der breitere Schnitt ist auf die bereits erwähnte Begünstigung von Büschelentladungen zurückzuführen. Mit einem geringeren Elektrodenabstand würde der Eindringeffekt der Entladungen erhöht und die Schnitte entsprechend schmaler.

Die visuelle Bewertung der Schnittergebnisse ergab jedoch, dass der bei 230 kV erzeugte Schnitt eine bessere Qualität hat, als der bei 280 kV.

## 6.5 Bestimmung der spezifischen Schnittleistung

Neben der deutlichen Verbesserung des Schnittbildes wurde am Versuchsstand eingeprägter spezifischer Schnittenergiebedarf im Vergleich zu den bisherigen Trennverfahren festgestellt. Die nachfolgende Berechnung verdeutlicht diese Aussage:

$$W_I = n_{KG} \cdot \frac{C_{KG}}{2} \cdot U_{LG}^2 + n_{KT} \cdot \frac{C_{KT}}{2} \cdot U_{LT}^2$$

$$W_I = 10 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-9} \cdot F}{2} \cdot 21300^2 \cdot V^2 + 4 \cdot \frac{2,72 \cdot 10^{-6} \cdot F}{2} \cdot 380^2 \cdot V^2$$

$$W_I = 23,47 \cdot W \cdot s$$

Dies entspricht der Energie eines Impulses. Zur Erzeugung des Schnittes von 250 mm Länge und einer Tiefe von 6,5 mm wurden 840 Impulse benötigt. Die Schnittfläche ist das Produkt aus Schnittlänge und Schnitttiefe und entspricht rund  $A_S = 1,625 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ .

$$W_{SG} = n_I \cdot W_I$$

$$W_{SG} = 840 \cdot 23,47 \cdot W \cdot s \cdot \frac{1 \cdot kW \cdot h}{3,6 \cdot 10^6 \cdot W \cdot s}$$

$$W_{SG} = 0,0055 \cdot kW \cdot h$$

Die spezifische Löseenergie ist somit.

$$W_{spez} = \frac{W_{SG}}{A_S}$$

$$W_{spez} = \frac{0,0055 \cdot kW \cdot h}{1,625 \cdot 10^{-3} m^2}$$

$$W_{spez} = 3,4 \cdot \frac{kW \cdot h}{m^2}$$

Herkömmliche Schnittverfahren haben einen höheren Bedarf an spezifischer Schnittenergie. Als Beispiele werden hier die Trennsäge mit 4,4 kWh/m<sup>2</sup> oder die Brückensäge mit 4,6 kWh/m<sup>2</sup> genannt.

Die Berechnung gilt nur für den verwendeten Versuchstand. Dieser Laborprüfstand dient allerdings nur dem Erbringen des Funktionsnachweises des EIV und der Untersuchung der Prozessparameter bei Zerstörung und Bearbeitung von Naturstein. Die Energieeffizienz spielte bei der Konzeption eine untergeordnete Rolle. Daher ist anzunehmen, dass noch viel Potential zur Erhöhung des Wirkungsgrades vorhanden ist.

Experimente zur Gesteinszerstörung, bei denen mit Rundstahlelektroden eine spezifische Löseenergie von 1,7 kWh/m<sup>2</sup> erreicht wurde, machen das Potential deutlich. Das Schnittergebnis dieses Versuchs ist in Bild 20 zu sehen.

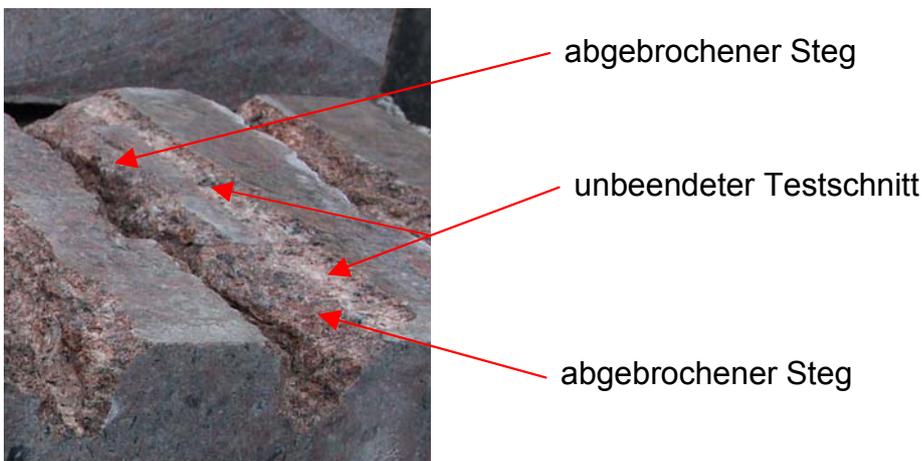


Ladespannung [kV]	28,3
Durchschlagspannung [kV]	256,5
ohmscher Widerstand der Elektroden [Ω]	1949
Anstiegszeit [ns]	89
Durchschlagzeit [ns]	91
Impulszahl	2133
Schnitttiefe [mm]	55,62
Schnittbreite [mm]	25,09

**Bild 20** Schnittergebnis mit Rundstahlelektroden im Sandstein

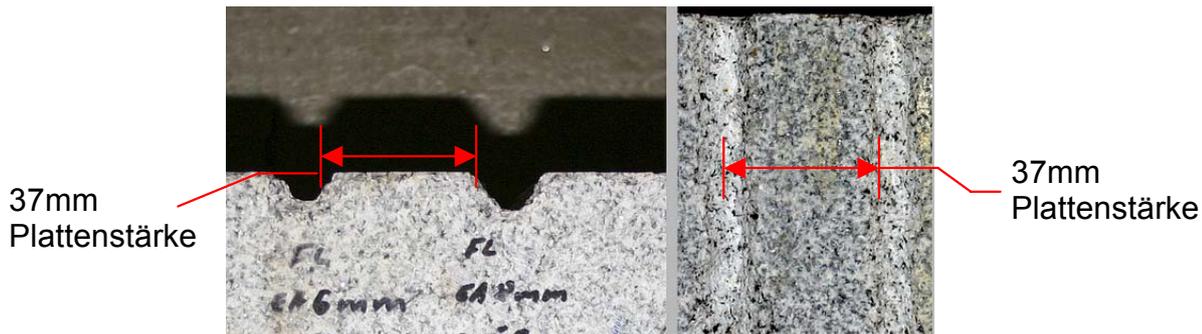
## 6.6 Untersuchung der Plattenstärke

Eine gesonderte Untersuchung der minimal erreichbaren Plattenstärke wurde nicht durchgeführt, da es durch die Elektrodenbefestigung nicht möglich ist, die Gesteinsblöcke vollständig zu durchschneiden. Dennoch sind im Laufe der getätigten Untersuchungen Erkenntnisse über mögliche Plattenstärken gewonnen wurden. Bild 21 zeigt einen Versuchsschnitt auf dem Vanga Rosso mit Flachstahlelektroden, bei einem EA = 6 mm und  $U_P = 280$  kV. Rechts neben dem Schnitt ist eine weitere Spur zu erkennen, die nicht bis zu Ende geführt wurde. Dabei handelt es sich um einen Schnittversuch, der abgebrochen werden musste, weil der verbleibende Steg zwischen den Schnittfugen weggebrochen ist. Die Breite des Steges beträgt hier etwa 20 mm. Es wird aber darauf hingewiesen, dass der Schnitt neben dem unbeendeten Testschnitt nicht mit optimaler Parametereinstellung durchgeführt wurde. Weiterhin ist bekannt, dass der Vanga Rosso auf Grund seines Gefüges zu groben Materialabbrüchen neigt.



**Bild 21** Plattenstärke Vanga Rosso

In Bild 22 sind zwei Schnitte auf dem Branco Micaela zu sehen, die im Zuge der Untersuchung des Elektrodenabstandes entstanden sind. Hier beträgt die Stegbreite ca. 37 mm, es ist keine Schädigung des Steges zu erkennen. Auch in der Aufsicht werden keine Schädigungen entlang des Schnittes sichtbar. Daraus lässt sich für den Branco Micaela eine minimale Plattenstärke abschätzen, die in Abhängigkeit der eingestellten Prozessparameter, zwischen  $b_P = 30$  mm und 40 mm liegt.



**Bild 22** Plattenstärke Branco Micaela

## 6.7 EMV

Während der Versuchsreihen mit den Flachstahlelektroden traten elektromagnetischen Störungen auf. Diese machten sich hauptsächlich durch gelegentliche Ausfälle der Spülpumpe und die Störung der EDV-Anlage in der Nähe des Versuchsstandes bemerkbar. Diese Störungen traten ausschließlich während des Betriebs der Versuchsanlage auf.

Die geometrische Form der Flachstahlelektrode kommt als Ursache für die elektromagnetischen Störungen in Frage. Der elektrische Feldaufbau um die Elektroden ist, im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen, nicht homogen, sondern stark inhomogen. Die EMV-Probleme beeinflussen nicht nur die peripheren Systeme (Pumpe, EDV) sondern sie können auch zu einer nachteiligen Beanspruchung des Generators führen.

Zur Minderung des elektromagnetischen Einflusses auf das Pumpensystem wurde die Spülwasserpumpe mit einer Aluminiumabdeckung in Form einer Haube abgeschirmt. In den Versuchen hat sich herausgestellt, dass diese Schirmung nicht ausreichend ist. Einen verbesserten Schutz könnte eine Kapselung bieten, bei der auch der Boden geschlossen ist und die Spalten der Seitenwände abgedichtet sind.

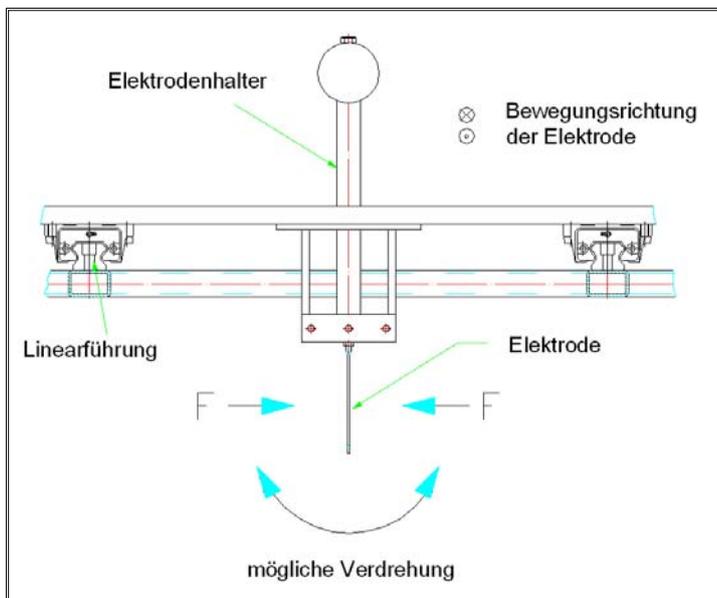
Zur weiteren Reduktion der EM-Störungen wurden auf eine kurze Leitungsführung geachtet und offene Leitungsenden vermieden.

## 6.8 Bewegungssystem

Die Vorschubbewegung der Elektroden wird, wie bereits beschrieben, über ein Linearführungssystem mit einem handgetriebenen Spindelsystem realisiert. Für diese Art des Bewegungssystems haben sich im Laufe der Untersuchungen Vor- und Nachteile herausgestellt.

Durch die Linearführung mit wälzkörpergelagertem Flanschwagen kann der Schlitten mit dem Elektrodenhalter mit relativ geringem Kraftaufwand verfahren werden. Die Führung verhindert aber nicht, dass seitliche Wegdrehen der Elektroden und des Halters bei Einwirkung von Kräften senkrecht zur Bewegungsrichtung, wie im Bild 23 schematisch dargestellt ist. Diese entstehen beim Verklemmen der Elektroden in der Schnittfuge.

Der Spindelhub ermöglicht ein exaktes Positionieren und Verfahren des Elektrodenhalters. Die Gleichmäßigkeit des Verfahrens beim Schneiden ist durch den fehlenden kraftgetriebenen Antrieb gemindert. Durch den Handbetrieb ist es nicht auszuschließen, dass sich die Elektroden mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit entlang ihrer Schnittlinie bewegen. Dabei können die Streamerentladungen dichter beieinander oder weiter auseinander liegen, was zu einer unregelmäßigen Schnittbildung beiträgt.



**Bild 23** Verdrehung der Elektroden durch Querkräfte

Im Gegensatz dazu bietet der Handbetrieb beim Verklemmen der Elektroden einen

bedeutenden Vorzug. Die verklemmten Elektroden können mit einer kurzen Bewegung entgegen der Vorschubgeschwindigkeit wieder aus ihrer Verklemmung herausgezogen werden, ohne dass ein größeres Steuerungssystem, das beim kraftbetriebenen Antrieb notwendig wäre, installiert werden muss.

Im Falle einer Elektrodenverklemmung zeigt sich ein Nachteil der Elektrodenbefestigung. Die Elektroden haben an ihrem oberen Ende einen Gewindezapfen, der in den Elektrodenhalter eingeschraubt und mit einer Kontermutter gesichert wird. Verklemmen sich die Elektroden im Gestein, so kann es zum Herausdrehen der Elektroden aus der Befestigung kommen.

## **7 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse**

Im ersten Versuchsabschnitt wurde gezeigt, dass die Elektrodenform eine maßgebende Bedeutung bei der Schnittbildung hat. Es wurde die Wirkungsweise von Rundstahl- und Flachstahlelektroden verglichen. Obwohl die Flachstahlelektroden einen größeren Überschnitt als die Rundstahlelektroden verursachten, sind ihre Schnitte schmäler und gleichmäßiger ausgeprägt (Vgl. 6.1)

Die Untersuchung des Einflusses des Elektrodenabstands wurde ausschließlich unter Verwendung der Flachstahlelektroden durchgeführt, weil diese im Vergleich zu den Rundstahlelektroden ein saubereres Schnittbild produzierten. Bei der Betrachtung des Elektrodenabstandes wurden die Schlagweiten  $EA = 6 \text{ mm}$ ,  $8 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm}$ ,  $12 \text{ mm}$  miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass eine geringere Schlagweite zwischen den Elektroden einen Schnitt erzeugt, der einen kleinen Überschnitt und eine tendenziell gleichmäßigere Schnittfuge zur Folge hat.

Die Auswertung der gemessenen Werte und der Schnittbilder ergab, dass der Elektrodenabstand von  $6 \text{ mm}$ , bei beiden Steinen, das beste Schnittergebnis erzielte. Der Schnitt verläuft im Vergleich zu den anderen Einstellungen gleichmäßig und ist geprägt durch eine geringere Zahl an Materialausbrüchen im Vergleich zu den Schnitten mit anderen Elektrodenabständen. In den weiteren Versuchen wurde der Parameter Elektrodenabstand auf  $6 \text{ mm}$  eingestellt.

Im Anschluss an den Elektrodenabstand wurde der Einfluss der Durchschlagsspannung auf die Bildung der Schnittfuge untersucht. Der Elektrodenabstand wurde auf 6 mm eingestellt. Die betrachteten Durchschlagsspannungen betrug 230 kV, 280 kV und 330 kV.

Es ist ersichtlich, dass die Schnittfuge des Vanga Rosso bei 230 kV die breiteste ist. Auch der Überschnitt hat hier seinen größten Wert. Die Bewertung der Schnittergebnisse hat ergeben, dass mit einer geringeren Durchschlagsspannung die Schnittfuge gleichmäßiger wird und geringere Abplatzer ausweist. Die Verringerung der Durchschlagsspannung wirkt sich ebenfalls auf die Eigenschaften der Entladung aus. Die Streamerentladungen haben nur noch einen geringen technologischen Eindringeffekt. Die Schnitte werden flacher und haben einen großen Überschnitt.

Die abschließende Untersuchung des Vorschubeinflusses wurde mit dem Granit Branco Micaela durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeiten betragen 2 mm/s, 3 mm/s, 4 mm/s, 5 mm/s und 6 mm/s. Aufgrund der vorherigen Ergebnisse wurden die Schnittversuche mit einer Durchschlagsspannung von 230 kV und 280 kV durchgeführt.

Für den ersten Schnitt wurde der Durchschlagsspannung 280 kV eingestellt. Die Messergebnisse belegen, dass eine größere Vorschubgeschwindigkeit eine bessere Schnittgüte erzeugt. Dafür sind jedoch wesentlich mehr Bearbeitungsüberfahrten erforderlich, um das Schnittvolumen einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit zu erreichen.

Bild 24 zeigt einen Vergleich der Schnittergebnisse, die zum Beginn und zum Ende der Untersuchungen erzielt wurden. Es ist deutlich die Verbesserung der Schnittqualität zu erkennen. Allerdings nimmt wird das gelöste Volumen kleiner. In Tabelle 13 werden die Eingangsparameter für diesen Versuche dargestellt.



**Bild 24** Schnittvergleich

Bild 20	<b>Schnitt links</b>	<b>Schnitt mitte</b>	<b>Schnitt rechts</b>
Elektrodenform	Rundstahl	Flachstahl	Flachstahl
Ladespannung [kV]	30,3	30,4	21,3
Durchschlagspannung [kV]	284,5	280,2	230
Elektrodenabstand [mm]	10	10	6
Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	1	1	6
Schnitttiefe [mm]	15,7	9,5	6,5
Schnittbreite [mm]	20,7	15,4	12,2

**Tabelle 13** Schnittvergleich zu Beginn und am Ende der Versuchsreihen des Branco Micaela

## Fazit

Die aus den verschiedenen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse, stellen eine Grundlage für die Bewertung der Elektroimpulstechnologie zur Bearbeitung von Natursteinen dar.

Mit dem EIV wird eine effektivere Zerstörung von Hartgestein erzielt als mit vergleichbaren Verfahren. Die spezifische Zerstörungsenergie beträgt lediglich  $100 \text{ J/cm}^3$ . Verfahren, die auf dem Aufschmelzen von Gestein beruhen, benötigen zwischen  $2500$  und  $4000 \text{ J/cm}^3$ .

Der direkte Vergleich des EIV mit konventionellen Schnittverfahren unterstreicht die Energieeffizienz (Tabelle 14).

	<b>spezifische Schnittenergie [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
Pendelgattersäge	5,2
Brückensäge	4,6
Trennsäge	4,4
Elektroimpulsverfahren	3,4

**Tabelle 14** spezifische Schnittleistung verschiedener Gesteinsbearbeitungsmaschinen [9]

Für die Bearbeitung des Gesteins wurden die folgenden optimalen Parameter für den Streamerprozess ermittelt:

Elektrodenform:	Flachstahlelektroden
Ladespannung:	21,3 kV
Durchschlagspannung:	230 kV
Elektrodenabstand:	6 mm
Vorschubgeschwindigkeit:	6 mm/s

Die Impulswiederholrate betrug dabei 1 Hz. Durch eine höhere Frequenz kann der Schnittprozess beschleunigt werden.

Die Gestaltungsgrundsätze und Funktionsmerkmale zur Entwicklung einer Pilotanlage für die Gesteinsbearbeitung konnten erarbeitet werden. Als kritisch und zum Teil noch unerforscht stellt sich die Beschaffung eines geeigneten Hochspannungsgenerators nach dem Marxprinzip dar.

Bei den Experimenten konnte der Nachweis einer optimalen Gesteinszerstörung geführt werden. Die Schnittqualität erfüllt die Bedingungen einer praktischen Nutzung noch nicht. Ihre Verbesserung ist nur über die Entwicklung und den Bau eines neuen Hochspannungsgenerators mit Impulswiederholraten zwischen 15 Hz und 25 Hz möglich. Es hat sich herausgestellt, dass die Kosten dafür rund 200.000 € betragen.

Insbesondere die gezeigte Energieeffizienz des EIV empfiehlt mit Nachdruck die Fortführung der Arbeiten auf diesem Gebiet. Dabei wird auf die Entwicklung und Test eines leistungsfähigeren Generators und die Lösung sämtlicher EMV-Probleme orientiert.

## Literaturverzeichnis

- [1] G. Kunze, A. Kulitsky; „Patent- und Literaturrecherche zum Thema Elektroimpulsverfahren (EIV) in Tunnelbohrmaschinen“; 2005
- [2] G. Kunze, A. Kulitsky; „Gestaltungs- und Sicherheitskonzept zum Thema Elektroimpulsverfahren (EIV) in Tunnelbohrmaschinen“; 2005
- [3] G. Kunze, A. Ehler, I. Gubsch, M. Neubert; „Studie über innovative Verfahren zur Gewinnung und Verarbeitung von Naturwerksteinen“; Deutsche Bundesstiftung Umwelt; Az16933; Dresden; 2002
- [4] G. Kunze, M. Neubert, E. Anders; Abschlußbericht zum Thema „Elektroimpulsverfahren (EIV) in Tunnelbohrmaschinen“, TU Dresden, IFBL, 2006
- [5] E. Anders; Großer Beleg zum Thema „Experimentelle Bestimmung von EIV - Prozessparametern in der Natursteinbearbeitung“, TU Dresden, IFBL, 2006
- [6] H. Seidel, Kurzbericht „Charakterisierung der Schnittflächen von mit dem Elektroimpuls-Verfahren geschnittenen Natursteinen“, Dresden, 2003
- [7] S. Fuchs; Diplomarbeit Nr10/2005 "Untersuchung zur Auslegung von Impulsstromversorgung für technische Prozesse"; TU Dresden; IEEH; 2006
- [8] Prüfzeugnisse Branco Micaela, Vanga Rosso
- [9] M. Neubert; „Entwicklung eines Geräteprototyps für die ökologische Natursteinbearbeitung mit dem Elektroimpulsverfahren“; TU Dresden, IFBL, 2006

**Anlagen**