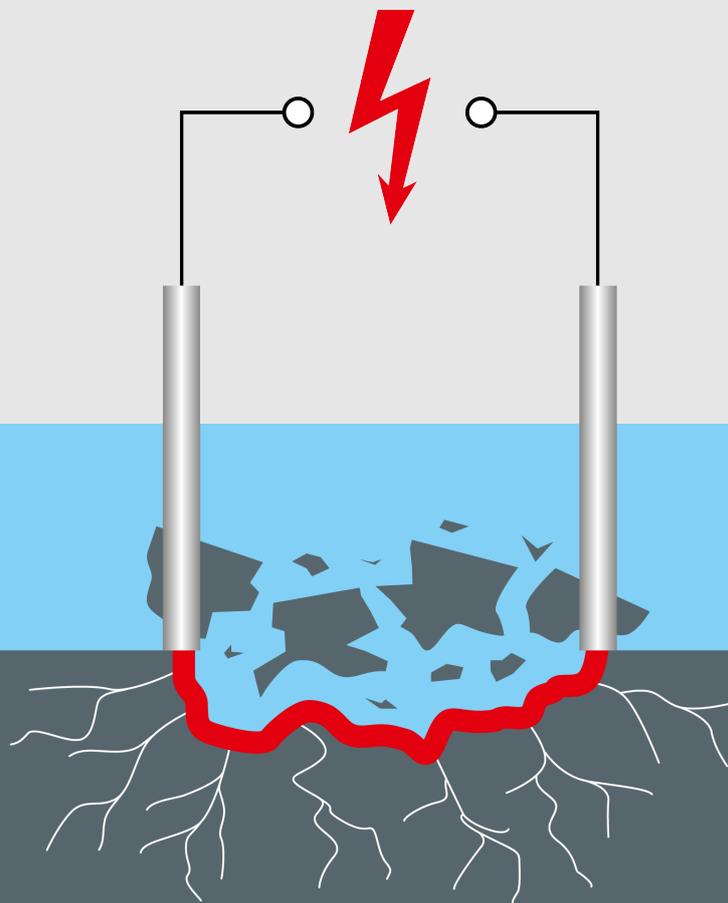


BBSR-  
Online-Publikation  
30/2021

# Selektiver Rückbau mittels Elektro-Impuls-Verfahren

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jens Otto  
Prof. Dr.-Ing. Frank Will  
Lukas Hammel  
Franziska Lehmann  
Dr.-Ing. Erik Anders  
Matthias Voigt



# Selektiver Rückbau mittels Elektro-Impuls-Verfahren

Grundlagenermittlung zur Adaption eines innovativen Abbruchverfahrens aus dem Bergbau (EIV – Elektro-Impuls-Verfahren) als neue Bautechnologie für selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.18

Projektlaufzeit: 03.2019–03.2021

## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Wissenschaftliche Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
Dipl.-Ing. (FH) Architekt Daniel Wöffen  
daniel.woeffen@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Technische Universität Dresden  
Institut für Baubetriebswesen, Dresden  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto (Projektleitung)  
jens.otto@tu-dresden.de  
Dipl.-Ing. Lukas Hammel

Institut für Mechatronischen Maschinenbau, Dresden  
Stiftungsprofessur für Baumaschinen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Will  
Dipl.-Ing. (FH) Franziska Lehmann  
Dr.-Ing. Erik Anders  
Dipl.-Ing. Matthias Voigt

### Stand

Januar 2021

### Bildnachweis

Titelbild: Dr.-Ing. Erik Anders  
Bilder: Dr.-Ing. Erik Anders: S. 85, 86; Boels: S. 53; Darda GmbH: S. 45; ICS Marketing Team Portland (USA): S. 52; Klingspor AG: S. 52; Lehmann, F.: S. 61, 63, 64, 68, 73, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84; Mayrhofer, E.: S. 97; Wacker Neuson SE: S. 44; Wimmer International: S. 48; Ruhl, W.: S. 51.

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Otto, Jens; Will, Frank; Hammel, Lukas; Lehmann, Franziska; Anders, Erik; Voigt, Matthias: Selektiver Rückbau mittels Elektro-Impuls-Verfahren: Grundlagenermittlung zur Adaption eines innovativen Abbruchverfahrens aus dem Bergbau (EIV) als neue Bautechnologie für selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen. BBSR-Online-Publikation 30/2021, Bonn, Dezember 2021.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>8</b>
<b>2 Elektro-Impuls-Verfahren</b>	<b>10</b>
2.1 Stand der EIV-Technik	10
2.2 Abgrenzung der elektrodynamischen EIV-Lösung	11
<b>3 Selektiver Rückbau</b>	<b>14</b>
<b>4 Analyse der technisch-technologischen Anforderungen an den selektiven Rückbau</b>	<b>15</b>
4.1 Einsatzgebiete im Hoch-, Tief- und Ingenieurbau	15
4.2 Anforderungen an Material, Geometrie und Folgetechnologie	16
4.2.1 Material und Geometrie	16
4.2.2 Folgetechnologie der Materialaufbereitung	21
4.3 Anforderungen durch Umwelt	23
4.3.1 Staub	24
4.3.2 Splitter und Trümmer	25
4.3.3 Feuchtigkeit	26
4.3.4 Lärm	26
4.3.5 Erschütterungen	29
4.3.6 Zusammenfassung	30
4.4 Ableitung beispielhafter Anwendungsszenarien	31
<b>5 Analyse und Bewertung vorhandener Rückbautechnologien</b>	<b>35</b>
5.1 Einordnung der Thematik	35
5.2 Abbruchverfahren	37
5.2.1 Handabbruch	37
5.2.2 Maschinelles Abbruch	41
5.3 Trennverfahren	47
5.3.1 Sägen	47
5.3.2 Bohren	51
5.3.3 Hydraulische Verfahren	55
5.4 Marktanalyse des EIV	56
<b>6 Experimentelle Untersuchungen zum EIV</b>	<b>57</b>
6.1 Grundlagenversuche	57
6.1.1 Versuchsbeschreibung	57
6.1.2 Versuchsablauf	62
6.1.3 Variation des Elektrodenabstandes	62
6.1.4 Variation der Impulsanzahl	64
6.1.5 Variation der Impulsenergie	66
6.1.6 Spülen des Abtragbereiches	67
6.1.7 Einfluss der Verschmutzung des Wassers	68

6.1.8	Variation der Impulswiederholrate	71
6.1.9	Nachsetzen der Elektrode	71
6.2	Vergleichende Versuche mit Beton	76
6.2.1	Einzelversuche	76
6.2.2	Versuche mit Kunststoffhalter und Bewehrungsstab	77
6.2.3	Versuche mit Nachsetzen der Elektrode	78
6.3	Kontinuierliche Versuche	81
<b>7</b>	<b>Konzeptionelle Empfehlung für Geräte- und Komponentenentwicklung</b>	<b>86</b>
7.1	Gerätekonzeption	86
7.1.1	Allgemein	86
7.1.2	Handgeführtes Gerät	87
7.1.3	Maschinengeführtes Gerät (Anbaugerät)	88
7.2	Komponentenentwicklung	89
7.2.1	Dielektrikum	89
7.2.2	Prozessraumabdichtung	89
7.2.3	Wasseraufbereitung	90
7.2.4	Elektrodengeometrie	92
7.3	Anwendungskonzept für eine sichere und störungsfreie Einbindung des EIV	92
<b>8</b>	<b>Potenziale beim Rückbau mit EIV</b>	<b>93</b>
8.1	Vergleich der Abbruchleistung	93
8.1.1	Allgemeines	93
8.1.2	Hochrechnung der Abbruchleistung des EIV	93
8.1.3	Vergleich der Abbruchleistung von EIV mit etablierten Abbruchverfahren	97
8.1.4	Vergleich der Trennleistung von EIV mit etablierten Trennverfahren	103
8.2	Gerätekosten des EIV-Gerätes	107
8.3	Energiekosten EIV-Gerät	107
8.4	Zusammenfassung der Potenziale beim Rückbau mit EIV	109
<b>9</b>	<b>Arbeitsphysiologie und Arbeitssicherheit beim Einsatz des EIV</b>	<b>110</b>
9.1	Regulatorische Rahmenbedingungen (Arbeiten im Hochspannungsumfeld)	110
9.2	Sicherheit und Gesundheitsschutz	112
9.3	Analyse elektromagnetische (Umwelt-)Verträglichkeit im Baustellenbetrieb (EMV/EMVU)	116
9.4	Arbeitsphysiologische Tragweite	117
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>118</b>
<b>11</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>121</b>
	<b>Verzeichnisse</b>	<b>123</b>
	Abkürzungsverzeichnis	123
	Abbildungsverzeichnis	124
	Tabellenverzeichnis	127
	Formelverzeichnis	129
	Quellenverzeichnis	130
	Mitwirkende	133

---

## Kurzfassung

Im Forschungsvorhaben EIV-Bau wurden die Grundlagen für eine Adaption der innovativen Abbruchtechnologie aus dem Bergbau (EIV) als neue Rückbautechnologie für den selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen des Bauwesens untersucht.

Ziel war es, auf Grundlage einer umfangreichen Analyse der etablierten Abbruch- und Trennverfahren die notwendigen Anforderungen an eine neue Rückbautechnologie zu definieren, welche für eine vergleichende Betrachtung des EIV mit den etablierten Abbruch- und Trennverfahren genutzt werden. Der Fokus wurde dabei auf die Themenbereiche Emissionen, Selektivität und Abbruch- bzw. Trennleistung gelegt. Im Rahmen von Laborversuchen sollte die elektrodynamische EIV-Lösung auf die baustellenspezifischen Anforderungen angepasst werden. Impulsanzahl, Impulsenergie, Elektrodenabstand und Elektrodengeometrie sollten auf den Rückbau von mineralischen Baustoffen adaptiert werden. Für einen kontinuierlichen Einsatz des EIV sollte die Möglichkeit des vertikalen sowie horizontalen Nachsetzens der Elektroden überprüft werden. Die Ergebnisse der Laborversuche sollten in einer Gerätekonzeption für handgeführte EIV-Geräte und EIV-Anbaugeräte zusammengefasst werden. Weiterhin sollte auf Grundlage der Analyse der etablierten Abbruch- und Trennverfahren sowie der Ergebnisse aus den Laborversuchen eine vergleichende Betrachtung und Einschätzung des EIV erfolgen.

Die Forderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) zur Förderung der Kreislaufwirtschaft, Schonung natürlicher Ressourcen und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen stellen unter anderem einen Anspruch an die Selektivität der Abbruch- und Trennverfahren. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes müssen, insbesondere in sensiblen Bereichen, die Emissionen minimiert werden. Etablierte Abbruch- und Trennverfahren werden den wachsenden Forderungen nach Selektivität und einer Reduzierung der Emissionen nur selten gerecht. Durch Adaption einer neuen Abbruchtechnologie aus dem Bergbau (EIV) sollte untersucht werden, ob sich Emissionen reduzieren und die Selektivität erhöhen lassen.

Zur Bearbeitung der gesetzten Forschungsziele wurden sowohl eine umfangreiche Literaturrecherche als auch Laborversuche durchgeführt. Anhand der Literaturrecherche war es möglich, potenzielle Anwendungsgebiete für den Einsatz der EIV-Technologie herauszuarbeiten. Zur Beurteilung der Materialelektivität der EIV-Technologie sowie der Abbruch- bzw. Trennleistung wurden umfangreiche Versuche durchgeführt und die Ergebnisse zusammengefasst. Auf Grundlage der Literaturrecherche und der Laborversuche war es möglich, die EIV-Technologie den etablierten Abbruch- und Trennverfahren gegenüberzustellen, um die Potenziale der EIV-Technologie herauszustellen.

Durch das Forschungsprojekt wurden wichtige Grundlagen für eine Adaption der EIV-Technologie für den selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen herausgearbeitet. Während im Bereich des Massenabtrages nur ein geringeres Potenzial im Vergleich zu den etablierten Verfahren zu erkennen ist, sind die Potenziale der EIV-Technologie im Bereich der Oberflächenbehandlung, dem Oberflächenabtrag, dem Schlitz- und Bohren zu sehen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes bilden eine solide Basis für weitere Forschungsarbeiten zur detaillierten Untersuchung von Gerätekonzepten.

---

## Abstract

In the EIV-Bau research project, the basic principles for an adaption for the innovative demolition technology from mining (EIV) as a new deconstruction technology for selective deconstruction in sensitive areas of the building industry were investigated.

The aim was to define the necessary requirements for a new deconstruction technology based on a comprehensive analysis of the established demolition and separation process, which are used for a comparative consideration of the EIV with the established demolition and separation processes. The focus was placed on the topics of emissions, selectivity and demolition and separation performance. Within the framework of laboratory tests, the electrodynamic EIV-solution was to be adapted to the construction-specific requirements. The number of pulses, pulse energy, electrode spacing and electrode geometry should be adapted to deconstruction of mineral building materials. For continuous use of the EIV, the possibility of vertical as well as horizontal repositioning of the electrodes should be checked. The results of the laboratory test should be summarised in a device design for handheld EIV devices and EIV attachments for carrier devices. Furthermore, based on the analysis of the established demolition and separation processes as well as the results from the laboratory tests, a comparative consideration and assessment of the EIV should be carried out.

The requirements of the Closed Substance Cycle Waste Management Act (KrWG) for the promotion of the closed substance cycle economy, the conservation of natural resources and the safeguarding of the environmentally compatible management of waste place, among other things, a demand on the selectivity of the demolition and separation processes. With regard to occupational health and safety, emissions must be minimised, especially in sensitive areas. Established demolition and separation processes rarely meet the growing demands for selectivity and a reduction in emissions. By adapting a new demolition technology from the mining industry (EIV), it was to be investigated whether emissions can be reduced and selectivity increased.

In order to work on the research goals, both an extensive literature research and laboratory tests were carried out. Based on the literature research, it was possible to identify potential areas of application for the use of EIV-technology. Extensive tests were carried out to assess the material selectivity of the EIV-technology as well as the demolition and separation performance, and the results were summarised. Based on the literature research and the test in the laboratory, it was possible to compare the EIV-technology with established demolition and separation processes in order to highlight the potential of the EIV-technology.

The research project has developed important basic principles for the adaption of EIV-technology for selective deconstruction in sensitive areas. While in the area of mass removal only a lower potential compared to the established methods can be seen, the potentials of EIV technology can be seen in the area of surface treatment, surface removal, slitting and drilling. The results of the research project form a solid basis for further research work on the detailed investigation of device concepts.

# 1 Aufgabenstellung

Bauen im Bestand macht mit über 60 % [BAUS2020] einen beträchtlichen Anteil des gesamten Bauvolumens aus und gewinnt weiter an Bedeutung. Durch fehlerhafte Planung, Umplanung oder Baumängel fallen auch im Neubau nachträgliche Arbeiten in erheblichem Umfang an. Fast immer geht es um einen großvolumigen und sensiblen Rückbau bestehender Konstruktionen. Besonders hohe Anforderungen müssen Rückbautechnologien in innerstädtischen Wohngebieten, bei laufender Gebäudenutzung, im Fall höherfester Betone und bei schutzwürdiger Bausubstanz erfüllen.

Die heute eingesetzten Verfahren werden den wachsenden Anforderungen in der Baupraxis selten gerecht. Sie sind durch hohe Emissionen, große Mengen Strahlmittel, langsamen Leistungsfortschritt oder erheblichen körperlichen Einsatz gekennzeichnet. Zwei Verfahren sind verbreitet: mechanische Gefügezerstörung durch äußere Krafteinleitung (Abbruchhammer, Stemmen, Fräsen) und medientransportierende Strahlverfahren (Hochdruckwasserstrahlen, Festkörperstrahlen). Um Emissionen (Lärm, Erschütterung, Staub) zu begegnen, sind eine zeitliche, energetische oder räumliche Separierung und/oder ein hoher technischer Aufwand erforderlich. Auftretende Erschütterungen schädigen die zu erhaltende Bausubstanz. Gesundheitliche Belastungen für Baufacharbeiter (Lärm, Staub, Schwingung, belastetes Wasser) und Belange des Arbeitsschutzes stellen ein Problem dar.

Als alternative Rückbautechnologie wurde im Forschungsprojekt das elektrodynamische Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) untersucht. Es basiert auf der Zerstörung fester mineralischer, meist heterogener Materialien durch Hochspannungsimpulse. Den Forschern der TU Dresden gelang erstmals die konsequente Umsetzung des elektrodynamischen Prinzips für das Bauwesen unter Praxisbedingungen des Berg- und Spezialtiefbaus. Dabei werden Spannungsdurchschläge hauptsächlich im Material erzeugt. Impulsenergie geht nicht wirkungslos an die Umgebung verloren und im Gefüge werden hohe Zugspannungen erzeugt. Weil die Zugfestigkeit von Granit und Beton zehnfach geringer als ihre Druckfestigkeit ist, werden Materialeigenschaften optimal für den Zerstörungsprozess genutzt. Bei der Anwendung im Berg- und Spezialtiefbau konnten hohe Löseleistungen bei geringem Energieeinsatz und hoher Selektivität<sup>1</sup> nachgewiesen werden. Erwartet werden Kosteneinsparungen von bis zu 30 % gegenüber konventionellen Bohrmethoden. Durch die wirksame Parametrierung der Entladung erzielen die Forscher Impulsanstiegszeiten<sup>2</sup> unterhalb internationaler Vergleichswerte. Damit können sie EIV-Anlagen auf geringe Impulsenergien und hohe Frequenzen auslegen. Diese Alleinstellung ermöglicht es, Rückbauprozesse fein zu justieren und Emissionen zu minimieren. Elektroden sind als Abtragwerkzeuge frei gestaltbar. Verbunden mit der Selektivität von EIV wird nur so viel Material wie nötig abgetragen, was die Umwelt schont und Kosten spart. EIV ermöglicht zudem eine Maschinisierung.

Im Forschungsprojekt wurden die Grundlagen für die schrittweise Übertragung des in bergmännischen Dimensionen bereits umgesetzten elektrodynamischen Elektro-Impuls-Verfahrens (EIV) auf einen emissionsarmen und selektiven Materialabtrag in sensiblen Bereichen des Hoch-, Tief- und Ingenieurbaus erforscht.

Dazu werden 1.) die Anforderungen an eine Adaption der EIV-Technologie aus baubetrieblicher Sicht definiert, 2.) wirtschaftliche Potenziale der Technologie und deren konkrete Randbedingungen im Hoch-, Tief-, und Ingenieurbau analysiert, 3.) die elektrische Stoffcharakteristik gängiger Baumaterialien für die Generatorauslegung untersucht, 4.) ein Demonstrator für bauäquivalente Prozesse der Werkzeugführung (Flächenabtrag, Aussparen, Schlitzen) aufgebaut und die nötige Ausführungsqualität und -leistung nachgewiesen, 5.) die EIV-Technologie aus Sicht der Arbeitsphysiologie und Arbeitssicherheit analysiert, 6.) alle Ergebnisse zusammengeführt und Konzepte für EIV-Rückbaugeräte erarbeitet. Im Rahmen des

---

<sup>1</sup> Die Selektivität beschreibt bei Rückbaumaßnahmen die Trennung von zurückzubauenden Baustoffen auf der Baustelle.

<sup>2</sup> Benötigte Zeit bis der elektrische Impuls die gewünschte Impulsenergie erreicht.

---

Forschungsprojektes wurde stellenweise auf die Ergebnisse der „Bewertungsmatrix für die Kostenplanung beim Abbruch und Bauen im Bestand – Datenbanksystem zur Analyse und Bewertung in Bezug auf Kosten, Technologie und Dauern“ mit dem Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-13.21 zurückgegriffen.

Als entscheidende Verwertungskriterien wurden im Projekt die breit gefächerten Vorzüge gegenüber konventionellen Rückbauverfahren und eine damit verbundene deutliche Steigerung von Produktivität, Wirtschaftlichkeit, Qualität und Umweltschutz nachgewiesen. Bei einer positiven Machbarkeit für Baustellenanforderungen sollen die Forschung und Entwicklung in anwendungsbezogenen Kooperationen weitergeführt werden. EIV verspricht die Kombination von Effizienz und Selektivität in einem Verfahren. Daher bringt die technologische Verknüpfung mit ebenso selektiven Sanierungsverfahren einen Mehrwert. Hieraus ergeben sich Vorzüge für die deutsche Bauwirtschaft, die zu einer Alleinstellung im Umfeld moderner Bautechnologien führen kann.

## 2 Elektro-Impuls-Verfahren

### 2.1 Stand der EIV-Technik

Bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde das EIV in der ehemaligen Sowjetunion erforscht und entwickelt. Das Potenzial der Technologie für die Bearbeitung von Hartgestein wurde entdeckt und die Forschung in diesem Bereich intensiviert.

Mit dem EIV lassen sich in der Bohrtechnik besonders harte Stoffe, wie beispielsweise Granit, Erz oder hochfester Beton wirtschaftlich abtragen und zerkleinern. Dabei beruht die zerstörende Wirkung nicht auf einem mechanischen Krafteintrag, sondern auf Hochspannungsimpulsen, welche über eine Elektrodenanordnung in das Material eingetragen werden. Durch den Impuls wird der Stoff entgegen der gängigen Verfahren auf Zug statt auf Druck beansprucht. Es baut sich ein elektrisches Feld zwischen den beiden Elektroden auf, welches zur Ionisation der Prozessumgebung, also dem Gestein und dem umgebenden Dielektrikum führt. Unter Ionisation ist das Herauslösen von Ladungsträgern aus ihrer Bindung durch ein starkes elektrisches Feld zu verstehen. Die Kraftwirkung innerhalb des Feldes sorgt dafür, dass die freien Ladungsträger zur Bewegung angeregt werden, mit anderen Teilchen kollidieren und dabei wiederum neue Ladungsträger aus ihrer Bindung herauslösen [KÜCH2009].

Die daraus folgende schlagartige Temperatur- und Druckerhöhung im Durchschlagskanal führt dazu, dass die Zugfestigkeit des Gesteins überwunden wird und ein Spröbruch mit einhergehendem Materialabtrag entsteht. Die Zugfestigkeit kann unter normalen Bedingungen mit einer sehr geringen spezifischen Energie überwunden werden, da sie nur ca. 10 % der Druckfestigkeit beträgt. Die Voraussetzung für einen Materialabtrag ist die Entladung innerhalb des zu lösenden Gesteins. Dafür ist es unbedingt erforderlich, dass die beiden Elektroden unmittelbar auf dem Gestein aufliegen und der Prozessraum von einem flüssigen Medium umschlossen ist, das eine höhere elektrische Festigkeit (Durchschlagfestigkeit) als das Gestein aufweist. Unter elektrischer Festigkeit ist die Fähigkeit eines Stoffes, einer elektrischen Belastung einen Widerstand entgegenzusetzen, zu verstehen. Je höher die elektrische Festigkeit ist, desto größere elektrische Belastungen sind notwendig, damit der Durchschlag durch das Material erfolgt. Allgemein gilt, dass die elektrische Festigkeit von Feststoffen größer ist als die von Flüssigkeiten und die wiederum ist größer als die von gasförmigen Stoffen. Die elektrische Festigkeit der Stoffe ändert sich jedoch in Abhängigkeit der Belastungszeit. Im Allgemeinen verfügen die Stoffe bei kurzen Belastungszeiten über eine höhere elektrische Festigkeit. Bei Flüssigkeiten ist dieses Verhalten stärker als bei Feststoffen. Erfolgt die Spannungsexposition in hinreichend kleinen Zeiten, d. h. im Nanosekundenbereich, steigt die elektrische Festigkeit der Flüssigkeiten rapide an und übersteigt die von Feststoffen. Auf diese Weise erfolgt die Entladung im Feststoff. Dadurch, dass nur ein loser Kontakt zwischen den Elektroden und dem Feststoff herrschen muss, sind für das EIV im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren keine mechanischen Kräfte notwendig.

Das EIV wird seit mehreren Jahren an der Stiftungsprofessur für Baumaschinen der Technischen Universität Dresden erforscht und entwickelt. Basierend auf den Untersuchungen wurden bereits verschiedene Anwendungsgebiete erschlossen. In einigen Forschungsprojekten wurde das EIV zum Einsatz bei Tiefenbohrungen in Hartgestein zum Einsatz für die Geothermie entwickelt und gute Ergebnisse erzielt. Erforscht wurde vorwiegend der Bereich der Tiefbohrtechnik bis 5.000 m. Dort sind die mechanischen Bohrverfahren dadurch limitiert, dass sie den Stein nur spaltend oder schädigend lösen können. Zudem werden die Bohrwerkzeuge für große Tiefen im Gegensatz zu konventionellen Bohrhämmern nicht durch eine Schlagbewegung angeregt, sondern arbeiten nur mit einer quasistatischen Andruckkraft gegen die Druckfestigkeit des Gesteins. Durch das Prinzip des EIV wird die zerstörende Wirkung ins Innere des Gesteins verlagert und das Lösen des Gesteins erfolgt deutlich energieeffizienter. Am Beispiel eines Werkzeuges für einen Bohrdurchmesser von 12 ¼ Zoll (circa 331 mm) konnte die Steigerung der Effizienz deutlich gezeigt werden. Konventionelle Meißel arbeiten beispielsweise mit einer spezifischen Löseenergie von 600 J/cm<sup>3</sup> bis 2.000 J/cm<sup>3</sup> in ölbasischen Bohrspülungen. Beim EIV wurde in den Bohrversuchen eine spezifische Löseenergie von etwa 200 J/cm<sup>3</sup> erreicht. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass es sich bei den besonders effizienten

Meißeln um die derzeit leistungsfähigsten Werkzeuge im Bereich der Tiefbohrtechnik handelt. Die Effizienz der Meißel ist jedoch vom Verschleiß abhängig. Das heißt, dass der durch den Verschleiß bedingte Verlust der Effizienz und die damit einhergehende Veränderung der idealen Schneidgeometrie zu einem deutlichen Anstieg der spezifischen Löseenergie führt. Zudem ist die Lebensdauer der mechanischen Bohrwerkzeuge in der Regel auf weniger als 100 h begrenzt, wohingegen die Bohrelektroden quasi nicht verschleifen. Die limitierenden Komponenten des EIV-Bohrsystems sind derzeit die Kondensatoren, deren Lebensdauer derzeit 350 h beträgt.

Das gesamte Bohrsystem ist in Abbildung 1 dargestellt. Da in der Bohrtechnik das Verlegen eines hochspannungsführenden Kabels im Bohrstrang nicht akzeptiert wird, werden alle zum Bohren mit dem EIV benötigten Komponenten im Bohrloch platziert.

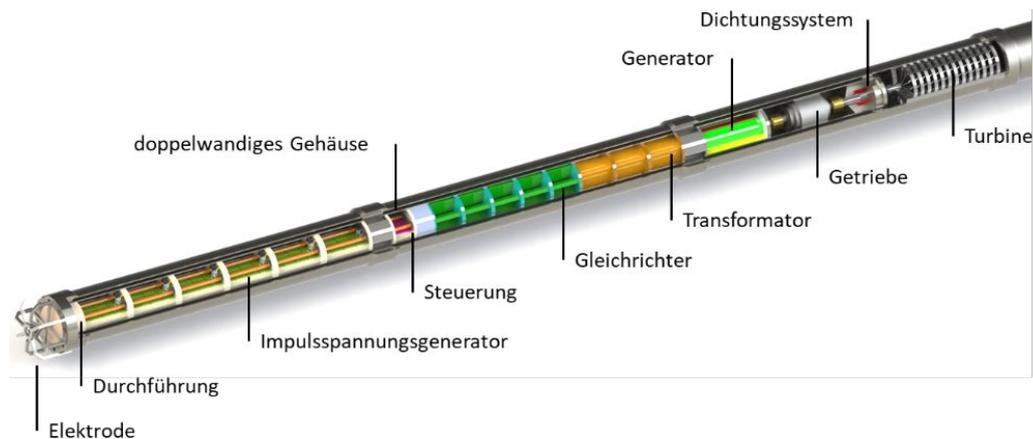


Abbildung 1: EIV-Bohrsystem Tiefbohrtechnik [WILL2019]

Die maximale Leistungsaufnahme des EIV-Bohrsystems beträgt etwa 25 kW. Damit kann eine Bohrgeschwindigkeit von 1 m/h erreicht werden. Die Geschwindigkeit ist vergleichbar mit konventionellen mechanischen Bohrwerkzeugen, welche jedoch eine Antriebsleistung von circa 100 kW zum Erreichen dieser Bohrgeschwindigkeit benötigen.

In weiteren Projekten wurden zudem die Impulsspannungsgeneratoren und Bohrköpfe für Flachbohrungen entwickelt. Ein weiteres Anwendungsgebiet des EIV ist die Aufbereitung, Schädigung und Zerkleinerung von Erzen, um energieaufwändige mechanische Verfahren zu unterstützen.

## 2.2 Abgrenzung der elektrodynamischen EIV-Lösung

Um einen gezielten Durchschlag im Gestein zu erreichen, werden zwei Elektroden mit unterschiedlichem Potenzial, das Gestein selbst und ein Umgebungsfluid, das als Isolator fungiert, benötigt (Abbildung 2, a). Eine der beiden Elektroden ist geerdet und hat damit ein Potential von null. An die andere Elektrode wird eine hohe Gleichspannung angelegt.

Infolge des nun herrschenden Potentialunterschiedes bildet sich ein elektrisches Feld aus (Abbildung 2, b). Übersteigt die Feldstärke des elektrischen Feldes die Durchschlagfestigkeit des Gesteins, dann bildet sich ein Durchschlagskanal aus (Abbildung 2, c). Dieser dehnt sich schlagartig aus und zerreißt das Gestein von innen heraus. Gesteinsfragmente werden aus der Formation gesprengt. In der umliegenden Formation bilden sich kleine Risse und Vorschädigungen (Abbildung 2, d).

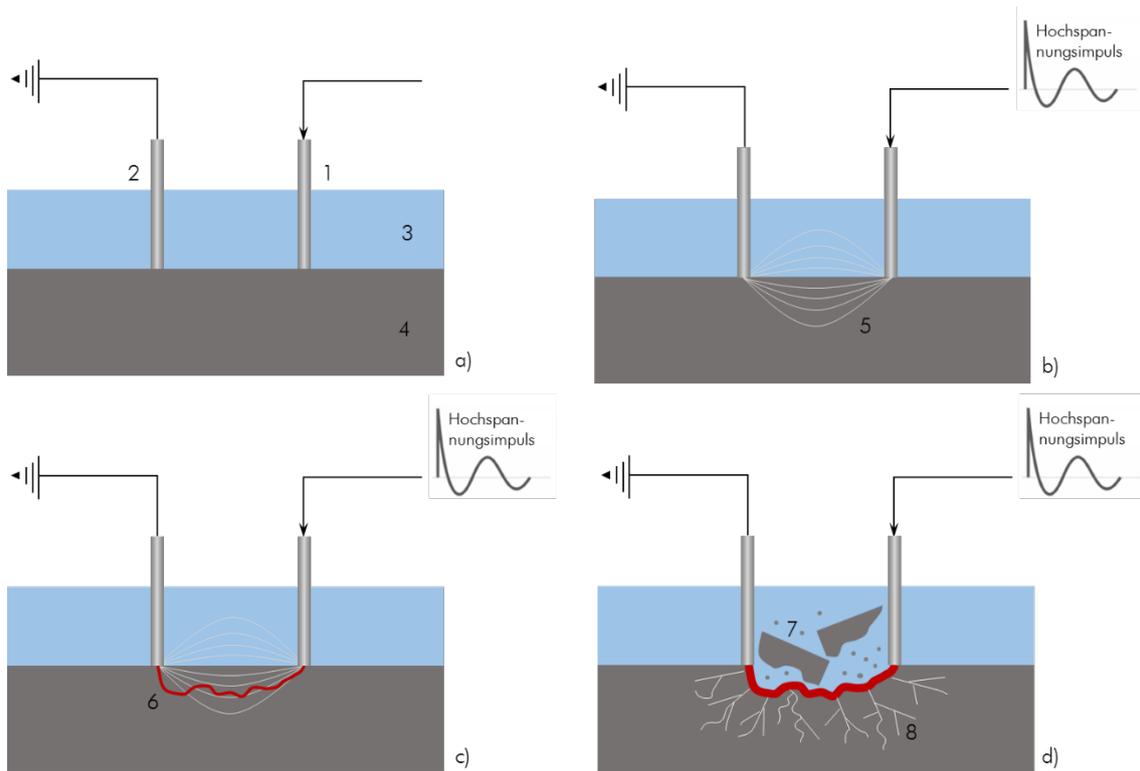


Abbildung 2: Grundprinzip EIV (1 Hochspannungselektrode, 2 Erdelektrode, 3 Spülflüssigkeit, 4 Gestein, 5 elektrisches Feld, 6 Plasmakanal, 7 gelöstes Material, 8 Risse)

Damit es zu einer Entladung im Gestein und nicht im umgebenden Fluid kommt, muss die Durchschlagfestigkeit des Gesteins deutlich geringer als die des Fluides sein. Wie bereits erwähnt, ist die Durchschlagfestigkeit kein konstanter Wert, sondern ist abhängig von der Anstiegszeit. In Abbildung 3 sind die Kennlinien der Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit von der Anstiegszeit schematisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Allgemeinen die Durchschlagfestigkeit von Gestein und Wasser einen Schnittpunkt bei 500 ns hat. Das bedeutet, dass die Durchschlagfestigkeit von Gestein geringer als die von Wasser ist, wenn Anstiegszeiten von unter 500 ns erreicht werden. Öl ist ein Isolator und verfügt über eine sehr hohe Durchschlagfestigkeit. Wäre es möglich, Öl als Umgebungsmedium zu nehmen, würde der Durchschlag immer im Gestein erfolgen.

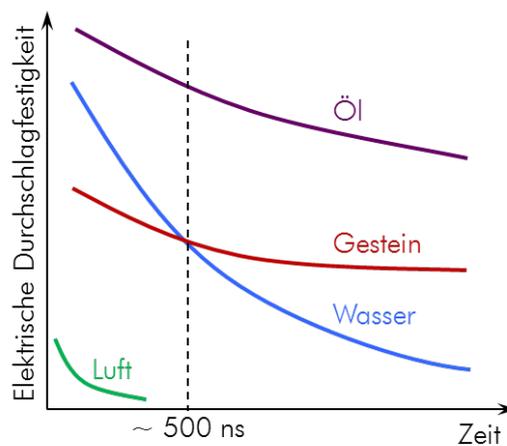


Abbildung 3: Elektrische Durchschlagfestigkeit verschiedener Stoffe nach [BLU2000]

Aus Abbildung 3 ist ebenfalls zu erkennen, dass sobald sich Luft oder Luftblasen in der Nähe der Elektroden befinden, der Durchschlag immer dort erfolgt und es so zu keinem Durchschlag im Gestein mehr kommt.

Beim EIV werden Hartgesteine und Konglomerate mithilfe von Hochspannungsimpulsen zerstört. Ein mehrstufiger Impulsspannungsgenerator erzeugt die dafür notwendigen Hochspannungsimpulse. Dazu werden die Stoßkondensatoren der n-Stufen des Impulsspannungsgenerators parallel mit einer niedrigen Hochspannung aufgeladen. Durch Triggern beziehungsweise das Überschreiten der Zündspannung der Funkenstrecke werden die Kondensatoren in Reihe geschaltet, so dass am Ausgang eine Impulsspannung entsteht, die n-fach höher ist als die Ladespannung der Kondensatoren. Durch eine geeignete Auswahl der Komponenten und Parameter werden die für das EIV notwendigen Impulsparameter (Amplitude, Steilheit) erzielt. Die Impulse werden auf eine Elektrodenanordnung, bestehend aus Hochspannungselektroden und geerdeter Elektrode, geleitet. Diese Elektroden sitzen auf dem zu zerstörenden Material auf und sind von einem flüssigen Dielektrikum umgeben. Bei ausreichender Impulssteilheit und -amplitude findet der Durchschlag im Material statt und zerstört dieses.

Im Bereich der Bohrtechnik und der Aufbereitung von Erzen wird auch das elektrohydraulische Prinzip des EIV anstelle des elektrodynamischen Prinzips verwendet. Während bei dem elektrohydraulischen Prinzip der Spannungsdurchschlag im umgebenden Fluid erfolgt, wird bei dem elektrodynamischen Prinzip der Spannungsdurchschlag im Material realisiert. Indem der Spannungsdurchschlag im Material erfolgt ist es möglich, eine deutlich höhere Löseleistung zu erreichen. Das Material wird nicht nur durch die Druckwelle des Fluides zerstört. Vielmehr wird durch das Anlegen der Elektroden das Material unmittelbar auf Zug beansprucht und aus dem Verbund gelöst. Weiterhin wird die Energie beim elektrodynamischen Prinzip direkt in das Material eingetragen, wohingegen beim elektrohydraulischen Prinzip ein Großteil der Impulsenergie im Prozessraum verloren geht.

### 3 Selektiver Rückbau

Der Anspruch an die Ausführung von Rückbauarbeiten ist in den vergangenen Jahren aufgrund der zunehmenden Vielzahl an Baustoffen und dem steigenden Anteil an Rückbauarbeiten in Bestandsgebäuden gestiegen, um das Material aus dem Rückbau mit einem möglichst sortenreinen und damit hohen Recyclingpotenzial der Wiederverwendung zuzuführen [WEI2013, S. 4]. Als Rückbau werden sämtliche Maßnahmen verstanden, welche zum teilweisen oder vollständigen Abbruch eingesetzt werden, mit dem Ziel die Objekt- oder Raumnutzung zu verbessern sowie dabei die benachbarte und angrenzende Bausubstanz zumindest zeitweise zu erhalten [SCH2015, S. 26]. Vom Gesetzgeber wird ein möglichst geordneter Rückbau gefordert, damit eine größtmögliche Verwertbarkeit der Baustoffe bei der Aufbereitung sichergestellt werden kann [SCH2004, S. 3]. Nicht nur bei Rückbaumaßnahmen, sondern auch in sämtlichen Bereichen des Bauwesens ist darauf zu achten, dass eine stoffliche Trennung der Materialien erfolgt. Anderenfalls können die Forderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) nicht eingehalten werden.

Die Menge des anthropogenen Materiallagers verändert sich fortlaufend. Deutschlandweit fallen jährlich über 200 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfälle aus dem Bauwesen an. Bei einem Abfallaufkommen von insgesamt knapp über 400 Millionen Tonnen in Deutschland stellt dies mehr als die Hälfte dar [STA2017, S. 33]. Jedes Jahr werden beispielsweise circa 30 Millionen Tonnen an Beton zurückgebaut [MÜL2018, S. 182]. Durch die in den letzten Jahren anhaltenden Neubautätigkeiten ist davon auszugehen, dass die Menge in den kommenden Jahren konstant ansteigen wird [BIM2020, S. 29]. In den statistischen Erhebungen der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau wird eine Recyclingquote von 70 Prozent genannt, jedoch wird ein Großteil der ausgebauten Baustoffe keiner hochwertigen Verwertung im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zugeführt [WEI2013, S. 15]. Im Jahr 2004 wurden von 49,6 Millionen Tonnen Recycling-Baustoffen in Deutschland lediglich 4,9 % in der Betonproduktion eingesetzt [WEI2013, S. 15]. Der Großteil der Recycling-Baustoffe wurde als Sekundärrohstoff für Tragschichtmaterial im Straßenbau verwendet und damit einem Downcycling zugeführt.

Beim Rückbau ist darauf zu achten, dass eine sorgfältige Trennung der differierenden Baustofffraktionen wie auch eine möglichst frühzeitige Separierung von Schad- und Störstoffen erfolgt. Einerseits führt eine nachträgliche Sortierung des Baustoffgemisches zu einem deutlich höheren Arbeitsaufwand und andererseits zu einer Qualitätsminderung des Recycling-Materials [WEI2013, S. 4 f.]. Eine Folge ist, dass der konventionelle Abbruch durch das heute am häufigsten eingesetzte Verfahren, den selektiven Abbruch, abgelöst wird. Beim selektiven Abbruch erfolgt eine vorhergehende Beräumung des Abbruchmaterials unter Rücksichtnahme von Forderungen zum sortenreinen Zusammenfassen und Entsorgen [SCH2015, S. 24]. „Hauptzweck eines selektiven Rückbaus ist die Wiederverwertung von Bauteilen sowie die sortenreine Verwertung und Beseitigung der Abfallfraktionen.“ [WEI2013, S. 43] Der selektive Rückbau ist in Vorbereitung auf eine anschließende Verwertung in vielen Fällen kostengünstiger, als es beim teilselktiven oder konventionellen Abbruch der Fall ist [MEE2015, S. 8]. „Im Bauwesen sind für das Produktrecycling der selektive Rückbau und/oder spezielle Rückgabesysteme erforderlich, um unvermischte und unbeschädigte Produkte oder Bauteile zu erhalten. Eine Zwischenlagerung, Säuberung und Reparatur muss sich anschließen. Beim Materialrecycling ist die Rückgewinnung von möglichst sortenreinem Abbruchmaterial der Stoffgruppen Beton, Mauerwerk, Holz und Metall anzustreben.“ [MÜL2018, S. 11]

Weiterhin muss das Abbruchmaterial für eine Aufbereitung möglichst konstant in einer gewissen Menge anfallen. Sofern die Konstanz nicht gegeben ist, müssen die Aufbereitungsprozesse angepasst werden, wodurch gegebenenfalls aufwändigere respektive differierende Aufbereitungstechnologien eingesetzt werden müssen, was wiederum zu erhöhten Kosten führt. Häufig wird das Abbruchmaterial getrennt nach Baustoffen durch Recycling-Unternehmen von unterschiedlichen Abbruchmaßnahmen auf dem Lagerplatz gesammelt, bis eine ausreichende Menge für eine wirtschaftlich sinnvolle Aufbereitung vorliegt.

Das innovative Rückbauverfahren EIV soll im Bereich des selektiven Rückbaus in sensiblen Bereichen eingesetzt werden, um den Forderungen des KrWG nach einer möglichst hochwertigen Verwertung der zurückgebauten Baustoffe nachzukommen. Auf der Baustelle können mineralische Baustoffe voneinander getrennt werden, wodurch aufwändige Aufbereitungsverfahren eingespart werden können.

## 4 Analyse der technisch-technologischen Anforderungen an den selektiven Rückbau

Die Analyse der technisch-technologischen Anforderungen an den selektiven Rückbau spielt eine essenzielle Rolle für den Einsatz des EIV im Rückbau. Das EIV soll im selektiven Rückbau vorwiegend in sensiblen Bereichen eingesetzt werden. Im Bereich der Tiefbohrtechnik hat sich die EIV-Technik verfahrensbedingt unter anderem durch geringe Emissionen und Immissionen als vorteilhaft erwiesen. In sensiblen Bereichen muss sichergestellt werden, dass die Belastung infolge von Erschütterungen, Lärm oder Staub möglichst geringgehalten wird, damit die Arbeit in den umliegenden Räumlichkeiten bzw. der Baustellenumgebung nicht beeinträchtigt wird.

Nachfolgend wird zunächst dargelegt, in welchen Bereichen des Bauwesens der Einsatz des EIV prinzipiell möglich ist. Dabei müssen das Material, die Geometrie sowie die Folgetechnologie in die Betrachtung mit eingebunden werden. Die Rückbautechnologie EIV muss hinsichtlich der Umweltaanforderungen beim Rückbau eingeordnet werden. Nur bei Einhaltung der Umweltaanforderungen ist es möglich, das EIV als Abbruchverfahren zu etablieren. Als Ergebnis der Analyse der technisch-technologischen Anforderungen an den selektiven Rückbau werden potenzielle Anwendungsszenarien für die Verwendung des EIV ausgearbeitet. Diese zeichnen sich insbesondere durch die Forderung des Einsatzes in sensiblen Bereichen aus.

### 4.1 Einsatzgebiete im Hoch-, Tief- und Ingenieurbau

In sämtlichen Bereichen des Bauwesens hat der selektive Rückbau in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Dies liegt vor allem an den Forderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Je nach Bereich des Bauwesens können die Anforderungen hinsichtlich Emission und Immission und damit die Definition sensibler Umgebungen unterschiedlich ausfallen.

Bei Rückbaumaßnahmen im Hochbau sind sensible Bereiche insbesondere beim Rückbau im Bestand anzutreffen. Sofern die Maßnahmen bei laufendem Betrieb der angrenzenden Räumlichkeiten beziehungsweise der angrenzenden Gebäudeteile stattfinden sollen, müssen erhöhte Anforderungen an den Rückbau sowie die Abbruchverfahren erfüllt werden. Im innerstädtischen Bereich ist das Baufeld meist von beengten Platzverhältnissen gekennzeichnet, welche sich auf die Wahl der Rückbautechnologie auswirken. Die Wahl der Rückbautechnologie wird maßgeblich durch Forderungen des Auftraggebers an die Emissionen und Immissionen geprägt.

Beim Rückbau und Umbau von öffentlichen Gebäuden sind insbesondere bei Bildungsbauten, Krankenhäusern, Altersheimen und Pflegeheimen erhöhte Anforderungen an die Rückbautechnologie zu beachten. Eine Staubbelastung und akustische Belastung sind insbesondere in Bereichen von Heimen, sowie Kindergärten und Krankenhäusern möglichst gering zu halten, damit die Arbeiten in den Einrichtungen nicht behindert werden. Stellenweise werden auch beim Rückbau, Umbau und Ausbau von Industrie- oder Produktionshallen erhöhte Anforderungen gestellt, damit die Herstellung / Produktion ohne Einschränkungen fortgeführt werden kann. Die Maschinen und Anlagen dürfen nicht durch Erschütterungen oder Staub in ihrer Funktion beeinflusst werden, da es gegebenenfalls zu Störungen der Fertigung kommen kann. Die Adaption einer neuen Rückbautechnologie für Maßnahmen in sensiblen Bereichen des Hochbaus ist daher sehr zu begrüßen. Die gängigen Rückbautechnologien erfüllen nur bedingt die Anforderungen in sensiblen Bereichen und stellen darüber hinaus teilweise ein Risiko hinsichtlich der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes dar.

Im Ingenieurbau muss sowohl beim Rückbau im Bestand, als auch beim Komplettrückbau darauf geachtet werden, dass materialesektiv und lokal begrenzt gearbeitet wird. Durch die Auswahl der Rückbautechnologie für Maßnahmen des Umbaus (Teilabbruch) oder des Komplettrückbaus muss sichergestellt werden, dass die einzelnen Bauteile bzw. Bauelemente nach und nach zurückgebaut werden, damit die angrenzenden Bauteile

bzw. Bauelemente nicht beschädigt werden. Eine Schädigung dieser kann dazu führen, dass Teile herabstürzen und eine Gefahr für die Beschäftigten darstellen. Bei der Auswahl der Rückbauverfahren muss darüber hinaus der Selektivität eine besondere Bedeutung zukommen, damit die Tragfähigkeit der Konstruktion gewährleistet bleibt. Bauarbeiten im Bestand erfolgen bei Ingenieurbauwerken üblicherweise bei vollständiger respektive teilweiser Nutzung dieser. Wie auch im Bereich des Hochbaus ist für den Ingenieurbau eine neue Rückbautechnologie, welche in sensiblen Bereichen die Selektivität wahrt, von deutlichem Vorteil.

Erhöhte Anforderungen an die Bau- bzw. Rückbauverfahren sind im Tiefbau insbesondere im innerstädtischen Bereich zu berücksichtigen. Die Arbeiten zur Erstellung einer Baugrube ebenso wie die Arbeiten im Bereich von Gräben für Medienleitungen (Trinkwasser, Abwasser, Gas etc.) können bei anstehendem Festgestein einen deutlichen Einfluss auf die umliegenden Gebäude haben. Viele der gängigen Rückbautechnologien im Tiefbau leiten die Energie in Form einer Druckbeanspruchung in die zurückzubauenden Bauteile bzw. Bauelemente ein und können dadurch zu Schäden an Leitungen oder Kabeln führen. Die Übertragung der Energie im Baugrund wirkt sich auf die benachbarten Gebäude in unmittelbarer Umgebung aus und führt zu einer akustischen Belastung der Anwohner sowie zu Erschütterungen. Neben den Immissionen infolge von Staub und Lärm sollte bei Tiefbauarbeiten eine Beweissicherung<sup>3</sup> durchgeführt werden, damit im Streitfall der Nachweis geführt werden kann, ob die Baumaßnahme einen schädigenden Einfluss auf die Nachbarbebauung gehabt hat. Aufgrund der genannten Aspekte ist eine selektive Rückbautechnologie für die sensiblen Bereiche innerstädtischer Baustellen als sinnvoll zu erachten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in den Bereichen Hochbau, Ingenieurbau und Tiefbau ein erhöhter Bedarf an selektiven Rückbautechnologien für Arbeiten in sensiblen Bereichen vorherrscht.

## 4.2 Anforderungen an Material, Geometrie und Folgetechnologie

Bei einer Abbruchmaßnahme können diverse Verfahren eingesetzt werden, um die Arbeiten auszuführen. Bereits in der Arbeitsvorbereitung sollte eine Rückbautechnologie eingeplant werden, welche eine Wiederverwendung des abgebrochenen Materials begünstigt. Die Forderungen nach einem selektiven Abbruch der einzelnen Baustoffe in einem Bestandsbauwerk werden deutlich.

Die Adaption einer neuen Rückbautechnologie bedarf der Untersuchung der auf einer Abbruchmaßnahme anfallenden Materialien respektive Baustoffe ebenso wie der Geometrie dieser. Wie bereits aus Versuchen in der Bohrtechnik für die Tiefengeothermie ersichtlich, eignet sich das EIV insbesondere für den Rückbau von Materialien / Baustoffen mit einer hohen Druckfestigkeit, da diese bei den gängigen Verfahren einen hohen Verschleiß bei einer geringen Leistung verursachen. Vorwiegend wird daher in der nachfolgenden Betrachtung auf den Baustoff Beton eingegangen. Dieser lässt sich in konstruktiven Beton (Stahlbeton und hoch beanspruchten unbewehrten Beton) und nicht-konstruktiven Beton (unbewehrter Beton für geringe Beanspruchungen) unterscheiden.

Die Rückbautechnologie entscheidet auch maßgeblich über die Folgetechnologie (Aufbereitungstechnik), welche eingesetzt werden muss, um das abgebrochene Material einer Wiederverwendung oder einer Verwertung zuzuführen. Die nachfolgende Untersuchung der Folgetechnologie dient als Grundlage zur Einschätzung / Bewertung des mittels EIV gelösten Materials für die Wiederverwendung bzw. Verwertung.

### 4.2.1 Material und Geometrie

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die Materialien näher betrachtet, welche überwiegend bei Rückbaumaßnahmen im Bauwesen anfallen. Im Jahr 2016 sind rund 59 Millionen Tonnen Bauschutt, bestehend aus mineralischen Abfällen wie Beton, Ziegel, Kalksandstein und Keramik, angefallen. Nachfolgend

---

<sup>3</sup> Erhebung des IST-Zustandes vor Beginn der Bauarbeiten.

werden daher die für den Rückbau essentiellen Materialien Beton und Mauerwerk vertiefend betrachtet [VDI2019, S. 11].

Beton ist ein Kompositbaustoff, bestehend aus einer Gesteinskörnung und dem Zement als Mörtelbestandteil. Bei der Aufbereitung des rückgebauten Betons zu einem Korngemisch wird der Kompositbaustoff in unterschiedliche Partikel getrennt. Dabei können nahezu zementfreie Partikel, jedoch auch praktisch reine Mörtelpartikel erzeugt werden. Dies führt dazu, dass nach der Aufbereitung ein Korngemisch mit Partikeln vorliegt, welches einen unterschiedlichen Zementsteingehalt aufweist [MÜL2018, S. 182]. Es muss nach der Aufbereitung des Betons darauf geachtet werden, dass durch ein sorgfältiges Mischen der Partikel ebenso wie durch eine sorgfältige Probenteilung jede Recyclingcharge nahezu den gleichen Zementsteingehalt aufweist [MÜL2018, S. 184].

Die Zementbestandteile des rückgewonnenen Betons sind nicht inert und demzufolge auch nicht das Rezyklat, welches nach der Aufbereitung als Zuschlagstoff in einem Recyclingbeton eingesetzt werden soll. Die Reaktionen der Zementsteinbestandteile werden durch eine hohe Porosität und eine große Oberfläche begünstigt [MÜL2018, S. 186]. Sowohl die Druckfestigkeit als auch der Elastizitätsmodul sind wichtige Bemessungsgrößen von Betonen und werden bei der Herstellung von Recyclingbeton durch den Eintrag von altem Zementstein massiv beeinflusst [MÜL2018, S. 189]. Daher ist es zwingend erforderlich, einen möglichst genauen Zementsteingehalt der rückgebauten und aufbereiteten Betone für die Rezeptur von Recyclingbetonen zu ermitteln.

Im Bauwesen wurden in den vergangenen Jahren vermehrt moderne Verbundtechniken und Mischbauweisen genutzt, um verbesserte Baustoffeigenschaften zu realisieren. Dabei wurden in vielen Fällen die Baustoffe Beton und Mauerwerk miteinander verbunden. Beim Rückbau von kompletten Bauwerken oder auch einzelnen Bauteilen respektive Bauelementen ist es häufig schwierig, die einzelnen Baustofffraktionen vollständig und sortenrein zu erfassen. Weiterhin werden in der Baubranche vermehrt hochfeste Betone, selbstverdichtende Betone, kunststoffmodifizierte Betone sowie faser- und textildbewehrte Betone verwendet, für welche eine Verwendung von Recycling-Baustoffen als Zuschlagstoff in den bestehenden Zulassungsregelungen nahezu ausgeschlossen ist [BIM2020, S. 29].

Neben der materialspezifischen Selektion der Baustoffe auf einer Abbruchmaßnahme spielt die Geometrie der aus dem Verbund gelösten Baustoffe eine wichtige Rolle. Der Aufwand der Folgetechnologie kann gesenkt werden, indem der Recycling-Baustoff bereits eine günstige Geometrie für die erneute Verwendung aufweist. Dabei spielt die Abbruchtechnik eine wichtige Rolle. Bei der Demontage ganzer Bauteile bzw. Bauelemente sind gegebenenfalls mehrere zusätzliche Verfahrensschritte notwendig, bevor der Baustoff einer regulären Aufbereitung zugeführt werden kann. Mittels der Anbaugeräte Abbruchzange, Hydraulikhammer und Abbruchfräse wird die Geometrie des Baustoffes in der Regel begünstigt und ein zusätzlicher Verfahrensschritt<sup>4</sup> ist nicht notwendig. Neben der Geometrie des aus dem Verbund gelösten Materials ist auch die Geometrie und Beschaffenheit des im Verbund verbleibenden Materials von Bedeutung. In Abhängigkeit des Zweckes der Öffnung beziehungsweise der Oberflächenbehandlung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird untersucht, welche Anforderungen ein rezyklierter Baustoff erfüllen muss, damit dieser für einen konstruktiven Beton, einen nicht konstruktiven Beton oder für die Herstellung von Mauerwerk als Sekundärrohstoff<sup>5</sup> wiederverwendet werden kann. Diese Grundlagen werden für die Untersuchungen herangezogen und dienen als Orientierung für weiteren Forschungsbedarf.

---

<sup>4</sup> Ein Vorbrecher ist nicht zwingend erforderlich, wenn durch die Verfahrenswahl bereits auf der Baustelle eine geringe Korngröße realisiert werden kann.

<sup>5</sup> Sekundärrohstoffe werden durch Aufbereitung von Primärrohstoffen gewonnen und dienen bei der erneuten Verwendung als Ersatz für einen Primärrohstoff.

#### 4.2.1.1 Konstruktiver Beton

Es besteht die Möglichkeit, rezyklierte Gesteinskörnungen für die Herstellung von Betonen bis hin zur Druckfestigkeitsklasse C30/37 zu nutzen. Ausgeschlossen ist die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung bei der Herstellung von Bauteilen aus Leichtbeton oder Spannbeton. Die nachfolgenden Prämissen gelten für den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in einem konstruktiven Beton, womit auch gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung und der Einsatzgebiete des Betons einhergehen [MÜL2018, S. 212]:

- Keine differierenden Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitung und den Eigenschaften zu einem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung.
- Je nach Einsatzgebiet gelten die Bemessungsnormen für Normalbeton.
- Die Dauerhaftigkeit muss sichergestellt sein.

Insgesamt basieren die Anforderungen, welche an die rezyklierte Gesteinskörnung für den Einsatz im konstruktiven Beton gestellt werden, auf den Anforderungen für natürliche Gesteinskörnungen und werden um die nachfolgenden Spezifika ergänzt [MÜL2018, S. 212 f.]:

- Mindestgehalt für betonstämmige und natürliche Gesteinskörnung von 90 Masseprozent für Betonsplitt Typ 1 und 70 Masseprozent für Bauwerksplitt Typ 2 ist einzuhalten,
- begrenzte Anteile von Chloriden und Sulfaten,
- Nachweis der Rohdichte und der Wasseraufnahmefähigkeit,
- Frost-Tau-Wechsel-Widerstand,
- lediglich Verwendung von Gesteinskörnung > 2 mm.

In Tabelle 1 sind die geltenden Anforderungen für den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Beton gemäß DIN EN 12620, DIN EN 4226-101, DIN EN 4226-102 und DIN 1045-2 zusammengefasst. An dieser Stelle wird auf eine nähere Betrachtung der Recyclinggesteinskörnung des Typ 3 und Typ 4 verzichtet, da diese nur für Beton außerhalb der DIN 1045-2 verwendet werden dürfen.

Tabelle 1: Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung [DIN EN 12620, DIN EN 4226-101, DIN EN 4226-102, DIN 1045-2]

6		Anforderungen		
		Einheit	Typ 1: Betonsplitt	Typ 2: Bauwerksplitt
<b>Materialbestandteile</b>				
<b>Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton</b>	<b>Rc</b>	[Masse-%]	$Rc + Ru \geq 90$	$Rc + Ru \geq 70$
<b>Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung</b>	<b>Ru</b>			
<b>Mauerziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton</b>	<b>Rb</b>	[Masse-%]	$\leq 10$	$\leq 30$
<b>bitumenhaltige Materialien</b>	<b>Ra</b>	[Masse-%]	$\leq 1$	$\leq 1$
<b>Glas</b>	<b>Rg</b>	[Masse-%]	$Rg + X \leq 1$	$Rg + X \leq 2$
<b>Sonstige Materialien: Bindige Materialien, Ton und Boden Verschiedene sonstige Materialien: (eisenhaltige und nicht eisenhaltige) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips</b>	<b>X</b>			
<b>Schwimmendes Material im Volumen</b>		[cm <sup>3</sup> /kg]	$\leq 2$	$\leq 2$
<b>Säurelösliches Chlorid</b>		[Masse-%]	$\leq 0,04$	
<b>Säurelösliches Sulfat</b>		[Masse-%]	$\leq 0,8$	
<b>Wasserlösliches Sulfat</b>		[Masse-%]	$\leq 0,2$	
<b>Rohdichte auf ofentrockener Basis</b>		[cm <sup>3</sup> /kg]	$\geq 2000 \pm 150$	$\geq 2000 \pm 150$
<b>Wasseraufnahme nach 10 min</b>		[Masse-%]	$\leq 10$	$\leq 15$
<b>Frost-Tau-Widerstand, Absplitterungen &lt; 2 mm der Fraktion 4/16 mm</b>		[Masse-%]	$< 4$	

Die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung bei der Betonherstellung ist des Weiteren auch vom Korrosions- und Angriffsrisiko der Umgebung abhängig. Die Anspruchsarten in den gängigen Normen sind die Expositionsklassen und die Feuchtigkeitsklassen. Der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung ist nur in Expositionsklassen mit einem geringen oder moderaten Korrosions- sowie Angriffsrisiko möglich, welche nachfolgend aufgeführt werden:

- X0 – ohne Bewehrung und alle Umgebungsbedingungen, außer XF, XA, XM,
- XC – Bewehrungskorrosion infolge des Absinkens des pH-Wertes durch Carbonatisierung, welche durch das Einwirken von CO<sub>2</sub> der Atmosphäre bei ausreichender Feuchtigkeit zustande kommt:
  - XC1 – trocken oder ständig nass,
  - XC2 – nass, selten trocken,
  - XC3 – mäßige Feuchte,

<sup>6</sup> Deutsches Institut für Normung e. V. (2017a).

- XC4 – wechselnd nass und trocken.
- XF – Betonangriff durch Frost-Tau-Wechsel mit und ohne Taumittel bei ausreichender Feuchtigkeit:
  - XF1 – mäßige Wassersättigung ohne Taumittel,
  - XF3 – hohe Wassersättigung, ohne Taumittel.
- XA – Betonkorrosion durch aggressive chemische Medien, die aus natürlichen Böden, Grundwasser oder Abwasser stammen können:
  - XA1 - chemisch schwach angreifende Umgebung.

In Abhängigkeit der Feuchtigkeitsklasse und der Expositionsklasse ergeben sich die zulässigen Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser größer 2 mm für die Herstellung von Betonen. Die zulässigen Anteile sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung für die Herstellung von Betonen [nach DEU2019]

Feuchtigkeits- klasse	Expositions- klasse	Betonsplitt Typ 1	Bauwerk- splitt Typ 2
		Anteil [Volumen-% von Gesamtgesteinskörnung]	
WO trocken	Karbonatisierung		
	XC1	≤ 45	≤ 35
WF feucht	X0	≤ 45	≤ 35
	Karbonatisierung		
	XC1	≤ 45	≤ 35
	XC2		
	XC3		
	XC4		
	Frostangriff ohne Taumittel		
	XF1	≤ 35	≤ 25
	XF3		
	Beton mit hohem Wassereindringwiderstand		
	Chemischer Angriff		
	XA1	≤ 25	≤ 25

#### 4.2.1.2 Nicht-konstruktiver Beton

Nicht-konstruktive Betone werden verwendet, um Sauberkeitsschichten oder sehr geringbelastete Fundamente herzustellen, Hohlräume oder Gräben zu verfüllen, Randsteine, Pfosten oder Zaunpfähle zu setzen [MÜL2018, S. 222]. Diese Betone zeichnen sich durch eine geringe Festigkeit aus und die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung bei der Herstellung dieser Betone ist in den meisten Fällen unproblematisch. Je nach Einsatzgebiet muss der Beton eine unterschiedliche Verarbeitbarkeit aufweisen, welche von fließfähig bis hin zu steifer Konsistenz reichen kann.

Im Vergleich zu konstruktivem Beton müssen bei der Herstellung von Betonwaren nicht die Vorschriften hinsichtlich der Eigenschaften der Gesteinskörnungen berücksichtigt werden, vielmehr müssen die Vorschriften bezüglich der Merkmale, welche durch das Produkt erfüllt werden müssen, beachtet werden [MÜL2018, S. 223]. Mauersteine müssen beispielsweise einen statischen Nachweis erfüllen und bauphysikalischen Anforderungen genügen, bevor diese auf dem Markt angeboten werden dürfen. Im Bereich des Mauerwerkbaus werden nur geringe bis mittlere Druckfestigkeiten gefordert, weshalb sich der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen gut zur Herstellung von Mauerwerkssteinen eignet.

Bei der Produktion von Betonfertigteilen ist die Verwendung von 10 Masseprozent an rezyklierter Gesteinskörnung zulässig, sofern diese aus der Fehlcharge der eigenen Produktion stammen. Wenn die rezyklierte Gesteinskörnung nicht aus der eigenen Produktion stammt, sind die zulässigen Anteile geringer. Für solche geringen Mengen an zulässigen Anteilen einer rezyklierten Gesteinskörnung in den Betonfertigteilen, ist der Aufwand für Transport, Lagerung und Dosierung zu hoch, als dass dies wirtschaftlich sinnvoll wäre.

#### 4.2.1.3 Mauerwerk

Mauerwerk besteht zu circa 75 Volumenprozenten aus kleinformatigen Mauerwerkstoffen und zu circa 25 Volumenprozenten aus Mörtel, wobei die Verteilung in Abhängigkeit des Steinformates (Mörtelanteil sinkt mit größerem Steinformat) differieren kann [MÜL2018, S. 231]. Beim Rückbau von Mauerwerk fallen neben dem Mörtel und den Mauerwerkstoffen weitere Baustoffe an wie zum Beispiel Innen- und Außenputze. An dieser Stelle soll nicht auf die Mauerwerksteine aus Beton eingegangen werden, da diese bereits bei den nicht konstruktiven Betonen betrachtet worden sind. Vielmehr wird nachfolgend auf Mauerwerkstoffe Ziegel, Kalksandstein und Mischziegel eingegangen. Bereits bei Abbruchmaßnahmen (Total- / Teilabbruch) muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Vermischung der einzelnen Mauerwerksbaustoffe kommt. Eine möglichst hochwertige Wiederverwendung ist nur möglich, wenn eine genaue Kenntnis über den Baustoff und eine sortenreine Trennung besteht.

Die Trennung von Mauerwerkstoffen und den darauf befindlichen Innen- oder Außenputzen stellt eine große Problematik dar. Auch wenn Mauerwerk bereits auf der Baustelle selektiv zurückgebaut wird, muss mittels Aufbereitungsanlagen sichergestellt werden, dass die einzelnen Fraktionen voneinander getrennt werden, sodass diese Fraktionen einer Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung zugeführt werden können. Die granulometrischen Parameter der einzelnen Kornfraktionen werden durch die Aufbereitungsanlagen insbesondere den Brechertyp maßgeblich bestimmt. Dies bedeutet, dass der Mauerabbruch auf der Baustelle möglichst selektiv und so erfolgen sollte, dass der Brecher problemlos beschickt<sup>7</sup> werden kann.

Das Mauerwerk einer Abbruchmaßnahme muss bereits auf der Baustelle getrennt werden, damit der Aufwand zur Aufbereitung und Trennung der einzelnen Materialien nicht zu hoch ausfällt. Die erneute Verwendung ist nur möglich, wenn die Eigenschaften des vorliegenden Mauerwerksbruchs definiert werden können. Weiterhin sind die Materialeigenschaften bei der neuen Rezeptur zu berücksichtigen. Bei der Wiederverwendung von Ziegelbruch für die Herstellung von Mauerwerk muss beispielsweise die saugende Wirkung des Ziegelbruchs berücksichtigt werden.

#### 4.2.2 Folgetechnologie der Materialaufbereitung

Die rückgebauten Baustoffe einer Abbruchmaßnahme sollten möglichst bereits auf der Baustelle sortenrein voneinander getrennt werden. Sofern dies nicht möglich ist, kann das anfallende Baustoffgemisch durch eine entsprechende Folgetechnologie für eine Wiederverwendung aufbereitet werden. An dieser Stelle werden Anlagen für die Bauschutttaufbereitung betrachtet und nicht Anlagen für die Sortierung von Baustellenabfällen. Hintergrund ist, dass im Rahmen des Forschungsprojektes EIV-Bau der Rückbau von mineralischen Baustoffen untersucht werden soll und nicht die Aufbereitung bzw. Sortierung von Bauabfällen.

---

<sup>7</sup> Als Beschickung wird das gleichmäßige Befüllen des Aufgabetrichters einer Brechanlage bezeichnet.

Weiterhin wird verdeutlicht, welcher Arbeitsaufwand durch eine sortenreine Gewinnung der Baustoffe auf einer Abbruchmaßnahme eingespart werden kann.

Als Folgetechnologie werden in der Regel Brechanlagen und Siebmaschinen eingesetzt. Wenn feine Bestandteile aufbereitet werden, kommen darüber hinaus Windsichter zum Einsatz.

Sofern die Baustoffe nicht bereits auf der Baustelle selektiv zurückgebaut wurden, respektive nicht selektiv voneinander getrennt werden konnten, müssen durch die Folgetechnologie die bautechnischen Störstoffe und die Schadstoffe von den anderen noch weiterverwendbaren Bestandteilen getrennt werden. Je selektiver der Rückbau auf einer Baumaßnahme erfolgt, desto besser und mit weniger Aufwand kann die Aufbereitung des Materials durch die Folgetechnologie erfolgen. Wenn die Verbundmaterialien nicht bereits auf der Baustelle selektiv gewonnen werden, müssen diese durch eine Brechanlage voneinander getrennt werden, um diese anschließend sortieren zu können. Primär dienen Aufbereitungsanlagen jedoch dazu, die Sortenreinheit für eine Wiederverwendung oder Wiederverwertung des Sekundärrohstoffes sicherzustellen.

Im weiteren Verlauf wird die Folgetechnologie im Sinn des Kreislaufwirtschaftsgesetzes betrachtet, die notwendig ist, um Betonabbruch zu recyceln und nicht zu „downcyclen“. Altbetone aus einem Totalabbruch oder aus einer Bestandsmaßnahme werden beispielsweise einem Recycling zugeführt, wenn diese erneut für die Betonherstellung von Ortbeton (Transport- bzw. Baustellenbeton) oder für die Produktion von Betonwaren, Betonfertigteilen oder Betonwerksteinen eingesetzt werden [MÜL2018, S. 212]. Durch Zerkleinerung, Klassierung und eine gegebenenfalls stattfindende Sortierung des Aufgabematerials können die granulometrischen Parameter deutlich beeinflusst werden, um ein möglichst hochwertiges Produkt zu erhalten. Es muss zwingend unterschieden werden, ob der rückgebaute Beton (das Rezyklat) als konstruktiver Beton oder als nicht-konstruktiver Beton verwendet werden soll. Für konstruktiven Beton gelten andere Anforderungen als bei nicht-konstruktivem Beton, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert wurde.

#### 4.2.2.1 Zerkleinerung

Die Zerkleinerung in einem Brecher dient im Wesentlichen der Zerkleinerung von großen Materialkonglomeraten. Darüber hinaus können mittels Zerkleinerung die Materialeigenschaften für eine Wiederverwendung bzw. Verwertung begünstigt werden. In Abhängigkeit des aufgegebenen Materials und des herzustellenden RC-Baustoffes muss das Verfahren zur Zerkleinerung angepasst werden. Eine optimale Korngrößenverteilung und Kornform werden dabei ebenso angestrebt wie der Aufschluss von Fremd- und Störstoffen. Bei der Zerkleinerung von rückgebautem Beton wird darüber hinaus beabsichtigt, den Verbund zwischen Zuschlagkorn und Zementstein zu lösen [WEI2013, S. 69]. Es haben sich für die Aufbereitung von rückgebautem Beton zwei Brechertypen auf dem Markt etabliert: Backenbrecher und Prallbrecher. Da der Brecher den ersten Schritt der Folgetechnologie nach dem Rückbau auf der Baustelle darstellt, wird an dieser Stelle erläutert, welches Aufgabegut der Brecher verarbeiten kann und welche Anforderungen das Aufgabegut hinsichtlich der Geometrie, des Materials und der weiteren Aufbereitungsschritte erfüllen muss.

Backenbrecher kommen in der Regel als erste Stufe einer zweistufigen Aufbereitungsanlage und selten als einstufige Aufbereitungsanlage zum Einsatz. Da Backenbrecher eine verhältnismäßig schlechte Zerkleinerung von flachem Aufgabematerial, ein geringes Zerkleinerungsverhältnis und lediglich einen schlechten Aufschluss (z. B. von Bewehrungsseisen) erreichen, werden diese als erste Brechstufe eingesetzt [WEI2013, S. 69]. Ein geringer Brechsandanfall wird bei der Verwendung von Backenbrechern als vorteilhaft angesehen. Durchschnittlich kann mit einem Backenbrecher eine Brechleistung von 200 m<sup>3</sup>/h erreicht werden.

Sowohl bei einer einstufigen Aufbereitung als auch bei einer zweistufigen Aufbereitung kommen Prallbrecher zum Einsatz. Mit einem Prallbrecher lassen sich ein hoher Zerkleinerungsgrad und ein hoher Anteil an Körnern mit einer kubischen Kornform erreichen, wodurch jedoch eine verhältnismäßig hohe Menge an Brechsand anfällt [WEI2013, S. 70]. Durch die hohe Menge an Brechsand ist in staubsensibler Umgebung in der Regel eine zusätzliche Entstaubung sicherzustellen. Durch einen Prallbrecher lässt sich ein guter Aufschluss des Aufgabegutes erreichen. Dies ist bei der Aufgabe von Stahlbeton von großer Bedeutung, um die Bestandteile

Beton und Betonstahl voneinander zu trennen. Die Brechleistung eines Prallbrechers liegt durchschnittlich, bei einer Korngröße des Aufgabeguts zwischen 0 und 80 mm, bei circa 200 m<sup>3</sup>/h [WEI2013, S. 70].

Die Partikeleigenschaften des Ausgangsmaterials werden durch die Zerkleinerung hinsichtlich ihrer Korngröße und Kornform, dem Aufschlussgrad und dem Gefüge der erzeugten Partikel verändert [MÜL2018, S. 80]. Ziel der Zerkleinerung ist es, ein Material herzustellen, welches sich für eine Wiederverwendung eignet. Üblicherweise sollte das Aufgabegut einen Mindestdurchmesser von circa 45 mm haben, da im darauffolgenden Aufbereitungsschritt, der Klassierung, die Korngruppe 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 und 32/45 voneinander getrennt werden.

#### 4.2.2.2 Klassierung

Der Bauschutt sollte idealerweise bereits bei der Rückbaumaßnahme in die einzelnen Fraktionen getrennt werden. Wenn Abbruch- oder Trennverfahren zum Einsatz kommen, welche die einzelnen Bestandteile bereits vollumfänglich aufschließen, kann der Bauschutt ohne vorherige Zerkleinerung der Klassierung zugeführt werden. Das aufgeschlossene Rückbaumaterial sollte dazu ein maximales Größtkorn von 50 mm nicht überschreiten, um die weitere Zerkleinerung als Aufbereitungsprozess einzusparen. Im Idealfall wird Betonschutt zur Aufbereitungsanlage geliefert, welcher aus den Komponenten Zementstein und Naturstein besteht. Durch die Klassierung werden diese beiden Komponenten voneinander getrennt.

Die üblichen Korngruppen, in welche durch die Klassierung getrennt wird, sind 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 und 32/45 mm. Der Anteil > 45 mm wird in der Regel einer erneuten Zerkleinerung zugeführt. Die Korngruppen werden genutzt, um die Korngröße zu begrenzen, Korngrößenverteilungen nach Verwendung zusammenzustellen, eine Abtrennung von Grobanteilen und Feianteilen sicherzustellen.

#### 4.2.2.3 Sortierung

Es besteht die Möglichkeit den Aufbereitungsprozess durch eine Sortieranlage zu ergänzen. Mit einer Sortieranlage wird das Ziel verfolgt weitere Störstoffe aus dem Bauschutt, wie beispielsweise Ziegel-, Eisen- oder Holzanteile, zu entfernen. Auf einer Abbruchmaßnahme (Totalabbruch oder Teilabbruch) kann durch die Wahl der Abbruch- und Trennverfahren sichergestellt werden, dass ein möglichst selektiver Rückbau realisiert wird. Je umfangreicher der selektive Rückbau realisiert wird, desto unwahrscheinlicher ist die Notwendigkeit einer Sortierung bei der Aufbereitung des Bauschutts. Nur in inhomogenen Mengen durchmischten Bauschutts muss nach einer Klassierung noch eine Sortierung erfolgen. Üblicherweise endet die Aufbereitung des Abbruchmaterials nach der Klassierung.

Es gab bereits experimentelle Untersuchungen zur Trennung von Beton und Gips mittels der Setztechnologie als eine Variante der Sortierung. Durch das EIV könnte der Gips vom Beton getrennt werden, sodass eine Trennung mittel Sortierverfahren, in diesem Fall mittels Setztechnik, entfallen würden. [WEI2013, S. 78 f.]

### 4.3 Anforderungen durch Umwelt

Die Anforderungen an Abbruchtechnologien durch die Umwelt sind geprägt von den Immissionen und Emissionen. Im Bauwesen wird wie auch in der Umwelttechnik zwischen der Emission und der Immission unterschieden. Bei der Emission handelt es sich ganz allgemein um Belastungen durch Ausstoß gasförmiger oder fester Stoffe ebenso wie nichtstoffliche Belastungen wie Strahlungen oder Schall, welche von einem Emittenten (Sender) ausgehen. Im Gegensatz zur Emission wird bei der Immission die Einwirkung der genannten Belastungen auf Organismen oder Gegenstände verstanden. Immissionen und Emissionen haben einen großen Einfluss auf den Gesundheitsschutz und die Arbeitssicherheit, weshalb diese auf der Baustelle stets innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten werden müssen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird eine Adaption des EIV als Rückbautechnologie untersucht, weswegen die allgemeinen Anforderungen durch die Umwelt anhand der nachfolgenden Emissionen bzw. Immissionen definiert werden:

- Staub,
- Splitter und Trümmer,

- Feuchtigkeit,
- Lärm,
- Erschütterung und
- Abgase.

Nachfolgend wird dezidiert auf die vorgenannten Anforderungen in Form von Emissionen und Immissionen eingegangen. Im Kapitel 8 wird weiterführend die Auswirkung der bei EIV verwendeten Hochspannung im Kontext von Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz, regulatorische Rahmenbedingungen, elektromagnetische Verträglichkeit sowie der arbeitsphysiologischen Tragweite der Adaption von EIV als Rückbautechnologie im Bauwesen behandelt.

#### 4.3.1 Staub

Bei den meisten Abbrucharbeiten ist die Staubentwicklung unvermeidlich und wird üblicherweise durch das Auseinanderbrechen mineralischer Baustoffe bedingt [SCH2015, S. 29]. In der Regel wird die Staubbekämpfung zeitlich unterteilt in Leistungen vor und während der Abbrucharbeiten [SCH2015, S. 29]. Die Staubbekämpfung während der Abbrucharbeiten erfolgt bei den gängigen Abbruchverfahren durch Besprühung des Arbeitsbereiches respektive der Arbeitsstelle, durch Wasservernebelung oder durch das Absaugen der Luft an der Arbeitsstelle. Auch eine Kombination von Besprühen, Verneblung und Absaugen ist möglich.

Durch den Einsatz von Wasser beim direkten Besprühen bzw. der Verneblung wird Feuchtigkeit in den rückgebauten Baustoff und in die noch bestehende Bauwerksstruktur eingetragen. Sofern es sich bei der Baumaßnahme um einen Totalabbruch handelt, hat der Feuchtigkeitseintrag in der Regel keinen negativen Einfluss. Bei einer Baumaßnahme im Bestand ist jedoch darauf zu achten, dass möglichst wenig Feuchtigkeit in die bestehenden Bauwerksstrukturen eingetragen wird, da es andernfalls zu Schäden kommen kann. Bei der Verwendung von Wasser zur Bindung des Staubes bei Abbruchmaßnahme ist der monetäre Aspekt zu berücksichtigen und wird im Rahmen des Forschungsprojektes bei der Bewertung der baubetrieblichen Kriterien vertiefend untersucht. Der Aufwand zur Einhaltung der Anforderungen von Emissionen im Bereich Staub wird von ausführenden Unternehmen als hoch eingestuft [MOT2016, S. 30]. Im weiteren Verlauf werden zunächst die Staubbindung und der Feuchtigkeitseintrag bei einem Totalabbruch und anschließend beim Rückbau im Bestand (Teilabbruch) untersucht.

Bei der Besprühung und bei der Wasservernebelung werden beim Totalabbruch große Mengen an Wasser verbraucht. Der Verbrauch von Staubbindemaschinen (Sprühkanonen) variiert deutlich je nach Wurfweite. Bei einer Wurfweite von 10 bis 15 Metern muss lediglich mit einem Wasserdurchsatz von 10 bis 60 Litern pro Stunde gerechnet werden, wohingegen bei einer Wurfweite von 50 m mit einem Wasserdurchsatz von 1.300 bis 3.600 Litern pro Stunde gerechnet werden muss [AQU2019]. Bei diesem Verfahren wird eine minimale Wassermenge durch Druckluft und Spezialdüsen zerstäubt, wodurch ein feintropfiger Nebel entsteht, der den Staub optimal bindet [SCH2015, S. 31]. Staubbindemaschinen werden in der Regel bei Abbruchverfahren eingesetzt, welche sich durch herabfallende Bauteile auszeichnen, wie beispielsweise das Stemmen, Abgreifen, Pressschneiden, Einschlagen, Eindrücken und Einziehen. Ein weiteres etabliertes Verfahren zur Bekämpfung von Staub beim Totalabbruch ist der Einsatz von Spritzdüsen an den Geräten [MOT2016, S. 28]. Durch dieses Verfahren kann der Staub bereits an seiner Entstehungsstelle durch die direkt am Werkzeug (z. B. Abbruchhammer, Abbruchzange, Pulverisierer) angebrachten Bündeldüsen wirksam niedergehalten werden [SCH2015, S. 30]. Durch die Bündeldüsen ist es möglich, den Wasserverbrauch im Vergleich zu den Staubbindemaschinen zu senken. Die Vorrattanks für das Wasser können sich auch auf dem Hydraulikbagger befinden und fassen bis zu 2 m<sup>3</sup> Wasser, womit ein unabhängiger Betrieb für knapp 4 Stunden möglich ist [SCH2015, S. 261]. Insgesamt führt dies zu einem Wasserverbrauch von circa 500 Litern pro Stunde.

Baumaßnahmen im Bestand zeichnen sich durch erhöhte Anforderungen an den Emissions- und Immissionsschutz aus, da die Arbeiten häufig in geschlossenen Räumen ausgeführt werden. Je nach Abbruch- oder Trennverfahren können lokal begrenzt auftretende Stäube durch das Absaugen an der Arbeitsstelle gut aufgefangen werden. Beim selektiven Rückbau kommt dieses Verfahren unter anderem bei Bohr- und

Betonsägearbeiten zum Einsatz, um den Quarzstaub, welcher zur Staublunge führen kann, gezielt zu sammeln und zu binden. Folgende Arbeitsplatzgrenzwerte gilt es beispielsweise bei mineralischen und quarzhaltigen Stäuben zu berücksichtigen [SCH2015, S. 32]:

- lungengängiger Staub (A-Staub): 1,25 mg/m<sup>3</sup>,
- einatembarer Staub (E-Staub): 10 mg/m<sup>3</sup>,
- quarzhaltige Stäube: 0,05 mg/m<sup>3</sup>.

Viele Trennverfahren beim Bohren und Sägen erreichen durch den Einsatz von Spül- und Kühlflüssigkeiten eine höhere Trennleistung bei einem verminderten Verschleiß und binden darüber hinaus den Staub unmittelbar am Entstehungsort. Einige Verfahren saugen das verwendete Wasser samt gelöster Baustoffe ab und bereiten das Wasser für eine erneute Verwendung auf. Der Wasserbedarf beim Bohren mit Diamant-Bohrkronen wird in Tabelle 3 in Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers zusammengefasst.

Tabelle 3: Wasserverbrauch in Abhängigkeit des Durchmessers der Diamant-Bohrkrone [SCH2015, S. 356]

	Durchmesser Diamant-Bohrkrone [mm]										
	20	30	40	50	70	100	150	200	300	500	800
<b>Maximaler Wasserverbrauch [l/min]</b>	5	5	7	7	9	11	15	18	25	36	50
<b>Minimaler Wasserverbrauch [l/min]</b>	3	3	4	4	5	7	9	12	16	24	33

Die Staubentwicklung bei der Anwendung des EIV ist, bezogen auf den eigentlichen Lösevorgang durch Hochspannungsimpulse, ähnlich zu bewerten wie bei vorgenannten Abbruchverfahren mit Kleingeräten. Durch das beim EIV erforderliche Dielektrikum wird jedoch der Raum zwischen dem rückzubauenden Material und der Umgebung abgetrennt. Üblicherweise erfolgt die Abtrennung über das Dielektrikum Wasser, welches neben der elektrophysikalischen Eigenschaft weiterhin staubbinde Eigenschaften hat. Insofern ist festzustellen, dass die Emission von Staub beim EIV infolge der Abschirmung des Prozessraumes nahezu ausgeschlossen werden. Dies ist ein großer Vorteil im Vergleich zu vielen staubverursachenden Rückbauverfahren.

#### 4.3.2 Splitter und Trümmer

Splitter und Trümmer spielen bei Abbrucharbeiten von großen Bauteilen und großen Fallhöhen eine bedeutende Rolle. Beim selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen bleibt die Entstehung von Splintern und Trümmern auf einen engen Bereich begrenzt, wodurch deren Einfluss als überwiegend problemlos zu betrachten ist. Sofern erhöhte Anforderungen aufgrund von Splintern und Trümmern entstehen, werden Abdeckungen, Absperrungen oder entsprechende Abbruchverfahren eingesetzt [MOT2016, S. 29]. Viele Abbruchverfahren werden unter Verwendung eines Trägergerätes (Hydraulikbagger oder Abbruchmaschine) eingesetzt. Auf Baustellen ist stets ein ausreichender Sicherheitsabstand zu den Trägergeräten einzuhalten. Der ohnehin durch die Trägergeräte einzuhaltenen Sicherheitsabstand genügt in vielen Fällen, um eine ausreichende Sicherheit vor Splintern und Trümmern zu gewährleisten. Typische Anbaugeräte am Trägergerät sind Abbruchhämmer, Abbruchzangen und Pulverisierer. Beim Einsatz eines Abbruchhammers ist damit zu rechnen, dass sich Splitter lösen können, welche eine Gefahr für das Bedienpersonal sowie Dritte darstellen können. Die Entstehung von gefährlichen Splintern ist bei einer Abbruchzange geringer als bei einem Abbruchhammer, jedoch nicht zu unterschätzen. Daher sind die Trägergeräte einer Abbruchmaßnahme mit einem Gitter gegen Trümmer (bei herabfallenden Bauteilen) und mit Scheiben aus Panzerglas gegen Splitter ausgestattet. Das Bedienpersonal muss bei der Verwendung von handgeführten Abbruchhämmern und Abbruchzangen entsprechende PSA tragen. Dies beinhaltet beispielsweise Handschuhe, einen Helm (mit Gesichtsschutz) und eine Schutzbrille.

Bei handgeführten Abbruch- und Trennverfahren kann der Sicherheitsabstand häufig nicht eingehalten werden. Sofern der Einsatz von selbstständig arbeitenden Abbruch- und Trennverfahren unter Einhaltung von Sicherheitsabständen nicht möglich ist, werden direkt an den Geräten entsprechende Anbauten angebracht, um eine ausreichende Sicherheit des Bedienpersonals vor Splintern und Trümmern sicherzustellen. Bei einer Diamantkettensäge ist meist eine Gummimatte angebracht, welche verhindern soll, dass aus dem Bauteil gelöste Splitter ungehindert auf den Unterkörper des Bedienpersonals treffen können.

Verfahrensbedingt kann eine Gefährdung des Bedienpersonals beim Einsatz des EIV im selektiven Rückbau durch Splitter oder Trümmer nahezu ausgeschlossen werden. Sowohl bei einem Anbaugerät für einen Hydraulikbagger respektive einer Abbruchmaschine als auch bei einem handgeführten Gerät ist der Prozessraum stets abgeschlossen und mit einem Dielektrikum gefüllt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde bei der Produktentwicklung geprüft, ob das gelöste Material mit dem Dielektrikum in einem geschlossenen Kreislauf im System verbleibt oder das gelöste Material mit Dielektrikum nach dem Löseprozess auf der Baumaßnahme verbleibt. Die verschiedenen Lösungskonzepte werden in Kapitel 0 zusammengefasst.

#### 4.3.3 Feuchtigkeit

Der Feuchtigkeitseintrag beim Totalabbruch und beim Rückbau im Bestand (Teilabbruch) hängt unmittelbar mit der Art des Rückbauverfahrens zusammen. Beim Totalabbruch spielt der Feuchtigkeitseintrag wie eingangs erläutert eine untergeordnete Rolle, wohingegen bei Rückbaumaßnahmen im Bestand darauf zu achten ist, dass der Feuchtigkeitseintrag möglichst geringgehalten wird. Rückbaumaßnahmen im Bestand sollten so ausgeführt werden, dass die zu erhaltenden Strukturen nicht beschädigt werden. Besonders kritisch ist fließendes Wasser zu betrachten, da dieses bei einer Freispiegelentwässerung schnell in Bereiche eindringt, die weiter entfernt von der Arbeitsstelle sind.

Der Wasserverbrauch beim Rückbau mit dem EIV orientiert sich am Bedarf eines Kernbohrgerätes (vgl. Tabelle 3). Sofern es verfahrenstechnisch möglich ist, soll das benötigte Wasser in einem geschlossenen Wasserkreislauf aufbereitet werden und anschließend erneut dem Prozessraum zugeführt werden. Durch einen geschlossenen Wasserkreislauf kann der Feuchtigkeitseintrag in das Bestandsgebäude minimiert werden. Auf dem Markt gibt es Anbieter, welche eine entsprechende Aufbereitung des mit mineralischen Stoffen kontaminierten Prozesswassers anbieten. Im Rahmen einer Produktentwicklung ist eine vertiefende Betrachtung in Zusammenarbeit mit einem Anbieter für Aufbereitungstechnik sinnvoll.

#### 4.3.4 Lärm

Abbrucharbeiten sind in den meisten Fällen mit Baustellenlärm verbunden. Der Lärm entsteht in unmittelbarer Nähe des Arbeitsplatzes und wirkt sich auf die Nachbarschaft der Baumaßnahme aus. Vom Baustellenlärm am Arbeitsplatz sind vor allem die an der Abbruchmaßnahme beteiligten Personen, welche die Abbruchgeräte bedienen oder sich in direkter Umgebung dieser Geräte aufhalten, betroffen; weiterhin natürlich vorwiegend auch Personen im direkten Umfeld der Baustelle. Dabei spielt die Art der Nutzung eine wichtige Rolle (Gewerbenutzung oder Krankenhaus).

Abbruchunternehmen setzen neben lärmarmen Maschinen auch lärmarme Abbruchverfahren ein, um den Anforderungen gerecht zu werden [MOT2016, S. 28]. Die Lärmemission von Abbrucharbeiten steigt mit zunehmender Nennleistung des Träger- und Abbruchgerätes. Bei einer Nennleistung von 150 kW liegt die Lärmemission im Inneren des Trägergerätes bei circa 71 dB(A) (Schalldruckpegel) und außen bei circa 103 dB(A) (Schalleistungspegel) [MOT2016, S. 39]. In Bezug auf den Einwirkungsort wird in den gesetzlichen Regelungen unterschieden zwischen Baustellenlärm am Arbeitsplatz und Baustellenlärm in der Nachbarschaft.

1. Baustellenlärm am Arbeitsplatz:
  - a. Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV),
  - b. Lärm- und Vibrationschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV),
  - c. Technische Regeln zur Lärm- und Vibrationschutzverordnung (TRLV Lärm).
2. Baustellenlärm in der Nachbarschaft:
  - a. Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG),
  - b. Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung (32. BImSchV),
  - c. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm-Geräuschemission (AVV Baulärm),
  - d. Landesrechtliche Regelungen.

Auf das Thema Lärm wird in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) nur oberflächlich eingegangen. Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) konkretisieren die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung. In der ASR A3.7 wird unter 2 Anwendungsbereich Absatz 1 verdeutlicht, dass diese ASR lediglich für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten und Arbeitsplätzen in Arbeitsräumen gilt und nicht für Baumaßnahmen. Im 2. Kapitel Absatz 2 wird auf die Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) einschließlich der konkretisierenden Technischen Regeln (TRLV Lärm) verwiesen.

Folgendes ist laut § 3 Abs. 1 der ArbStättV bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen und einzuhalten:

„Bei der Beurteilung der Arbeitsbedingungen nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes hat der Arbeitgeber zunächst festzustellen, ob die Beschäftigten Gefährdungen beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten ausgesetzt sind oder ausgesetzt sein können. Ist dies der Fall, hat er alle möglichen Gefährdungen der Sicherheit und der Gesundheit der Beschäftigten zu beurteilen und dabei die Auswirkungen der Arbeitsorganisation und der Arbeitsabläufe in der Arbeitsstätte zu berücksichtigen. Bei der Gefährdungsbeurteilung hat er die physischen und psychologischen Belastungen sowie bei Bildschirmarbeitsplätzen insbesondere die Belastung der Augen oder die Gefährdung des Sehvermögens der Beschäftigten zu berücksichtigen. Entsprechend dem Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung hat der Arbeitgeber Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten gemäß den Vorschriften dieser Verordnung einschließlich ihres Anhangs nach dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene festzulegen. Sonstige gesicherte arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse sind zu berücksichtigen.“ [ArbStättV]

In der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) muss eine Gefährdungsbeurteilung bei Exposition durch Lärm folgende Inhalte umfassen [LÄRM]:

- I. Art, Ausmaß und Dauer der Exposition Lärm,
- II. die Auslösewerte nach § 6 Satz 1 und Expositionswert nach § 8 Abs. 2,
- III. die Verfügbarkeit alternativer Arbeitsmittel und Ausrüstung, die zu einer geringeren Exposition der Beschäftigten führen (Substitutionsprüfung),
- IV. Erkenntnisse aus der arbeitsmedizinischen Vorsorge sowie allgemein zugängliche, veröffentlichte Informationen hierzu,
- V. die zeitliche Ausdehnung der beruflichen Exposition über eine Achtstundenschicht hinaus,
- VI. die Verfügbarkeit und Wirksamkeit von Gehörschutzmitteln,
- VII. Auswirkungen auf die Gesundheit von Beschäftigten, die besonders gefährdeten Gruppen angehören, und
- VIII. Herstellerangaben zu Lärmemissionen.

Der Arbeitgeber hat Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik durchzuführen. Dabei ist die nachfolgende Rangfolge zu berücksichtigen:

1. Die Lärmemission muss am Entstehungsort verhindert oder so weit wie möglich verringert werden. Technische Maßnahmen haben Vorrang vor organisatorischen Maßnahmen.
2. Die Maßnahmen nach Nummer 1 haben Vorrang vor der Verwendung von Gehörschutz nach § 8.

Die Immissionsrichtwerte, welche in der AVV Baulärm aufgeführt sind, müssen je nachdem, in welchem Gebiet sich die Baumaßnahme befindet, eingehalten werden. Zeitlich wird dabei zwischen der Tag- und Nachtzeit unterschieden. In Tabelle 4 werden die Immissionsrichtwerte in Abhängigkeit der Uhrzeit und dem Gebietscharakter aufgeführt.

Tabelle 4: Immissionsrichtwerte der AVV Baulärm

Gebietsbeschreibung nach AVV Baulärm	Immissionsrichtwerte in dB (A)	
	Tagsüber (07:00 bis 20:00 Uhr)	Nachts (20:00 bis 07:00 Uhr)
nur gewerbliche oder industrielle Anlagen; Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonal	70	
vorwiegend gewerbliche Anlagen	65	50
gewerbliche Anlagen und Wohnungen; weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen	60	45
vorwiegend Wohnungen	55	40
ausschließlich Wohnungen	50	35
Krankenhäuser, Kurgebiete sowie Pflegeanstalten	45	30

Die 32. BImSchV setzt die EU-Richtlinie (Richtlinie 2000/14/EG, 2000) in deutsches Recht um und differenziert Geräte und Maschinen, für die Geräuschimmissionsgrenzwerte gelten, und Geräte und Maschinen, die nur der Kennzeichnungspflicht unterliegen. Anhand Tabelle 5 wird der Unterschied verdeutlicht.

Tabelle 5: Differenzierung nach Richtlinie 2000/14/EG [SCH2015, S. 43]

Geräte und Maschinen...	
...für die Geräuschimmissionsgrenzwerte gelten:	...die der Kennzeichnungspflicht unterliegen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bagger,</li> <li>• Bauaufzüge für Materialtransport,</li> <li>• Kompressoren,</li> <li>• Kran und Mobilkran,</li> <li>• Verdichtungsmaschinen,</li> <li>• Planierdrape und Grader.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Verbrennungsmotor betriebene Hubarbeitsbühnen,</li> <li>• Baustellenkreissägen,</li> <li>• Motorkettensägen,</li> <li>• Bohrgeräte,</li> <li>• Abbruchhämmer und Pulverisierer,</li> <li>• Rammausrüstungen.</li> </ul>

Im Rahmen des Forschungsprojektes EIV wurden sowohl Versuche in einem Wasserbecken ohne Abschirmung als auch mit Abschirmung durch einen Prozessraum durchgeführt. Die akustische Belastung ist geringer als die eines Abbruchhammers und kann durch den Prozessraum (Wasser mit einer zusätzlichen Abschirmung) weiter gesenkt werden. Die geltenden Regelungen werden durch das EIV eingehalten, wodurch die akustische Belastung des Bedienpersonals sowie der Nachbarschaft geringgehalten werden kann. Die Schallemission beim EIV erfolgt bei der Erzeugung der Hochspannungsimpulse (Marx-Generator), der Entladung an den Elektroden (Überschlag) sowie dem damit verbundenen Löseprozess des abzubrechenden Materials (Bruchgeräusche). Im Vergleich zu anderen Abbruchverfahren sind die Emissionen eher als gering einzuschätzen.

#### 4.3.5 Erschütterungen

Bei Rückbaumaßnahmen treten Erschütterungen auf, welche durch Baumaschinen, Anbaugeräte, handgeführte Geräte oder durch herabfallende Bauteile hervorgerufen werden. In der Nachbarschaft einer Baumaßnahme sind die Erschütterungen nicht nur akustisch, sondern auch haptisch wahrnehmbar. „Die Erschütterungen werden durch den Boden übertragen und wirken auf benachbarte Bauwerke, erdverlegte Rohrleitungen, Kabel o. Ä.“ [SCH2015 S. 47] Auf der Baustelle sind diese Erschütterungen nicht nur hörbar, sondern können sich durch Vibrationen auf die Beschäftigten übertragen. Vibrationen sind mechanische Schwingungen, welche sich durch Gegenstände auf den menschlichen Körper übertragen und zu einer mittelbaren oder unmittelbaren Gefahr für die Arbeitssicherheit und den Gesundheitsschutz führen können [LÄRM, S. 3]. In der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) wird detailliert beschrieben, welche mechanischen Schwingungen dazu gehören: [LÄRM2020, S. 3]

1. Mechanische Schwingungen, die bei Übertragung auf das Hand-Arm-System des Menschen Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten verursachen oder verursachen können (Hand-Arm-Vibration), insbesondere Knochen- oder Gelenkschäden, Durchblutungsstörungen oder neurologische Erkrankungen, und
2. Mechanische Schwingungen, die bei Übertragung auf den gesamten Körper Gefährdungen für die Gesundheit oder die Sicherheit der Beschäftigten verursachen oder verursachen können (Ganzkörper-Vibrationen, insbesondere Rückenschmerzen und Schädigungen der Wirbelsäule).

In der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) muss eine Gefährdungsbeurteilung bei Exposition durch Vibrationen folgende Inhalte umfassen [LÄRM2020, S. 4]:

- I. Art, Ausmaß und Dauer der Exposition durch Vibration, einschließlich besonderer Arbeitsbedingungen, wie zum Beispiel Tätigkeiten bei niedrigen Temperaturen,
- II. die Expansionsgrenzwerte und Auslösewerte nach § 9 Abs. 1 und 2,
- III. die Verfügbarkeit und die Möglichkeit des Einsatzes alternativer Arbeitsmittel und Ausrüstungen, die zu einer geringeren Exposition der Beschäftigten führen (Substitutionsprüfung),
- IV. Erkenntnisse aus der arbeitsmedizinischen Vorsorge sowie allgemein zugängliche, veröffentlichte Informationen hierzu,
- V. die zeitliche Ausdehnung der beruflichen Exposition über eine Achtstundenschicht hinaus,
- VI. Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit von Beschäftigten, die besonders gefährdeten Gruppen angehören, und
- VII. Herstellerangaben zu Vibrationsemission.

Die verschiedenen Abbruchverfahren haben eine differierende Erschütterungswirkung auf die Baustelle und auf die Nachbarschaft. Durch den Einsatz eines Abbruchhammers kommt es zu Dauererschütterungen, welche durch das Umsetzen des Hammers unterbrochen werden. In der unmittelbaren Nähe können einzelne Stöße und ein Nachschwingen festgestellt werden, wohingegen in einem größeren Abstand gleichmäßige sinusförmige Schwingungen auftreten [SCH2015, S. 48]. Die Erschütterungen durch eine Abbruchzange fallen deutlich geringer aus, als es beim Einsatz des Abbruchhammers der Fall ist. Bei dem Einsatz von Betonfräsen oder Abbruchfräsen kommt es wie beim Abbruchhammer zur Dauererschütterung, welche jedoch vergleichsweise geringer ausfallen.

In der DIN 4150-3 werden Anhaltswerte für die Einhaltung von Erschütterungen angegeben, welche es einzuhalten gilt, um nach den bisher vorliegenden Erfahrungen Schäden an Gebäuden aus Erschütterungen zu vermeiden [SCH2015, S. 50]. In der Anlage ist ein Auszug aus der DIN 4150-3 zu finden, in welchem eine Auflistung der Anhaltswerte zu finden ist. Es wird dabei zwischen der Dauererschütterung und kurzzeitigen Erschütterungen unterschieden. Laut DIN 4150-3 werden kurzzeitige Erschütterungen definiert als „Erschütterungen, deren Häufigkeit des Auftretens nicht ausreicht, um Materialermüdungserscheinungen hervorzurufen, und deren zeitliche Abfolge und Dauer nicht geeignet sind, um in der betroffenen Struktur eine

wesentliche Vergrößerung der Schwingung durch Resonanzerscheinungen zu erzeugen.“ [DIN4150, S. 5] Sämtliche Erschütterungen, die nicht den kurzzeitigen Erschütterungen zugeordnet werden können, werden als Dauererschütterungen bezeichnet.

Erschütterungen sind bei empfindlichen Anlagen und Produktionsstätten so gering wie möglich zu halten. Hierzu zählen unter anderem schwingungsempfindliche Produktions- und Überwachungsanlagen wie beispielsweise [SCH2015, S. 52]:

- Produktionsanlagen für Mikrochips,
- Produktionsanlagen mit chemischen Prozessen,
- Produktionsanlagen mit feinmechanischer Fertigung,
- Datenverarbeitungsanlagen,
- Rechner zur Prozesssteuerung,
- Labors mit Waagen, Mikroskopen und Längenmeseinrichtungen.

Die Grenzwerte, welche es einzuhalten gilt, müssen von den Herstellern beziehungsweise Auftraggebern bestimmt oder individuell abgeleitet werden [SCH2015, S. 52]. Die Anwendung von Anbaugeräten für Minibagger und kleine Abbruchmaschinen zeichnen sich durch vergleichsweise geringe Erschütterungen aus. Es wird nur eine relativ geringe Energie auf das rückzubauende Bauteil oder Bauelement übertragen. Dies betrifft Hydraulikhammer, Abbruchzange, Pulverisierer sowie die Beton- bzw. Abbruchfräse. Die Erschütterungen der Trennverfahren sind im Vergleich dazu vernachlässigbar.

Durch das EIV wird das zu lösende Material auf Zug beansprucht und nicht wie bei den gängigen Rückbautechnologien auf Druck. Dies führt dazu, dass kaum Erschütterungen in das Bauwerk eingetragen und auch kaum Erschütterungen auf das Bedienpersonal übertragen werden. Weiterhin kann die Belastung in der Nachbarschaft durch Erschütterung vermieden werden. Im Vergleich zu den gängigen Rückbauverfahren stellt dies einen deutlichen Vorteil des EIV dar. Hinsichtlich der Erschütterung ist das EIV vergleichbar mit den Trennverfahren wie Bohren und Sägen, welche sich ebenfalls durch sehr geringe Erschütterungen auszeichnen.

**4.3.6 Zusammenfassung**

In Tabelle 6 werden die Emissionen in Form von Staub, Lärm und Erschütterung der gängigen Abbruchverfahren zusammengefasst. Dabei kennzeichnet (-) keine Emissionen, (+) schwache Emissionen, (++) mäßige Emissionen und (+++) starke Emissionen.

Tabelle 6: Emissionen der Abbruchverfahren

Abbruchverfahren	Staub	Lärm	Erschütterungen
Abbruchhammer	++	+++	+++
Abbruchzange/ Abbruchscher	+	+	+
Abgreifen	++	+	+
Einschlagen	+++	+++	+++
Eindrücken	+++	+++	+++
Einziehen	+++	++	+++
Fräsen	+	+	+
EIV	-	+	-

Die Emissionen, bedingt durch die unterschiedlichen Trennverfahren, werden in der Tabelle 7 zusammengefasst, wobei die gleiche Wertung wie bei den Abbruchverfahren gewählt wurde.

Tabelle 7: Emissionen der Trennverfahren

Trennverfahren	Staub	Lärm	Erschütterungen	Hinweise
<b>Sägen</b>	+	+++	-	Wenig Staub, wenn Spül- bzw. Kühlwasser verwendet wird.
<b>Kernbohren</b>	+	+++	-	Wenig Staub, wenn Spül- bzw. Kühlwasser verwendet wird.
<b>hydraulische Verfahren</b>	++	++	-	Staub und Lärm durch Strahl.
<b>thermische Verfahren</b>	++	++	-	Hohe Gefahr durch schlagartige Löseprozesse und hohe Temperaturen.
<b>EIV</b>	-	+	-	Hochspannung und Wasser als Dielektrikum.

Eine Gefährdung der Arbeitskräfte durch Schwingungsbelastungen ist im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung oftmals im Vergleich zu anderen Gefahren nicht das Primärrisiko. Schwingungsbelastungen können weitreichende Folgen nach sich ziehen und sind auf ein Minimum zu reduzieren. Neben Knochen- und Gelenkschäden kann es zu Durchblutungsstörungen in den Händen kommen. Ganzkörperschwingungen können zu vorzeitigen degenerativen Veränderungen der Lendenwirbelsäule und zur Schädigung des Magen-Darm-Trakts führen.

Lärm kann langfristig eine Gehörschädigung, Nervosität, Kopfschmerzen und Konzentrationsverringering zur Folge haben. Abgesehen davon ist unmittelbar bei den Abbrucharbeiten die Verständigung stark beeinträchtigt. Das EIV zeichnet sich durch eine äußerst geringe Schwingungsbelastung aus. Ganzkörperschwingungen entstehen lediglich durch den Hydraulikbagger, wenn dieser umgesetzt oder der Ausleger samt Anbaugerät an eine andere Stelle versetzt wird. Weiterhin ist das EIV als nahezu staubfreies und lärmarmes Abbruchverfahren zu bewerten. Durch die Hochspannungsimpulse wird das zurückzubauende Material aus dem Verbund gelöst. Der dabei entstehende Staub wird durch das im Prozessraum befindliche Dielektrikum Wasser umgehend gebunden.

Durch die vergleichende Betrachtung der Anforderungen hinsichtlich der Umwelt wurden signifikante Vorzüge des EIV im Vergleich zu den gängigen Abbruch- und Trennverfahren aufgezeigt. Die Vorzüge bekräftigen einen Einsatz des EIV im selektiven Rückbau und dieser stellt sowohl für das Bedienpersonal als auch für die unmittelbare Nachbarschaft einer Abbruchmaßnahme deutliche Vorteile dar.

#### 4.4 Ableitung beispielhafter Anwendungsszenarien

Die Anforderungen hinsichtlich der Emissionen und Immissionen wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln thematisiert und finden bei der Ableitung potenzieller Anwendungsszenarien Berücksichtigung. Anhand einer Wichtung der Anforderungen werden potenzielle Anwendungsszenarien für die Rückbautechnologie EIV-Bau herausgearbeitet. Dabei wird aus gerätetechnischer Sicht zwischen handgeführten Kleingeräten und größeren maschinengeführten Anbaugeräten unterschieden. Die EIV Technologie erfordert ein Grundgerät zur Erzeugung der Hochspannungsimpulse (Marx-Generator) und eine gekapselte Haltevorrichtung für die Elektroden, zwischen denen der Spannungsüberschlag erfolgt. Die erforderliche Energie stammt aus dem öffentlichen Stromnetz oder über einen Generator aus Eigenerzeugung.

Ein handgeführtes Gerät soll so konzipiert sein, dass die Energieversorgung möglichst durch einen baustellentypischen Baustromanschluss (Einphasen- oder Dreiphasenwechselstrom) gewährleistet werden kann. Bei einer Spannung von 230 V sollte die Geräteleistung nicht über 2.500 Watt liegen. Aufgrund der arbeitsphysiologischen Rahmenbedingungen sollte das Gesamtgewicht des Gerätes bei maximal 10 bis 15 kg

liegen. Der Einsatz eines handgeführten Gerätes soll auch über einen längeren Zeitraum möglich sein, wodurch das Gesamtgewicht des Gerätes zwingend beschränkt sein muss. Die Bedienung des handgeführten Gerätes sollte sich an jenen eines Abbruchhammers orientieren. Das Grundgerät mit dem darin befindlichen Marx-Generator kann mit Rädern oder Ketten ausgestattet werden, damit es nicht vom Baustellenpersonal gehoben werden muss.

Bei einem Anbaugerät für einen Minibagger oder einer Abbruchmaschine muss sichergestellt sein, dass die Geräteleistung zum Betreiben des Marx-Generators ausreicht. Da bei einer Baumaßnahme im Bestand aufgrund der Platzverhältnisse häufig nur ein Trägergerät mit mehreren Anbaugeräten verwendet wird, sollte das EIV-Anbaugerät möglichst schnell an- und abgebaut werden können. Die Maßgaben der gängigen Hersteller von Schnellwechselsystemen sind diesbezüglich zu berücksichtigen. Zur Nutzung eines Schnellwechselsystems wird auf dem Anbaugerät ein Adapter mit Aufnahmewelle und Riegelplatte befestigt. Das Anbaugerät wird mit einer Aufnahmeklaue ausgestattet. Hydraulische Schnellwechsler sind bereits für Minibagger ab einem Gewicht von einer Tonne erhältlich. Auch die Verwendung von vollhydraulischen Schnellwechslern ist denkbar, sofern das EIV-Anbaugerät einen hydraulischen Anschluss benötigt. Vollhydraulische Schnellwechsler sind erst ab einem Gewicht von zwei Tonnen des Trägergerätes einsetzbar. Es muss noch geprüft werden, welche Leitungen (Stromversorgung, Wasseranschluss, Erdung etc.) bei einem EIV-Anbaugerät angeschlossen werden müssen. Zusätzlich zu einem hydraulischen Anschluss muss gegebenenfalls ein Stromanschluss sowie ein Wasseranschluss (Dielektrikum) für einen Einsatz des EIV sichergestellt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Adaption der innovativen Rückbautechnologie EIV auf den selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen des Bauwesens untersucht. Dies beinhaltet eine Untersuchung der Bereiche Totalabbruch und Teilabbruch. Der Teilabbruch umfasst den Abbruch beziehungsweise den Rückbau von Teilen einer baulichen Anlage. Im Vergleich zum Totalabbruch werden beim Teilabbruch nur Teile einer baulichen Anlage entfernt. Der Bereich des Teilabbruchs untergliedert sich in das Herstellen von Öffnungen, Schlitzfenstern oder den Oberflächenabtrag.

Beim Totalabbruch werden Bauteile, Bauelemente oder Baustoffe (Verbundbaustoffe, Natursteine) komplett zurückgebaut. Ein mögliches Anwendungsszenario für den Einsatz des EIV ist beispielsweise der Rückbau einer einzelnen Wand aus Stahlbeton innerhalb einer Rohbaukonstruktion. Durch das Verfahren muss sichergestellt werden, dass sich der Grenzbereich zum Bestand durch eine klare Kante auszeichnet. Die Bauteilabmessungen sind bei einem solchen Szenario teilweise beträchtlich. Die weitere Betrachtung erfolgt beispielhaft anhand einer Stahlbetonwand mit einer Breite von 500 cm, einer Höhe von 300 cm und einer Tiefe von 20 cm.

Ein weiteres Anwendungsszenario für das EIV beim Totalabbruch ist der selektive Rückbau von im Baugrund befindlichen Hindernissen aus Naturstein oder aus Beton. Im Bereich von Baugruben und Leitungsgräben im innerstädtischen Bereich ist es meist erforderlich, erschütterungs- und lärmarm zu arbeiten. Bei einer hohen Materialfestigkeit sind die gängigen selektiven Abbruchverfahren nicht ausreichend leistungsfähig und demzufolge auch nur bedingt wirtschaftlich einsetzbar. Ein konkretes Beispiel ist ein in einer Baugrube vorkommender Findling oder ein Stahlbetonfundament. Als Anwendungsszenario wird weiterführend ein Stahlbetonfundament mit einer Abmessung von 100 cm Breite, 150 cm Länge und einer Höhe von 75 cm festgelegt.

Wand- und Deckenöffnungen können beim Teilabbruch in unterschiedlicher Größe ausgeführt werden. Maßnahmen geringeren Umfangs zeichnen sich durch Abmessungen von Öffnungen  $\leq 0,5$  m und große Maßnahmen durch Abmessungen  $> 0,5$  m aus. Verfahrensbedingt werden die meisten kleinen Maßnahmen in einer runden Geometrie ausgeführt. Konkrete Anwendungsszenarien für kleine Maßnahmen sind:

- Deckenöffnung für Medienleitungen (Durchmesser 5 cm, Bauteildicke 20 cm),
- Wandöffnung für Medienleitungen (Durchmesser 15 cm, Bauteildicke 20 cm),
- Deckenöffnung für Deckenfenster (Durchmesser 50 cm, Bauteildicke 20 cm),
- Wandvertiefung für Einbauten (Höhe 20 cm, Breite 20 cm, Dicke 20 cm).

Je nach Geometrie und Abmessung kommen unterschiedliche Abbruch- und Trennverfahren zum Einsatz. Ein handgeführtes EIV-Gerät kann ebenso wie ein EIV-Anbaugerät für den Teilabbruch von Wand- und Deckenöffnungen kleinerer Abmessungen genutzt werden. Anwendungsszenarien für Wand- und Deckenöffnungen großer Abmessungen sind:

- Wandöffnung für eine Tür (Breite 120 cm, Höhe 220 cm, Tiefe 20 cm),
- Wandöffnung für ein rechteckiges Fenster (Breite 120 cm, Höhe 100 cm, Tiefe 20 cm),
- Wandöffnung für ein rundes Fenster (Durchmesser 120 cm, Tiefe 20 cm),
- Deckenöffnung für eine Wendeltreppe (Durchmesser 160 cm, Tiefe 20 cm),
- Fundamentvertiefung für Maschine (Breite 200 cm, Länge 300 cm, Tiefe 30 cm).

Bei Maßnahmen im Altbau (Sanierung) erfolgt in der Regel ebenso wie bei Neubauten die Medienführung haustechnischer Anlagen (Stromleitungen, Wasserleitungen usw.) in nachträglich hergestellten Schlitz- und Aussparungen. Typische Wandbaustoffe sind hier Mauerwerk und Stahlbeton. Aufgrund der hohen Festigkeit von Beton können Fräswerkzeuge sowie spezielle Schlitzwerkzeuge nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Bei Stahlbetonbauteilen muss darauf geachtet werden, dass trotz Schlitz eine ausreichende Betondeckung<sup>8</sup> der Bewehrung sichergestellt ist. Als Anwendungsszenario für die beispielhafte weitere Betrachtung wird daher die Herstellung eines Schlitzes über eine Länge von 600 cm mit einer Breite von 5 cm und einer Tiefe von 3 cm betrachtet. Neben Mauerwerk (Kalksandsteinmauerwerk) soll auch der Baustoff Stahlbeton untersucht werden.

Neben den vorgenannten Anwendungsszenarien ist in der Baupraxis weiterhin häufig der flächige Abtrag bei Wand- und Deckenelementen erforderlich. Ursachen sind mangelhafte Oberflächenstrukturen oder Maßhaltigkeit der Konstruktion. Die Orientierung kann dabei horizontal und/oder vertikal sein. Beim Oberflächenabtrag muss sichergestellt sein, dass lediglich die mangelhafte Schicht abgetragen wird, ohne die darunter befindliche Struktur zu beschädigen. Meist werden nur wenige Zentimeter abgetragen. Konkrete beispielhafte Anwendungsszenarien für das EIV sind:

- Oberflächiger Abtrag von Beton aufgrund einer Fehlbetonage (Länge 1.000 cm, Breite 1.000 cm, Tiefe 2 cm),
- Abtrag einer mangelhaften oder beschädigten Beschichtung/Abdichtung (Breite 500 cm, Höhe 300 cm, Tiefe 1 cm),
- Abtrag von Putzen infolge des selektiven Rückbaus (Breite 500 cm, Höhe 300 cm, Tiefe 2 cm).

Die genannten Anwendungsszenarien werden in Tabelle 8 nochmals zusammengefasst. Darin werden die Abmessungen in Durchmesser (D), Länge (L), Breite (B), Tiefe (T) und Höhe (H) angegeben.

---

<sup>8</sup> Die Betondeckung bezeichnet den Abstand zwischen der Oberfläche eines Bewehrungsstabes und der nächstgelegenen Betonoberfläche.

Tabelle 8: Anwendungsszenarien EIV-Bau

Rückbauszenario	Material	Abmessung [cm]					Beispiel
		D	L	B	T	H	
<b>Rückbau Wand</b>	Stahlbeton			500	20	300	Abbruch einer Wand wegen mangelhafter Ausführung
<b>Wand-/Deckenöffnung klein</b>	Stahlbeton	5			20		Deckenöffnung für Medienleitungen
	Stahlbeton	15			25		Kernbohrung für Küchenabluft
	Stahlbeton	50			20		Seilsägeverfahren für Deckenfenster
	Stahlbeton			20	20	20	Wandöffnung für Briefkasten
<b>Wand-/Deckenöffnung groß</b>	Stahlbeton			120	20	220	Wandöffnung für Tür
	Stahlbeton			120	20	100	Wandöffnung für Fenster
	Stahlbeton	120			20		Wandöffnung für rundes Fenster
	Stahlbeton	160			20		Deckenöffnung für Wendeltreppe
	Stahlbeton		300	200	30		Vertiefung Fundament für Maschine
<b>Schlitz</b>	Mauerwerk		600	5	3		Verlegung von Elektroinstallationen (horizontal/vertikal)
	Beton		600	5	3		Verlegung von Elektroinstallationen (horizontal/vertikal)
<b>Oberflächenabtrag horizontal</b>	Stahlbeton		1000	1000	2		Rückbau nach Fehlbetonage
	Beschichtungen		1000	1000	2		Rückbau mangelhafter Beschichtungen auf Stahlbetonoberfläche
<b>Oberflächenabtrag vertikal</b>	Stahlbeton			500	2	300	Rückbau mangelhafter Beschichtungen auf Stahlbetonoberfläche
	Putze		x	500	2	300	vorbereitende Maßnahme zur Trennung der Werkstoffe
	Abdichtungen		x	500	1	300	Rückbau mangelhafter Abdichtungen auf Stahlbetonoberfläche
<b>Rückbau von Baugrundhindernissen</b>	Naturstein		100	150		75	Totalabbruch
	Beton		100	150		75	Totalabbruch

Die herausgearbeiteten Anwendungsszenarien dienen als Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen der wirtschaftlichen Potenziale des EIV. Durch konkrete Anwendungsszenarien kann das EIV mit den herkömmlichen Abbruch- und Trennverfahren verglichen werden.

## 5 Analyse und Bewertung vorhandener Rückbautechnologien

### 5.1 Einordnung der Thematik

Zur Beurteilung der vorhandenen Rückbautechnologien muss zunächst überprüft werden in welcher Form die am Bau beteiligten Personen die Auswahl der Abbruch- und Trennverfahren beeinflussen können. Die Wahl des Abbruchverfahrens steht dem Abbruchunternehmer prinzipiell frei, sofern er die vertraglich vereinbarten Forderungen einhält. Zwar gibt der Bauherr die Rahmenbedingungen des Rückbaus vor, jedoch bestimmt der Abbruchunternehmer durch die Wahl des Abbruchverfahrens den Grad der Selektion des rückzubauenden Objektes maßgeblich [MEE2015, S. 19]. Sowohl bei der Ausschreibung von Rückbaumaßnahmen durch den Bauherrn als auch bei der Wahl des Abbruchverfahrens durch den Auftragnehmer sollte sichergestellt werden, dass ein selektiver und sortenreiner Rückbau auf der Baustelle gewährleistet wird. Eine Baustofftrennung sollte durch die ausführenden Unternehmen bereits auf der Baustelle erfolgen. Eine Qualitätsverbesserung der Recycling-Baustoffe kann maßgeblich erreicht werden, indem bereits in den Ausschreibungsunterlagen eine Kombination von Gebäuderückbau und einer nachgeschalteten Aufbereitungstechnik gefordert wird [SCH2004, S. 2]. Häufig erfolgt eine Trennung der einzelnen Baustofffraktionen erst, wenn diese entweder Schadstoffe enthalten oder einen monetären Mehrwert für den Auftraggeber bzw. Auftragnehmer darstellen.

Bei der Planung einer Abbruchmaßnahme müssen die speziellen Anforderungen benannt und bewertet werden. Spezielle Anforderungen, welche der Planer bei der Ausschreibung von Abbruchmaßnahmen in sensiblen Bereichen zu berücksichtigen hat, sind unter anderem, ob:

- eine ausreichende Tragfähigkeit der Konstruktion bzw. des Bauwerks gegeben ist und nicht durch Erschütterungen beeinflusst werden kann,
- der Rückbau bei laufendem Betrieb (ggf. in unterschiedlichen Etagen / Bereichen) erfolgen muss,
- die Nachbarbebauung geschützt oder gesichert werden muss,
- Schutzmaßnahmen in den umliegenden Bereichen hinsichtlich Staub, Lärm, Feuchtigkeit oder Erschütterungen ergriffen werden müssen.

Der Planer muss sämtliche Unterlagen der Abbruchmaßnahme bewerten und anhand dieser Unterlagen die Leistungen ausschreiben. Die Ausschreibung der Leistungen sollte vollumfänglich erfolgen, um unerwartete Kosten zu vermeiden. Die ausführende Firma kann das Abbruchverfahren und die dabei zum Einsatz kommende Gerätetechnik frei wählen, wenn der Auftraggeber (Bauherr) keine ausschließenden Forderungen in den Vertragsunterlagen aufgeführt hat oder aufgrund einer besonderen Situation die Wahl einer bestimmten Abbruchtechnik nicht möglich ist. Dabei orientiert man sich üblicherweise an den nachfolgenden Aspekten, welche im weiteren Verlauf näher untersucht werden sollen:

- örtliche Bedingungen des Abbruchobjektes,
- Bauwerksteile abrechen nach Art und Dicke des Materials,
- Bauwerksteile trennen nach Art und Dicke des Materials,
- technische Einsatzmöglichkeit von Abbruchverfahren nach der Art und Dicke des Materials.

Der Einsatz des EIV soll insbesondere bei Baumaßnahmen erfolgen, die sich durch erhöhte Anforderungen an die Emission und Immission auszeichnen. Örtlich begrenzte Abbruchmaßnahmen mit ebenfalls begrenzten Abbruchobjekten sind demzufolge Einsatzgebiete für das EIV. Unter den genannten Umständen kann nicht jede Rückbautechnologie eingesetzt werden. In Abhängigkeit der Bauwerksart kommen hauptsächlich nur die in Tabelle 9 aufgeführten Technologien zu Einsatz.

Tabelle 9: Abbruchverfahren für Bauwerke aus mineralischen Baustoffen [SCH2015, S. 174]

<b>Abbruchmaßnahme begrenzt</b>	
<b>Abbruchobjekt begrenzt</b>	
<b>Bauwerksart</b>	<b>Bevorzugte Verfahren und Geräte</b>
Hochbauten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demontage / Hebezeug</li> <li>• Handabbruch</li> <li>• Maschineller Abbruch</li> </ul>
Flachdach- und Hallenbauten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demontage / Hebezeug</li> <li>• Handabbruch</li> <li>• Maschineller Abbruch</li> </ul>
Brücke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demontage / Hebezeug</li> <li>• Sprengen/ Sprengstoff</li> <li>• Handabbruch</li> <li>• Hubtechnik</li> <li>• Fluidtechnik</li> <li>• Maschineller Abbruch</li> </ul>
Turmartige Bauwerke und Maste Industrieschornsteine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Handabbruch</li> <li>• Maschineller Abbruch</li> <li>• Sägen (diamantbesetzt)</li> </ul>
Silos und Behälter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stahlmasse</li> <li>• Maschineller Abbruch</li> <li>• Sägen (diamantbesetzt)</li> <li>• Handabbruch</li> </ul>
Kompakte Bauwerke Fundamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maschineller Abbruch</li> <li>• Quellmittel</li> <li>• Handabbruch</li> <li>• Spaltgerät (hydraulisch)</li> </ul>

Bei einer Rückbaumaßnahme können unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. Allgemein wird zwischen den Abbruchverfahren und den Trennverfahren unterschieden. Nachfolgend werden die Abbruch- und Trennverfahren als wesentlicher Bestandteil der Rückbautechnologie vorgestellt, analysiert und bewertet. Vertiefend werden jene Abbruch- und Trennverfahren betrachtet, welche sich als gängige Verfahren in jenen Bereichen etabliert haben, in welchen eine Adaption des EIV möglich ist. Dies beinhaltet beim maschinellen Rückbau insbesondere die Anbaugeräte für einen Hydraulikbagger sowie beim Handabbruch die handgeführten Geräte, welche vorwiegend beim selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen eingesetzt werden. Durch den Hydraulikbagger bzw. die Abbruchmaschine müssen bei einer Abbruchmaßnahme stets die nachfolgenden Punkte als Grundvoraussetzung eingehalten werden [SCH2015, S. 257 f.]:

- Unterwagen: hohe Standfestigkeit, besonders bei großen Auslegerlängen, durch kleinstmögliche Abmessungen des Auslegers und größtmögliche Abstützfläche,
- Baggerkabine: vergrößerte Dachfenster für Sichtfelderweiterung einschließlich Schutzgitter, Überrollschutz, Steinschlagschutz, Kabinenmonitore zur Sichterweiterung, Rück- und Seitenkamera, Überlastwarneinrichtung.

Meist lassen die Platzverhältnisse der Baumaßnahme den Einsatz von großen Trägergeräten nicht zu und es werden nur Minibagger oder Abbruchmaschinen eingesetzt. Auf die Abbruchverfahren Sprengen, Fluidtechnik, Hubtechnik, Quellmittel wird weiterführend nicht eingegangen, da diese keine konkurrierenden Verfahren zum EIV sind. Im weiteren Verlauf werden Abbruchverfahren und Trennverfahren für

Abbruchmaßnahmen vorgestellt. Dabei spielt die Eignung der Verfahren für einen Einsatz in sensiblen Bereichen eine wichtige Rolle, weshalb dieser Aspekt bei der Betrachtung detailliert untersucht wird.

## 5.2 Abbruchverfahren

Das dominierende Abbruchgerät ist der Hydraulikbagger, da viele Abbruchwerkzeuge hydraulisch arbeiten, eine Schnellwechseleinrichtung in der Regel vorhanden ist, spezielle Auslegersysteme zur Verfügung stehen und hohe Anforderungen an die Arbeitssicherheit durch das Abbruchgerät bereits sichergestellt werden [SCH2015, S. 257]. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die gängigen Abbruchverfahren untersucht. Aufgrund der hohen Bedeutung des selektiven Rückbaus bei Abbrucharbeiten von Gebäuden wird bei der Untersuchung der geeigneten Abbruchverfahren darauf geachtet, dass diese eine möglichst sinnvolle Kreislaufführung der Recycling-Baustoffe ermöglichen. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die handgeführten Abbruch- und Trennwerkzeuge und die Anbaugeräte für Trägergeräte, wie beispielsweise den Hydraulikbagger oder Abbruchmaschinen, gelegt.

Die Abbruchverfahren können einzeln oder in Kombination verwendet werden, um einen möglichst hohen Grad der Selektivität bei einer Abbruchmaßnahme sicherzustellen. Der Rückbau von Bauteilen, Bauelementen sowie ganzer Baukonstruktionen erfolgt bei den Abbruchverfahren mechanisch. Durch die Erzeugung von Biegemomenten, Zug- oder Scherspannung versagt die Konstruktion. Nachfolgend werden die gängigen Abbruchverfahren vorgestellt, welche sich unter anderem für den selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen eignen.

### 5.2.1 Handabbruch

Die Abbruchverfahren, welche unter dem Begriff des Handabbruchs zusammengefasst werden, werden in der gängigen Literatur auch als manuelle Verfahren bezeichnet. Bei dem Handabbruch werden ganze Objekte oder auch nur einzelne Bauteile mithilfe von Handwerkzeugen oder mit manuell bedienten und in den meisten Fällen auch tragbaren Geräten abgebrochen. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu maschinellen Verfahren langsamer und kostenintensiver. Andererseits ist es jedoch möglich, bereichsweise deutlich genauer und selektiver zu arbeiten [WEI2013, S. 47]. Als Handwerkzeuge werden Schaufeln, Vorschlaghammer, Fäustel, Meißel, Keil, Brechstange oder auch Kreuzhacke eingesetzt. Zu den zum Einsatz kommenden motorbetriebenen Geräten gehören außerdem Abbruchhämmer, Bohrhämmer sowie handgeführte Abbruchzangen. In Anbetracht der Tatsache, dass mit dem EIV im Rahmen des Forschungsprojektes unter anderem die Adaption eines neuen Abbruchverfahrens in Form eines handgeführten Gerätes für den Rückbau untersucht werden soll, werden im weiteren Verlauf ausschließlich die handgeführten Geräte des Handabbruchs näher betrachtet.

Grundlegend werden bei handgeführten Abbruchgeräten einzelne Bestandteile aus dem Bauteil bzw. Bauelement herausgelöst. Typische Baumaterialien sind dabei Beton, Naturstein oder Mauerwerk. Beim Handabbruch erfolgt der Rückbau in umgekehrter Reihenfolge zum Aufbau eines Bauwerks. Als Trennverfahren für die Bewehrungsstäbe eines Stahlbetons kommen Bolzenschneider, Sägen oder auch Schneidbrenner zum Einsatz [SCH2015, S. 235]. Um die physische Belastung und das Unfallrisiko zu minimieren, wird der konventionelle Handabbruch mit Geräten in vielerlei Hinsicht von technischer Entwicklungen wie beispielsweise Minibaggern, Kleingeräten und ferngesteuerte Abbruchgeräten u. ä. beeinflusst. In einem weiteren Abschnitt wird auf die maschinellen Abbruchverfahren näher eingegangen und dabei unter anderem ferngesteuerte Abbruchgeräte und die jeweiligen Anbaugeräte vertiefend thematisiert. Die Vor- und Nachteile des Handabbruchs begründen die bevorzugten Einsatzgebiete dieses Abbruchverfahrens. In Tabelle 10 werden diese sowie die daraus begründeten Anwendungsgebiete zusammengefasst.

Tabelle 10: Handabbruch: Vorteile, Nachteile, Anwendungsgebiet [SCH2015, S. 241]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendbarkeit bei begrenzten Abbruchobjekten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringe Arbeitsproduktivität</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatzmöglichkeit in großen Höhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>körperlich schwere Arbeit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>geringer räumlicher Bedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Arbeitskräfte durch Witterungsverhältnisse beeinflusst</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>keine oder nur geringe Beeinflussung angrenzender Bauwerke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Unfallgefahr</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>zerstörungsfreie Wiedergewinnung von Bau- und Ausbaumaterialien</li> </ul>	
Anwendungsgebiete	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>dünne, nicht tragende Bauwerksteile</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erstellung von Trennschlitzten</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teilabbruch von Bauwerken</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abbruch geringer Massen</li> </ul>

Ergänzend zu den in Tabelle 10 aufgeführten Nachteilen ist die Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems bei Verwendung handgeführter Maschinen (insbesondere bei Erschütterungen) als nachteiliger Aspekt des Handabbruchverfahrens hinsichtlich der Gesundheitsgefährdung für die Beschäftigten einer Abbruchmaßnahme zu betrachten. Mit den technisch-wirtschaftlichen Leistungsansätzen des Handabbruchs kann die Nutzleistung<sup>9</sup> des Verfahrens bestimmt werden. Nachfolgend werden die technisch-wirtschaftlichen Daten der Abbruchverfahren des Handabbruchs dargelegt und untersucht.

Am häufigsten kommen beim Handabbruch handgeführte Abbruchwerkzeuge zum Einsatz. Die am weitesten verbreitete Antriebsart von handgeführten Abbruchwerkzeugen ist der Druckluft- oder Hydraulikantrieb. Zur Erreichung eines möglichst hohen Wirkungsgrades werden je nach Materialfestigkeit Spitz-, Flach- oder Keilmeißel bei einem Abbruchhammer verwendet [WEI2013, S. 48]. In der Tabelle 11 wird die Nutzleistung beim Abbruch mit handgeführten Abbruchhämmern<sup>10</sup> dargelegt. Bei dem handgeführten Abbruchhammer handelt es sich um einen elektrischen Abbruchhammer. Die Nutzleistung eines elektrischen Abbruchhammers liegt bei circa 50 % der Nutzleistung eines druckluftbetriebenen Abbruchhammers<sup>11</sup> der gleichen Gewichtsklasse. Die Nutzleistung ist abhängig vom Baustoff und der Festigkeit des Baustoffes. Die Festigkeit wird in N/mm<sup>2</sup> angegeben und bezieht sich beim Mauerwerk auf die Stein- und Mörtelfestigkeit und beim Beton sowie Stahlbeton auf die Enddruckfestigkeit des Betons. Bei der Ermittlung der Nutzleistung stellt sowohl der Fugenanteil im Mauerwerk als auch der Bewehrungsgrad im Stahlbeton eine Besonderheit dar. Darüber hinaus werden die nachfolgenden Eigenschaften der Baustoffarten berücksichtigt, welche die Nutzleistung beeinflussen können. Beim Mauerwerk spielt der Anteil der Fugen eine wichtige Rolle und wird in Tabelle 11 unterteilt in einen Fugenanteile > 15 % und einen Fugenanteil < 15 %. Der Bewehrungsgrad des Stahlbetons spielt bei der Ermittlung der Nutzleistung eine wichtige Rolle und wird daher unterteilt in schwach bewehrt (< 50 kg/m<sup>3</sup>) und in stark bewehrt (> 50 kg/m<sup>3</sup>). Neben dem Bewehrungsgrad ist beim Stahlbeton außerdem die Feingliedrigkeit der Bewehrung zu berücksichtigen. Dabei wird unterschieden, ob es sich bei der Bewehrung um gering feingliedrig verlegte Bewehrungsstäbe (Durchmesser > 12 mm) oder um hoch feingliedrig verlegte Bewehrungsstäbe (Durchmesser < 12 mm) handelt.

<sup>9</sup> „Die Nutzleistung [...] berücksichtigt alle bekannten materialbedingten und technischen Leistungsfaktoren, insbesondere auch die Bedienungs- und Betriebsbedingungen sowie die Geräteausnutzung.“ [GIR2010, S. 12]

<sup>10</sup> Handgeführte Abbruchhammer werden elektrisch betrieben. Dazu wird lediglich ein baustellentypischer Stromanschluss benötigt.

<sup>11</sup> Abbruchhammer, welche mit Druckluft betrieben werden. Die Schlagkraft ist 2- bis 3-fach höher als die von einem handgeführten elektrischen Abbruchhammer.

Tabelle 11: Abbruch mit handgeführten Abbruchhämmern (elektrisch): Nutzleistung [KOR1987]

<b>Baustoff</b>				
<b>Art</b>	<b>Besonderheiten</b>	<b>Festigkeiten</b> (N/mm <sup>2</sup> )	<b>Nutzleistung beim Abbruch</b> <b>(m<sup>3</sup> feste Masse/h)</b>	
			d < 0,3 m	d > 0,3 m
<b>Mauerwerk</b>	viele Kleinfugen (Fugenteil > 15 %)	gering (< 9,5) hoch (9,5 bis 23)	0,50 bis 0,63 0,37 bis 0,50	0,37 bis 0,50 0,31 bis 0,38
	wenige Kleinfugen (Fugenteil < 15 %)	gering (< 9,5) hoch (9,5 bis 23)	0,37 bis 0,50 0,31 bis 0,38	0,31 bis 0,38 0,19 bis 0,31
<b>Beton</b>	keine Bewehrungs- einlagen	gering (< 30) hoch (> 30)	0,37 bis 0,44 0,19 bis 0,28	0,32 bis 0,38 0,19 bis 0,23
<b>Stahlbeton</b> <b>(schwach</b> <b>bewehrt</b> <b>&lt; 50 kg/m<sup>3</sup>)</b>	Bewehrung gering feingliedrig (Durchmesser > 12 mm)	gering (< 30) hoch (> 30)	0,26 bis 0,35 0,21 bis 0,26	0,25 bis 0,32 0,20 bis 0,25
	Bewehrung hoch feingliedrig (Durchmesser < 12 mm)	gering (< 30) hoch (> 30)	0,21 bis 0,38 0,16 bis 0,20	0,20 bis 0,23 0,15 bis 0,18
<b>Stahlbeton</b> <b>(stark bewehrt</b> <b>&gt; 50 kg/m<sup>3</sup>)</b>	Bewehrung gering feingliedrig (Durchmesser > 12 mm)	gering (< 30) hoch (> 30)	0,21 bis 0,25 0,15 bis 0,18	0,20 bis 0,23 0,13 bis 0,16
	Bewehrung hoch feingliedrig (Durchmesser < 12 mm)	gering (< 30) hoch (> 30)	0,08 bis 0,09 0,06 bis 0,08	0,07 bis 0,09 0,06 bis 0,07

Durch einen direkten Vergleich der Nutzleistung des Handabbruchs mit Handwerkzeugen und mit einem druckluftbetriebenen Abbruchhammer können deutliche Leistungsunterschiede festgestellt werden. Wie auch in Tabelle 11 dargestellt werden die Mörtelfestigkeit und der Bewehrungsgrad als Differenzierungsmerkmal berücksichtigt, jedoch wird in Tabelle 12 nicht nach Baustoffarten differenziert, sondern nach Abbruchobjekten. Es ist darauf zu achten, dass die Nutzleistungen von Tabelle 11 und Tabelle 12 unterschiedlich sind. Hintergrund ist, dass in Tabelle 11 die Nutzleistung eines elektrischen Abbruchhammers und in Tabelle 12 die Nutzleistung eines druckluftbetriebenen Abbruchhammers aufgeführt sind.

Tabelle 12: Vergleich der Nutzleistung Handabbruch zwischen Handwerkszeug und druckluftbetriebenem Abbruchhammer [KOR1987]

Abbruchobjekt	Nutzleistung (m <sup>3</sup> /h AK)	
	Handwerkzeug	Abbruchhammer
<b>Mauerwerk (Dicke &gt; 200 mm)</b>		
- Ziegel (Mörtelgruppe I)	0,70 bis 1,20	1,40 bis 1,70
- Ziegel (Mörtelgruppe II) oder Naturstein	0,50 bis 1,00	0,80 bis 1,00
- Ziegel (Mörtelgruppe III)	0,30 bis 0,60	0,50 bis 0,85
- Klinker (Mörtelgruppe III)	0,25 bis 0,35	0,40 bis 0,70
<b>Stahlbetondecke (Dicke 100 bis 300 mm)</b>	0,14 bis 0,20	0,25 bis 0,35
<b>Unterbeton und Estrich (Dicke ≤ 300 mm)</b>	0,15 bis 0,45	0,65 bis 0,85
<b>Betonwände, unbewehrt (B 50 bis 160)</b>		
- Dicke ≤ 300 mm	0,35 bis 0,40	0,35 bis 0,50
- Dicke > 300 mm	0,15 bis 0,25	0,30 bis 0,35
<b>sonstige Betonkonstruktionen</b>		
- unbewehrt (B 50 bis 160)	0,20 bis 0,30	0,85 bis 0,90
- bewehrt (B 225 bis 450)	0,12 bis 0,25	0,15 bis 0,30

Anhand Tabelle 12 ist deutlich zu erkennen, dass durch die Verwendung von druckluftbetriebenen Abbruchhämmern eine deutliche Steigerung der Nutzleistung realisiert werden kann. Aus Tabelle 11 und Tabelle 12 können keine Rückschlüsse auf die Selektivität der verschiedenen Verfahren des Handabbruchs gezogen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese bei beiden Verfahren aufgrund der geringen Nutzleistung hoch ist.

Das Abbruchverfahren Handabbruch beinhaltet nicht nur den Komplettabbruch von Bauwerksteilen, sondern auch das Herstellen von Öffnungen sowie Bohrlöchern mit handgeführten Bohrhämmern. Zur Ermittlung der Nutzleistung beim Einsatz von Bohrhämmern müssen:

- das Material,
- die Festigkeit des Materials,
- der Bewehrungsgrad,
- das Einsatzgewicht des Bohrgerätes,
- der Durchmesser des Bohrlochs sowie
- die Orientierung der Bohrung (senkrecht oder waagrecht)

berücksichtigt werden. Die Nutzleistung unter Berücksichtigung der soeben genannten Parameter wird in Tabelle 13 zusammengefasst. Im Gegensatz zum Komplettabbruch wird die Rückbauleistung bei der Erstellung von kleinen Öffnungen nicht in m<sup>3</sup>/h, sondern in m/h angegeben. Bei einer vertikalen Orientierung der Bohrung sind keine Arbeiten über Kopf berücksichtigt.

Tabelle 13: Nutzleistung Bohrlöcher mit handgeführten Bohrhämmern in m/h [KOR1987]

Hammer- masse (kg)	Orientierung	Bohrloch- durchmesser (mm)	Mauerwerk Festigkeit		Beton Festigkeit	
			gering	hoch	gering	hoch
10 bis 12	senkrecht	30	5,0–6,0	4,0–5,0	4,0–5,0	3,0–4,0
10 bis 12	waagrecht	30	2,5–3,0	2,0–2,5	2,0–2,5	1,5–2,0
18 bis 20	senkrecht	40	8,0–10,0	7,0–9,0	6,0–7,0	5,0–6,0
18 bis 20	waagrecht	40	4,0–5,0	3,5–4,5	3,0–3,5	2,5–3,0

Hammer- masse (kg)	Orientierung	Bohrloch- durchmesser (mm)	Stahlbeton: Bewehrung			
			Durchmesser < 10 mm		Durchmesser > 10 mm	
			< 50 kg Stahl/m <sup>3</sup> Festigkeit		> 50 kg Stahl/m <sup>3</sup> Festigkeit	
			gering	hoch	gering	hoch
10 bis 12	senkrecht	30	2,0–4,0	2,0–4,0	1,0–2,0	1,0–2,0
10 bis 12	waagrecht	30	1,0–2,0	1,0–2,0	0,5–1,0	0,5–1,0
18 bis 20	senkrecht	40	3,0–5,0	3,0–5,0	2,0–4,0	0,1–4,0
18 bis 20	waagrecht	40	1,5–2,5	1,5–2,5	1,0–2,0	0,1–2,0

Auf weitere Bohrverfahren, wie beispielsweise das Kernbohren oder das Vollbohren, wird im Abschnitt der Trennverfahren näher eingegangen.

## 5.2.2 Maschineller Abbruch

### 5.2.2.1 Demontage / Hebezeug

Die Demontage von ganzen Bauteilen, Bauelementen oder Montagebauwerken erfolgt sowohl bei der Demontage zur Wiederverwertung als auch bei der Demontage zur Wiederverwendung durch entsprechend dimensioniertes Hebezeug. Aufgrund der relativ kurzen Dauer einer Abbruchmaßnahme werden für die Demontage Autokrane als Hebezeug eingesetzt. Kleine Bauteile oder Bauelemente lassen sich auch mit Radladern oder Hydraulikbagger demontieren.

Allgemein wird unter der Demontage zur Wiederverwertung der Rückbau von Anlagen, Stahlkonstruktionen und Apparaten aus Stahl oder Edelstahl verstanden, welche anschließend einer Wiederverwertung zugeführt werden. Bei der Demontage zur Wiederverwendung werden Bauteile bzw. Anlagen- und Maschinenteile in umgekehrter Montagefolge ausgebaut, um diese nicht zu beschädigen und erneut verwenden zu können.

Auf Abbruchbaustellen kommt zur Demontage in den meisten Fällen ein Mobilkran oder ein stationär aufgestellter Kran zum Einsatz. In Abhängigkeit der örtlichen Verhältnisse muss geprüft werden, ob ein Einsatz möglich und wirtschaftlich ist. Neben der Tragfähigkeit einzelner Bauzustände des rückzubauenden Bauwerkes spielt dabei auch die Tragfähigkeit des Hebezeugs, insbesondere der Standfläche, eine entscheidende Rolle. Folglich ist die Demontage mit Hebezeugen nur unter gewissen Randbedingungen sinnvoll. Tabelle 14 verdeutlicht, bei welchen Bauwerksteilen in Abhängigkeit der Bauteildicke das

Abbruchverfahren mittels Demontage mit Hebezeug bevorzugt wird. Die Dicke des Bauteils wird in Millimetern zur Abbruchrichtung angegeben.

Tabelle 14: Einsatz von Demontage/Hebezeug in Abhängigkeit des Bauwerksteils und der Dicke [SCH2105, S. 175]

Art des Bauwerksteils	Dicke in Abbruchrichtung [mm]
Horizontale Bauwerksteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Decken, Dächer, Podeste,</li> <li>• Dachbinder, Deckenträger, Balken,</li> <li>• Träger, Unterzüge.</li> </ul>	<p>bis 400</p> <p>bis 400</p> <p>über 400</p>
Vertikale Bauwerksteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wände,</li> <li>• Stützen.</li> </ul>	<p>von 100 bis 300</p> <p>bis 500</p>

Insgesamt ist die Demontage ein vielseitig anwendbares Rückbauverfahren. Voraussetzung sind jedoch tragfähige Anschlagpunkte und statisch nachgewiesene Bauzustände nach Rückbau einzelner Bauteile. Das Verfahren wird zum Ausbau von hochwertigen Anlagenteilen verwendet. Weiterhin kommt die Demontage zum Einsatz, wenn durch andere Rückbauverfahren die Gefahr einer Beschädigung infolge von Erschütterungen auftreten kann. Im Anschluss an die Demontage werden die Bauteil / Bauelemente von der Baumaßnahme transportiert.

Aufgrund der Vielzahl von Parametern, welche einen Einfluss auf die Rückbauleistung bei der Demontage mit Hebezeug haben, kann keine konkrete Nutzleistung für dieses Verfahren genannt werden. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Leistungsangaben für die Demontage von Abbruchobjekten mit Hebezeug werden nachfolgend zwei Leistungsbereiche genannt [SCH2015, S. 175]:

- Stahlbetonskelettkonstruktionen: 15 bis 20 Tonnen pro Stunde und Arbeitskraft (und Hebezeug),
- Profilstähle (mittlerer Höhe): 0,3 bis 0,5 Tonnen pro Stunde und Arbeitskraft.

Mit dem EIV kann dieses Rückbauverfahren grundsätzlich nicht verglichen werden. Ausschließlich die Trennung einzelner Bauelemente aus der gesamten Baukonstruktion können mit Hilfe des EIV erfolgen. Auf dieses Einsatzszenario wird nachfolgend eingegangen.

### 5.2.2.2 Hydraulikbagger / Abbruchmaschine mit Hydraulikhammer

Bei einem Hydraulikhammer handelt es sich um ein übliches Abbruchwerkzeug, welches ein Bauteil durch Übertragung von Schlagenergie zerstört. In der einschlägigen Literatur wird ein Abbruchhammer, welcher als Anbaugerät für ein Trägergerät verwendet wird meist als Hydraulikhammer bezeichnet. Die Abbildung 4 zeigt einen Hydraulikhammer als Anbaugerät für einen Minibagger.



Abbildung 4: Wacker Neuson SE: Hydraulikhammer NE16 [WAC2020]

Auf eine detaillierte Darlegung der Funktionsweise eines Hydraulikhammers wird an dieser Stelle verzichtet. Um einen Hydraulikhammer möglichst wirtschaftlich einzusetzen, müssen gewisse Kriterien berücksichtigt werden. Bei weichem Material ist eine hohe Schlagzahl bei einer geringen Schlagenergie und bei hartem Material eine geringe Schlagzahl bei einer hohen Schlagenergie auszuführen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Hydraulikhammer axial angedrückt wird und es nicht zu Leerschlägen kommt. Je nachdem, welches Material bearbeitet wird, muss eine andere Meißelart eingesetzt werden, um möglichst effizient arbeiten zu können. Hydraulikhämmer zeichnen sich dadurch aus, dass sie für den Komplet- und Teilabbruch eingesetzt werden können. Weiterhin ist der Einsatz bei Baukonstruktionen aus verschiedenen Baustoffen möglich. Neben den genannten Vorteilen hat der Einsatz eines Hydraulikhammers auch Nachteile. Diese sind unter anderem die erheblichen Umweltbelastungen durch Lärm und Vibrationen, die Splitterwirkung, die hohen Investitionskosten sowie die hohen Verschleißkosten durch die Meißel- und Buchsenabnutzung [SCH2015, S. 296]. Auf dem Markt haben sich die Hersteller von Hydraulikhämmern daher inzwischen mit schallgedämpften Geräten positioniert, um die Gesundheitsgefährdung für das Bedienpersonal sowie weitere am Bau beteiligte Personen zu verringern. Je nach Baumaßnahme kommen Hydraulikhämmer in verschiedenen Größen zum Einsatz, welche wiederum mit differierenden Dienstgewichten des Trägergerätes einhergehen. Für den Einsatz in sensiblen Bereichen eignen sich Hydraulikhämmer mit einem geringen Gesamtgewicht, vornehmlich für den Einsatz an einem Minibagger oder einer Abbruchmaschine.

Bei den maschinellen Abbruchverfahren werden leichte bis schwere Abbruchhämmer an den Trägergeräten eingesetzt und kommen beim Rückbau von Beton- und Stahlbetonbauteilen zum Einsatz [WEI2013, S. 48]. Über die Abbruchleistung von Hydraulikhämmern im Rückbau gibt es kaum Angaben der Hersteller und auch kaum Angaben in der Literatur. Der Deutsche Abbruchverband e. V. hat in seinem Werk „Abbrucharbeiten“ eine Grafik aufgeführt, in welcher die Abbruchleistung in Abhängigkeit des mittleren Dienstgewichtes des Trägergerätes angegeben wird. Anhand der Grafik kann bei einem Dienstgewicht des Trägergerätes von circa 5 t von einer Abbruchleistung von 1,75 bis maximal 5 m<sup>3</sup> pro Stunde ausgegangen werden [SCH2015, S. 298]. Kleine Hydraulikhämmer haben ein Anbaugewicht von circa 60 bis 70 kg und erfordern ein Grundgerät mit einem Minimalgewicht von circa 500 kg bis 1.000 kg.

### 5.2.2.3 Hydraulikbagger / Abbruchmaschine mit Abbruchzange

Neben dem Hydraulikhammer hat sich die Abbruchzange als Abbruchwerkzeug in den vergangenen Jahren etabliert. Das Grundprinzip einer Abbruchzange basiert auf einer Kombizange. Die hydraulische Kraft wird durch die Zangenarme auf die Brechbacken übertragen, durch deren Druck die innere Struktur des abzubrechenden Bauteils zerstört wird [SCH2015, S. 296]. Auf eine vollumfängliche Beschreibung der Arbeitsweise wird an dieser Stelle verzichtet. Überwiegend werden Abbruchzangen beim Primärabbruch<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Als Primärabbruch wird das Lösen aus einem Bauteil verstanden. Bei Sekundärabbruch wird das gelöste Material zerkleinert und getrennt.

eingesetzt. Zur Herstellung von Öffnungen oder Durchbrüchen kann eine Abbruchzange in der Regel nicht eingesetzt werden.

Abbruchzangen werden zum Abbruch von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt. Mit einer Abbruchzange ist es möglich, Stahlbeton in einem Arbeitsgang zu trennen und dabei bereits die einzelnen Baustoffe voneinander zu lösen. Abbildung 5 zeigt eine Abbruchzange als Anbaugerät für eine Abbruchmaschine. Diese Gerätekombination kommt bei beengten Platzverhältnissen zum Einsatz.



Abbildung 5: Darda GmbH: Abbruchzange CC420 [DAR2020]

Ebenso wie bei dem Hydraulikhammer kommen je nach Material unterschiedliche Typen von Abbruchzangen zum Einsatz, um einen möglichst wirtschaftlichen und effizienten Rückbau in Abhängigkeit von der Baustellenumgebung sicherzustellen. Zusätzlich können sowohl die Brechspitze als auch der Armierungsschneider in kurzer Zeit ausgetauscht werden, sofern diese verschlissen sind. Beim Totalabbruch können mit einer mechanischen Abbruchzange nachfolgende mittlere Nutzleistungen erreicht werden [SCH2015, S. 300]:

- 10 bis 25 m<sup>3</sup>/h bei Stahlbeton mit einem Bewehrungsgrad von  $\leq 120$  kg/m<sup>3</sup> (Decken, Unterzüge, Stützen),
- 30 bis 40 m<sup>3</sup>/h bei Stahlbeton mit einem Bewehrungsgrad von  $\leq 80$  kg/m<sup>3</sup> (Filligrandecken, Füllkörperdecken, Stützen, Unterzüge).

Die angegebene Nutzleistung bezieht sich auf ein Trägergerät von 25 bis 30 t. Beim selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen können derartige große Trägergeräte in der Regel nicht eingesetzt werden. Der Markt für Rückbaugeräte bietet auch für den Rückbau in sensiblen Bereichen Anbaugeräte für Minibagger und kleine Abbruchmaschinen. Die kleinste Abbruchzange der MBI Deutschland GmbH, das Modell CR2, hat ein Gesamtgewicht von 240 kg und benötigt ein Trägergerät mit einem Gewicht zwischen 2 bis 4 t [MTEC2020]. Das kleinste hydraulisch drehbare Modell der MBI Deutschland GmbH, das Modell CR5R, hat ein Dienstgewicht von 630 kg und benötigt ein Gewicht des Trägergerätes zwischen 7 und 11 t. Die hydraulische Drehbarkeit einer Abbruchzange hat einen großen Einfluss auf das Gesamtgewicht des Anbaugerätes und damit auch auf das benötigte Gewicht des Trägergerätes.

Den aktuellen Stand der Technik stellen die hydraulisch drehbaren Abbruchzangen dar, welche es dem Bediener des Grundgerätes ermöglicht, die Abbruchzange sehr genau am Objekt zu positionieren, damit die Kraft der Abbruchzange voll genutzt werden kann. Durch eine hydraulisch drehbare Abbruchzange ist der Einsatz bei selektiven Abbruchmaßnahmen und Entkernungsarbeiten unter Gewährleistung einer hohen Arbeitsgenauigkeit möglich [SCH2015, S. 303]. Mit einem Trägergerät mit einem Gewicht von 20 t lässt sich eine mittlere Nutzleistung der Abbruchzange von 8 bis 15 m<sup>3</sup>/h erreichen [SCH2015, S. 302]. Die Nutzleistung

einer Abbruchzange liegt bei rund 60 % eines Abbruchhammers bei Beton und bei rund 50 % bei Stahlbeton. Demzufolge liegt die Nutzleistung einer Abbruchzange bei einem 5 t Trägergerät bei circa 3 m<sup>3</sup>/h für den Rückbau von Beton und bei kleiner 1 m<sup>3</sup> für den Rückbau von Stahlbeton.

Häufig zeichnen sich die Baumaßnahmen durch beengte Begebenheiten aus, wodurch es nicht möglich ist den Standort des Trägergerätes fortlaufend zu ändern. Eine hohe Flexibilität bedingt ein hohes Gewicht des Anbaugerätes und des Trägergerätes, weshalb der Einsatz von Abbruchzangen in beengten und sensiblen Bereichen nur bedingt möglich ist.

#### 5.2.2.4 Hydraulikbagger / Abbruchmaschine mit Pulverisierer

Ein weiteres Anbaugerät, welches überwiegend bei der Aufbereitung von Betonbruch und nur selten beim tatsächlichen Abbruch von Bauteilen verwendet wird, ist der Pulverisierer. Das Einsatzgebiet dieses Anbaugerätes ist die Zerkleinerung von großen bereits rückgebauten Bauteilen bzw. Bauelementen für eine anschließende Aufbereitung. Häufig können Brechanlagen, insbesondere mobile Brechanlagen, nur eine maximale Größe an Bauteilen aufnehmen und brechen.

Wie auch bei der Abbruchzange basiert die Arbeitsweise eines Pulverisierers auf einer Kombizange, wobei mittels Schneidmessern das Material maximal zerkleinert wird. Eine vertiefende Betrachtung der Arbeitsweise eines Pulverisierers erfolgt an dieser Stelle nicht. Die Nutzleistungen für die Aufarbeitung betragen in Abhängigkeit des Materials:

- 30 bis 40 m<sup>3</sup>/h bei Mauerwerk,
- 25 bis 30 m<sup>3</sup>/h bei unbewehrtem Beton,
- 15 bis 20 m<sup>3</sup>/h bei Stahlbeton mit einem Bewehrungsanteil < 80 kg/m<sup>3</sup>,
- 12 bis 16 m<sup>3</sup>/h bei Stahlbeton mit einem Bewehrungsanteil < 120 kg/m<sup>3</sup>.

Das Dienstgewicht des Trägergerätes liegt zwischen 20 und 30 t.

Wie auch bei den Abbruchzangen gibt es hydraulisch drehbare und starre Pulverisierer, die sich hinsichtlich des Gewichtes und des Dienstgewichtes des Trägergerätes unterscheiden. Der kleinste starre Pulverisierer der Firma MBI Deutschland GmbH hat ein Gewicht von 150 kg und benötigt ein Trägergerät mit einem Gewicht zwischen 2 und 4 t. Im Vergleich dazu benötigt der kleinste hydraulisch drehbare Pulverisierer der Firma MBI Deutschland GmbH ein Trägergerät zwischen 7 bis 10 t und weist ein Gesamtgewicht von 660 kg auf. Die Nutzleistung eines kleinen Pulverisierers liegt gemittelt bei einem 5-t-Hydraulikbagger für Beton bei rund 1,5 m<sup>3</sup>/h und bei Stahlbeton bei rund 0,3 m<sup>3</sup>/h.<sup>13</sup>

#### 5.2.2.5 Hydraulikbagger / Abbruchmaschine mit Beton- bzw. Abbruchfräse

Die vermehrt auftretende Forderung nach lärm- und erschütterungsarmen Abbruchverfahren hat dazu geführt, dass sich Beton- und Abbruchfräsen auf dem Markt etabliert haben. Der Ursprung der Anbaufräsen liegt im Tagebau und wurde durch diverse Modifizierungen auf den Bedarf im (Teil-)Abbruch von Baukonstruktionen angepasst. Vielfach wird dieses Verfahren auch für den Rückbau von Verkehrsflächen eingesetzt. Das rückzubauende Bauteil, Bauelement oder die zu bearbeitende Oberfläche wird dabei mittels rotierender Fräsmeißel schichtweise abgetragen [WEI2013, S. 49]. Wie auch bei den Abbruchhämmern können bei der Frästechnik die Verschleißteile je nach Material geändert/gewechselt werden. Der Verschleiß der Meißel kann bei Materialien einer Abbruchmaßnahme differieren und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes dieses Anbauwerkzeuges maßgeblich. Demzufolge ist es zwingend erforderlich, je nach Material den richtigen Meißeltyp auszuwählen. Die Anbaufräsen werden meist mit Standard-Meißelhaltern ausgestattet, um einzelne Meißel schnell und unkompliziert zu wechseln, falls diese verschlissen sind oder die Anbaufräse für einen anderen Baustoff eingesetzt werden soll [BAU2020].

<sup>13</sup> Siehe Leistungsermittlung Anbaugerät für Trägergerät (Hydraulikbagger 5 t)

Der Einsatz von Fräsen bei Abbruchmaßnahmen ist mit einer hohen Staubentwicklung verbunden. Die Befeuchtung des Fräsgutes beim Fräsen ist deshalb von großer Bedeutung, um die Staubentwicklung auf das notwendige Maß zu senken. Es ist möglich die Frästechnik auch bei Stahlbetonbauteilen einzusetzen, sofern die Bewehrung einen Durchmesser von 25 mm nicht überschreitet [SCH2015, S. 310]. Beim Einsatz einer Beton- bzw. Abbruchfräse bei Stahlbetonbauteilen müssen Sicherungsmaßnahmen gegen das Wegschleudern von Bewehrungsstahl getroffen werden.

Die Frästechnik wird bei Abbruchmaßnahmen häufig zum konturgenauen Abtrag verwendet, wenn eine geräusch- und vibrationsarme Arbeitsweise gefordert wird. Unter anderem ist dies beim Teilabbruch von bestehenden Gebäuden notwendig. Weiterhin wird diese Technik eingesetzt um kontaminierte Wände, Putze oder Industrieflächen vollständig beziehungsweise lagenweise abzutragen, weiterhin auch zur Erstellung von Öffnungen und Schlitzfenstern. Die Nutzleistung dieses Verfahrens ist von vielen Faktoren abhängig. Bei einem Grundgerät mit einem Dienstgewicht von 25 bis 30 t wurden die nachfolgenden mittleren Nutzleistungen ermittelt [SCH2015, S. 311]:

- 8 bis 14 m<sup>3</sup>/h bei massivem Mauerwerk mit einer Dicke von > 1 m,
- 8 bis 12 m<sup>3</sup>/h bei unbewehrtem Beton mit einer Dicke von > 1 m,
- 3 bis 6 m<sup>3</sup>/h bei Stahlbeton mit einem Bewehrungsanteil von < 80 kg/m<sup>3</sup>.

Die Nutzleistung ist von der Druckfestigkeit des Materials abhängig. Bei einer hohen Druckfestigkeit von mehr als 120 MPa erreicht eine Anbaufräse unter ungünstigen Umständen nur eine Nutzleistung von 8 bis 15 m<sup>3</sup>/h. Im Vergleich dazu kann bei einer geringen Druckfestigkeit von 20 bis 50 MPa eine Nutzleistung von bis zu 50 m<sup>3</sup>/h realisiert werden [BAU2020]. Die Nutzleistungen verdeutlichen, dass der Einsatz von Anbaufräsen den Baustoffen mit einer geringen Druckfestigkeit zuzuordnen ist. Bei Abbruchmaßnahmen werden Anbaufräsen auch bei Baustoffen mit hoher Druckfestigkeit eingesetzt, da die akustische Belastung ebenso wie die Erschütterungen deutlich geringer ausfallen als bei den gängigen Rückbautechnologien.

Es gibt auch kleine Beton- und Abbruchfräsen als Anbaugerät für einen Minibagger oder eine Abbruchmaschine. Auf dem Markt gibt es bereits Anbaugeräte für ein Dienstgewicht des Trägergerätes von 0,5 t [SCH2015, S. 311]. Die Firma Wimmer Felstechnik Gesellschaft m.b.H. bietet eine Anbaufräse für ein Trägergerät zwischen 1 und 3 t an. Das Gewicht des Anbaugerätes liegt bei 136 kg und hat 60 Fräsköpfe. In Abbildung 6 ist die Anbaufräse der Firma Wimmer Felstechnik Gesellschaft m.b.H. abgebildet.



Abbildung 6: Wimmer Anbaufräse Raptor WR03 [BDB2020]

Die Epiroc Deutschland GmbH bietet eine Anbaufräse mit einem Betriebsgewicht von nur 110 kg an, welche von einem Trägergerät mit einem Gewicht zwischen 0,6 und 2 t aufgenommen und bedient werden kann.

Die in einem Gehäuse befindliche Anbaufräse EX 30 HD der Firma Kemroc wurde auf einer Baustelle in Japan für den Abtrag einer 5 cm dicken Betonschicht eingesetzt und erreichte eine Flächenleistung von 15 bis 20 m<sup>2</sup>/h. Dies entspricht einer Abbruchleistung von maximal 1 m<sup>3</sup>/h. Sofern die Anbaufräse nicht nur die Oberfläche bearbeitet, liegt die Abbruchleistung bei rund 0,45 m<sup>3</sup>/h<sup>14</sup>. Als Trägergerät wurde ein 5 t schwerer Minibagger eingesetzt. Das Anbaugerät hat bei dieser Baumaßnahme sowohl vertikale als auch horizontale Flächen (Überkopparbeiten) abgetragen. Die Hersteller der kleinen Anbaufräsen treffen bis auf kurz zusammengefasste Beispielvorbau keine Angaben über die Nutzleistung der Geräte. In der gängigen Literatur werden zur Nutzleistung von kleinen Anbaufräsen auch keine Aussagen gemacht.

### 5.3 Trennverfahren

Bei Abbruchmaßnahmen kommen neben den Abbruchverfahren auch Trennverfahren zum Einsatz. Während durch die Verwendung von Abbruchverfahren komplette Bauteile oder Bauelemente im Teil- oder Totalabbruch zurückgebaut werden, werden durch Trennverfahren Öffnungen respektive Schlitz in Bauteilen oder Bauelementen hergestellt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird untersucht, in welchen Bereichen das EIV im Bauwesen eingesetzt werden kann. Ergänzend zu den Abbruchverfahren werden nachfolgend Trennverfahren vorgestellt, bei denen das EIV als Alternativverfahren anwendbar sein könnte.

#### 5.3.1 Sägen

Allgemein wird das Sägen für die Ausführung von Teilabbrüchen oder als eine vorbereitende Maßnahme für eine nachfolgende Abbruchtechnologie eingesetzt. Dieses Verfahren eignet sich für den Rückbau im Bestand, da das Verfahren genau und erschütterungsarm ist. Es muss darauf geachtet werden, dass angrenzende Bauteile oder Bauelemente vor dem Feuchtigkeitseintrag infolge des Spül- bzw. Kühlwassers geschützt werden. Je nachdem, welches Sägeverfahren eingesetzt wird, kann der Wasserverbrauch differieren. Die Emissionen dieses Trennverfahrens sind bis auf die hohe Lärmbelastung relativ gering, weshalb der Einsatz in sensiblen Bereichen gängig ist. Das Sägen ermöglicht eine hohe Präzision. Es können Sägen unterschiedlicher Größe und unterschiedlichen Typs eingesetzt werden. Dabei wird grundsätzlich in das Blattsägen und das Ketten-/Seilsägen unterschieden. Das Sägen als Trennverfahren ist deutlich am Überschnitt (über die Öffnungsgröße hinausgehender Schnitt) oder an Bohrlöchern (an den jeweiligen Ecken als vorbereitende Maßnahme) zu erkennen. Lediglich beim Rückbau von kontaminierten Baustoffen muss berücksichtigt werden, dass das Kühl- bzw. Spülwasser verunreinigt wird und entsprechend aufgefangen und aufbereitet werden muss [WEI2013, S. 66].

Stellvertretend für die Sägeverfahren werden an dieser Stelle die leistungsfähigen Diamantsägeverfahren vorgestellt, da diese die höchsten Schnittleistungen aufweisen. Diamantsägen werden auf Abbruchmaßnahmen häufig in Kombination mit anderen Abbruchverfahren wie zum Beispiel der Demontage von rückzubauenden Bauelementen mit Hebezeug eingesetzt. Die Trennung der Bauwerksteile bzw. der Bauwerkselemente kann mit einer Diamantkreissäge durch ein rotierendes scheibenförmiges Sägeblatt erfolgen, wohingegen bei einer Diamantkettensäge eine maschinell angetriebene und mit Diamanten besetzte Kette verwendet wird [SCH2015, S. 346]. Die Diamantseilsäge ist ein weiteres Trennverfahren des Diamantsägens. Dabei wird ein mit Diamantsägeperlen bestücktes Seil verwendet. Bei den verschiedenen Verfahren des Diamantsägens muss stets sichergestellt werden, dass eine ausreichende Menge an Wasser zur Kühlung und Staubminderung zur Verfügung steht [SCH2015, S. 347]. Gegebenenfalls sind zusätzliche Maßnahmen zu treffen, welche eine Durchfeuchtung des Gebäudes verhindern. Diamantsägen eignen sich zur Trennung von Bauteilen und Bauelementen aus Mauerwerk, Beton oder Stahlbeton. Die Vor- und Nachteile sowie das bevorzugte Anwendungsgebiet des Diamantsägens werden in Tabelle 15 zusammengefasst.

---

<sup>14</sup> Siehe Leistungsermittlung Anbaugeräte für Trägergerät (Hydraulikbagger 5 Tonnen)

Tabelle 15: Diamantsägen: Vorteile, Nachteile, Anwendungsgebiet [SCH2015, S. 353]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennschnitte maßhaltig und ebenflächig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Lärmpegel</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• bei Wasserkühlung eine geringe Staubentwicklung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnitttiefe bei Diamantkreis- und Diamantkettensägen begrenzt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• erschütterungsarm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sägeblatt kann verklemmen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Begrenzung der Größe (Schneidfläche)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Verschleiß bei Stahl</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Begrenzung der Struktur (Einsatz Diamantseilsäge)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Wasserbedarf</li> </ul>
Anwendungsgebiet	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• in Mauerwerk und Beton bis circa 600 mm Tiefe Herstellung von ebenflächigen Trennschlitzten mit Diamantkreis- und Diamantkettensägen</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchtrennung von dickwandigen Konstruktionen aus Beton oder Mauerwerk mit Diamantseilsägen</li> </ul>	

Wie bei Sägeverfahren üblich, wird die Schnittleistung in m<sup>2</sup>-Trennfläche<sup>15</sup> pro Stunden angegeben. Die Ergebnisse der nachfolgenden Betrachtung werden abschließend zusammengefasst und die ermittelten Nutz- bzw. Schnittleistungen tabellarisch dargestellt.

Die Bodensägen (Diamantkreissägen), welche auch als Fugenschneider bezeichnet werden, lassen sich horizontal und vertikal auf Laufschiene führen. Zur Erstellung einer vertikalen Trennung von Bauteilen oder Bauelementen wird üblicherweise zunächst eine Laufschiene befestigt, um eine möglichst hohe Genauigkeit des Trennschnittes sicherzustellen. Beim Anbringen der Laufschiene muss sichergestellt werden, dass diese an mindestens zwei Stellen durch spezielle Spreizdübel, welche in dafür vorgesehene Bohrlöcher eingebracht werden, fixiert ist. Weiterhin sind bei der Erstellung von Öffnungen in Wänden oder Decken ein Überschnitt, sprich ein Anschnitt, welcher über die Öffnungsgröße hinausgeht, oder Bohrungen an den jeweiligen Eckpunkten der geplanten Öffnung einzuplanen. Zusätzlich muss das Anbringen der Laufschiene bei einer monetären und leistungsorientierten Betrachtung berücksichtigt werden. Abbildung 7 zeigt eine Diamantkreissäge auf einer Laufschiene bei einem Trennschnitt in einer Betonwand. Wie anhand der Abbildung 7 ersichtlich, müssen eine Vielzahl an Zu- und Ableitungen für die Hydraulik, Spül- und Kühlwasser und ggf. Strom an die auf der Wand befindliche Diamantkreissäge geführt werden.

<sup>15</sup> m<sup>2</sup>-Trennfläche entspricht der Laibung eines Schnittes.



Abbildung 7: Wandsägearbeiten [RUH2020]

Diamantbesetzte Kreissägen auf Laufschienen werden bis zu einer Schnitttiefe von 1.005 mm eingesetzt. Bedingt durch den hohen Aufwand für das Anbringen der Laufschienen, dem hohen Feuchtigkeitseintrag und den hohen Kosten wird dieses Trennverfahren üblicherweise bei Beton- und Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt. Mit einer Kreissäge lässt sich:

- bei Beton eine reine Schnittleistung von 0,5 bis 1,5 m<sup>2</sup> Trennfläche/h und eine Nutzleistung von 0,4 bis 0,8 m<sup>2</sup> Trennfläche/h,
- bei Stahlbeton eine reine Schnittleistung von 0,5 bis 1,2 m<sup>2</sup> Trennfläche/h und eine Nutzleistung von 0,2 bis 1,0 m<sup>2</sup> Trennfläche/h erreichen.

Die Leistungsdaten beziehen sich auf eine Schnitttiefe von bis zu 400 mm. Angaben zu Leistungsdaten bei einer Schnitttiefe von über 400 mm werden weder in der Literatur noch in den Datenblättern der Hersteller veröffentlicht.

Trennschleifer lassen sich manuell frei bewegen und sind meist ohne Vorarbeiten einsetzbar. Insgesamt sind Trennschleifer kompakt und zeichnen sich durch ein geringes Gewicht aus. Durch die freihändige<sup>16</sup> Bedienung eines Trennschleifers kann die Genauigkeit, Schnitttiefe und Schnittleistung einer Bodensäge nicht erreicht werden. Trennschleifer werden nur bei kleinen Schnitten oder Schlitzen eingesetzt. Ganze Bauteile oder Bauelemente lassen sich mit diesem Gerät nur mit einem hohen Aufwand bearbeiten bzw. zurückbauen. Abbildung 8 zeigt einen Trennschleifer mit diamantbesetzter Trennscheibe. Bedauerlicherweise werden keine Angaben zu den Schnittleistungen der Trennschleifer getroffen. Weder in der gängigen Literatur noch von Herstellern werden diesbezüglich konkrete Kenngrößen genannt.

---

<sup>16</sup> Ohne technische Hilfsmittel zur Führung des Gerätes von dem Bediener der Säge ausgeführt.



Abbildung 8: Winkelschleifer mit Diamanttrennscheibe [TAS2020]

Ein weiteres Trennverfahren des Diamantsägens ist der Einsatz von Diamantkettensägen. Dieses Verfahren eignet sich zur Erstellung kleiner Öffnungen in Bauwerkteilen aus Mauerwerk oder Beton. Der Überschchnitt ist bei diesem Verfahren gering. Häufig werden Diamantkettensägen in Kombination mit Diamantkreissägen eingesetzt, um einen Überschchnitt zu vermeiden. Diamantkettensägen können bis zu einer Schnitttiefe von 500 mm eingesetzt werden. Das geringe Gewicht von circa 10 kg stellt einen deutlichen Vorteil dieses Verfahrens dar. Wie auch die Trennschleifer werden die Diamantkettensägen freihändig geführt, wodurch die Genauigkeit in einem hohen Maße von den Fertigkeiten des Bedieners abhängig ist. Wie anhand von Abbildung 9 ersichtlich, unterscheiden sich Diamantkettensägen kaum von handelsüblichen Kettensägen.



Abbildung 9: Diamantkettensäge ICS [JÖR2020]

Für die Diamantkettensägen gibt es unterschiedliche Antriebsformen. In beengten Verhältnissen und innerhalb geschlossener Räumlichkeiten werden die Diamantkettensägen per Kompressor oder Strom betrieben. Aufgrund der hohen Staubentwicklung muss zwingend eine Wasserzufuhr sichergestellt werden. Bis zu einer Schnitttiefe von 600 mm ist mit einer Diamantkettensäge eine reine Schnittleistung bei Beton von 0,5 bis 1,0 m<sup>2</sup> Trennfläche/h und bei Stahlbeton von 0,3 bis 0,9 m<sup>2</sup> Trennfläche/h erreichbar.

Auch die Diamantseilsägen werden zur Trennung von Bauteilen als ein Verfahren des Diamantsägens eingesetzt. Ein 5 bis 6 mm dickes Stahlseil, welches mit Diamanten besetzt ist, wird über Umlenkrollen sowie zuvor erstellte Bohrlöcher durch das zu trennende Bauteil geführt und anschließend durch ein Antriebsrad angetrieben [SCH2015, S. 350]. Durch einen künstlich erzeugten Anpressdruck infolge der Seilspannung erfolgt die Herstellung des Sägeschnittes. Es ist auch möglich, Stahlbetonbauteile mit diesem Verfahren zu trennen. Dies führt jedoch zu einem erheblich höheren Verschleiß der mit Diamanten besetzten Seile. Neben der Erstellung von rechteckigen Öffnungen ist es mit diesem Trennverfahren auch möglich, runde Öffnungen herzustellen. Weiterhin ist beim Einsatz einer Diamantseilsäge der Gefährdungsbereich entsprechend der eingesetzten Seillänge abzusperren, um beim Reißen des Seiles keine Personen zu gefährden [SCH2015,

S. 354]. Die reine Schnittleistung einer Seilsäge liegt zwischen 1,0 und 4,0 m<sup>2</sup> Trennfläche/h. Die Schnittleistung liegt höher als bei der Diamantkreissäge oder der Diamantkettensäge. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass der Auf- und Abbau einer Seilsägeeinrichtung und die gegebenenfalls vor- und nachbereitenden Arbeiten (Herstellen der Bohrlöcher usw.) bei der reinen Schnittleistung nicht eingerechnet werden.

Bei den Trennverfahren mit Diamantsägen ist beim Trockenschneiden unbedingt eine Staubschutzmaske und generell ein Gehörschutzmittel zu tragen. Beim Trockenschneiden werden geringere Schnittleistungen erreicht. In Tabelle 16 werden die Schnittleistungen von Diamantsägen zusammengefasst. Dabei wird üblicherweise zwischen der reinen Schnittleistung und der Nutzleistung des Trennverfahrens unterschieden. Bei der reinen Schnittleistung handelt es sich um die betriebliche Grundleistung, wohingegen die Nutzleistung auch die Nebenarbeiten berücksichtigt [SCH2015, S. 349]. Die Nutzleistung ist demzufolge geringer als die reine Schnittleistung.

Tabelle 16: Schnittleistung von Diamantsägen [SCH2015, S. 349]

	Schnittleistung in m <sup>2</sup> Trennfläche/h bei		
	Mauerwerk	Beton	Stahlbeton
<b>Diamantkreissäge (bis 0,4 m Schnitttiefe)</b>			
• reine Schnittleistung	1,6 bis 2,0	0,5 bis 1,5	0,5 bis 1,2
• Nutzleistung	0,8 bis 1,2	0,4 bis 0,8	0,2 bis 1,0
<b>Diamantkettensäge (bis 0,6 m Schnitttiefe)</b>			
• reine Schnittleistung	1,8 bis 2,0	0,5 bis 1,0	0,3 bis 0,9
<b>Diamantseilsäge</b>			
• reine Schnittleistung	1,0 bis 4,0		

### 5.3.2 Bohren

Beim Bohren wird allgemein zwischen den Verfahren der Kernbohrungen und der Vollbohrungen unterschieden. Es werden bei den Kernbohrverfahren häufig diamantbesetzte Schneidbeläge eingesetzt, um den Verschleiß zu minimieren und die Standzeiten zu verlängern. Wie auch beim Sägen muss bei diesem Trennverfahren der Wasserbedarf eingeplant und der Wassereintrag bei Baumaßnahmen im Bestand möglichst geringgehalten werden. Gegebenenfalls müssen Maßnahmen getroffen werden, um die Ausbreitung des Kühl- bzw. Spülwassers einzudämmen. Häufig wird das Bohren als vorbereitende Maßnahme für andere Trenn- oder Abbruchverfahren ausgeführt. Kernbohrungen werden beispielweise als vorbereitende Maßnahmen für das Seilsägeverfahren eingesetzt, damit das Seil durch die Bohrlöcher geführt werden kann. Dieses Verfahren eignet sich zur Erstellung von Öffnung kleiner bis mittlere Größe. Für den selektiven Rückbau wird das Bohren nur bedingt eingesetzt, da die Rückbauleistungen relativ gering ausfallen [WEI2013, S. 66]. Bei der Sanierung und dem Umbau hat sich dieses Verfahren bewährt, da die Bauteile in direkter Umgebung unbeschädigt bleiben. Die Lärmbelästigung ist bei diesem Verfahren bedeutend und muss daher bei der Planung berücksichtigt werden. Die Beeinträchtigung des direkten Umfeldes kann beträchtlich ausfallen.

Das Kernbohren mit einem Diamant-Kernbohrer erfolgt durch das Drehen unter gleichmäßig aufgebrachtem Druck einer mit Diamanten bestückten Hohlbohrkrone. Mit diesem Verfahren können ringförmige Öffnungen in Bauteilen und -elementen aus mineralischen Baustoffen hergestellt werden. Wie auch beim Einsatz einer Diamantkreissäge muss das Diamant-Kernbohrgerät zur Erstellung von horizontalen Öffnungen fixiert werden, um eine ausreichende Standsicherheit sicherzustellen. Die Orientierung des Bohrverlaufes kann durch die Fixierung eingestellt werden. Dabei ist es auch möglich, die Bohrung in einem definierten Winkel

auszuführen. Abbildung 10 zeigt ein Diamant-Kernbohrgerät im Einsatz auf einer Deckenplatte. Die Abbildung verdeutlicht die Möglichkeit, die Orientierung der Kernbohrung in einem vorgegebenen Winkel festzulegen.



Abbildung 10: Diamant-Kernbohrgerät auf Deckenplatte [BOE2020]

Dazu werden Vakuumpplatten, Dübelverankerungen, Spannplatten oder ähnliches verwendet [SCH2015, S. 354]. Im Gegensatz zu einer Diamantkreissäge muss auch bei der Erstellung von vertikalen Öffnungen das Diamant-Kernbohrgerät fixiert werden. Der Anpressdruck der Hohlbohrkrone kann je nach System manuell über ein Drehkreuz beziehungsweise über einen hydraulischen oder elektrischen Motor gesteuert werden. Ab einer Bohrlochlänge von 150 mm ist zwingend der Einsatz von Spül- bzw. Kühlflüssigkeiten erforderlich, damit die Staubentwicklung verhindert und die Bohrkrone entsprechend gekühlt wird [SCH2015, S. 355].

Der Bohrfortschritt ist maßgeblich vom zu durchbohrenden Material abhängig, wobei das Durchbohren von Bewehrungsstählen im Stahlbeton einen deutlich negativen Einfluss auf die Rückbauleistung des Verfahrens hat und sich weiterhin der Verschleiß signifikant erhöht [SCH2015, S. 355]. Nachdem der Diamant-Kernbohrer komplett durch das Bauteil bzw. Bauelement geführt wurde, muss der Bohrkern aus der Hohlbohrkrone herausgelöst werden. Der Bohrkern muss, sofern dieser nicht für Untersuchungen oder Dokumentationszwecke benötigt wird, für eine Wiederverwertung bzw. Wiederverwendung des Materials gebrochen sowie klassiert werden.

Einsatzgebiet des Diamant-Kernbohrgerätes ist im Wesentlichen die Erstellung von Bohrlöchern. Häufig dienen diese Bohrungen als Grundlage für den Einsatz weiterer Abbruchverfahren wie beispielsweise für die Verwendung von Quellmitteln, Spaltgeräten oder Diamantsägen [SCH2015, S. 355]. Bei Tiefbaumaßnahmen werden Diamant-Kernbohrgeräte eingesetzt, um Öffnungen in Schachtbauwerken oder Rohren herzustellen. Auch bei Hausanschlüssen werden diese eingesetzt, weil die Bohrlochwand glatt ist. Die Vor- und Nachteile des Diamant-Kernbohrgerätes werden in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Diamant-Kernbohrgerät: Vorteile und Nachteile [SCH2015, S. 356]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bohrlochwand vollkommen glatt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kostenintensive Diamantkrone</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bohrlochparameter haben eine hohe Maßhaltigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Verschleiß und geringe Rückbauleistung bei Stahlbeton</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>lediglich einseitiger Zugang benötigt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Wasserbedarf</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Erschütterungen</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Staubbindung (bei Einsatz von Kühl- bzw. Spülwasser)</li> </ul>	

In Tabelle 18 wird die Nutzleistung des Diamant-Kernbohrgerätes sowohl in m/h, als auch in m<sup>2</sup>/h in Abhängigkeit des Bohrkronendurchmessers angegeben.

Tabelle 18: Nutzleistung diamantbesetzte Bohrkronen beim Kernbohren [SCH2015, S. 358]

	Bohrkronendurchmesser	Mauerwerk		Beton		Stahlbeton			
		Festigkeit		Festigkeit		Festigkeit		Festigkeit	
		gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
		[mm]							
<b>Nutzleistung [m/h]</b>	80	6-8	5-7	4-6	3-4	2-3	2-3	1-2	0,5-2
	150	6-8	5-7	4-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-2
	200	6-8	5-7	4-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-2
	300	8-10	6-9	5-8	4-6	3-4	2-3	1-2	0,52
<b>Nutzleistung [m<sup>2</sup>]</b> <b>Trennfläche je h [m<sup>2</sup>/h]</b>	80	0,5-0,7	0,4-0,6	0,3-0,5	0,2-0,3	0,2-0,3	0,1-0,3	0,1-0,2	< 0,2
	150	0,9-1,2	0,7-1,1	0,6-0,9	0,6-0,8	0,4-0,6	0,3-0,5	0,1-0,3	0,1-0,3
	200	1,2-1,6	1,0-1,4	0,8-1,2	0,8-1,0	0,6-0,8	0,4-0,6	0,2-0,4	0,1-0,4
	300	2,4-3,0	1,8-2,7	1,5-2,4	1,2-1,8	0,9-1,2	0,6-0,9	0,3-0,6	0,1-0,6

Mit einem Vollbohrgerät wird durch eine drehende und schlagende Bewegung die Kraft über einen Bohrkopf, welcher mit Hartmetallschneiden besetzt ist, in das Bohrloch übertragen [SCH2015, S. 357]. Durch diese Kraftübertragung wird das gesamte Material im Bohrloch zerkleinert und im Vergleich zum Diamant-Kernbohrgerät staubförmig herausgetragen. Vollbohrgeräte werden nur noch vereinzelt als handgeführte Bohrhämmer (bis 20 kg) eingesetzt und vermehrt als maschinengeführte Lafetten-Bohrhämmer. Der Antrieb der Bohrhämmer mittels Druckluft hat sich im Vergleich zu hydraulischen oder elektrischen Antrieben als wartungsarm, zuverlässig und robust herausgestellt und wird daher überwiegend verwendet. In den vergangenen Jahren ist der Anteil der elektrischen Antriebe infolge der Forderungen nach schadstoffarmen Abbruch- und Trennverfahren gestiegen.

Das Verfahren wird vorwiegend zur Herstellung von Öffnungen in Bauwerken beziehungsweise Bauelementen aus Mauerwerk oder Beton verwendet. Weiterhin wird dieses Verfahren als vorbereitende Maßnahme zur Schaffung von Laderäumen für Sprengstoffe, Expansivmittel oder dem Einsatz von Spaltgeräten eingesetzt. Zwar ist es möglich, mit handgeführten Bohrhämmern Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von bis zu 10 mm und mit maschinengeführten Bohrhämmern Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von bis zu circa 16 mm zu durchtrennen, jedoch ist dies sowohl mit einem deutlich höheren Verschleiß des Bohrhammers als auch mit einem höheren Arbeitszeitaufwand verbunden [SCH2015, S. 361]. Die Vor- und Nachteile beim Einsatz von Vollbohrgeräten werden in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Vollbohrer: Vorteile und Nachteile [SCH2015, S. 361]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>robust, zuverlässig und geringe Wartung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Investitionskosten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>bei d = 25 bis 55 mm hohe Rückbauleistung und Wirtschaftlichkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsverlust (circa 50 %) bei waagrechtem Einsatz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>gute Einsatzmöglichkeit bei beengten Platzverhältnissen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Verschleiß und geringe Rückbauleistung bei Stahlbeton</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz per Fernbedienung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Staubentwicklung und Lärmemission</li> </ul>

Auf die Nutzleistung von handgeführten Bohrhämmern wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits eingegangen. In Tabelle 20 wird die Nutzleistung von Bohrhämmern bei senkrechten Arbeiten in m<sup>2</sup>-Trennfläche pro Stunde und bei waagerechten Arbeiten zusammengefasst. Bei der Betrachtung der Nutzleistungen ist zu berücksichtigen, dass bei einem Durchmesser von kleiner 30 cm ein Bohrhämmer mit einem Hämmergewicht von 10 bis 12 kg und bei einem Durchmesser von größer 30 cm ein Bohrhämmer mit einem Hämmergewicht von 18 bis 20 kg verwendet wird.

Tabelle 20: Nutzleistung Bohrhämmer senkrecht [SCH2015, S. 239]

Baustoff	Nutzleistung beim Abbruch		
	Festigkeiten (N/mm <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> -Trennfläche/h)	
		d < 0,3 m	d > 0,3 m
Mauerwerk	gering (< 9,5)	5,184	11,310
	hoch (9,5 bis 23)	4,241	10,053
Beton	gering (< 30)	4,241	8,168
	hoch (> 30)	3,299	6,912
Stahlbeton (schwach bewehrt < 50 kg/m <sup>3</sup> )	gering (< 30)	2,827	5,027
	hoch (> 30)	2,827	5,027
Stahlbeton (stark bewehrt > 50 kg/m <sup>3</sup> )	gering (< 30)	1,414	3,770
	hoch (> 30)	1,414	2,513

Tabelle 21: Nutzleistung Bohrhämmer waagrecht [SCH2015, S. 239]

<b>Baustoff</b>		<b>Nutzleistung beim Abbruch</b>	
<b>Art</b>	<b>Festigkeiten</b>	<b>(m<sup>2</sup>-Trennfläche/h)</b>	
	<b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>d &lt; 0,3 m</b>	<b>d &gt; 0,3 m</b>
Mauerwerk	gering (< 9,5)	2,592	5,655
	hoch (9,5 bis 23)	2,121	5,027
Beton	gering (< 30)	2,121	4,084
	hoch (> 30)	1,649	3,456
Stahlbeton (schwach bewehrt < 50 kg/m <sup>3</sup> )	gering (< 30)	1,414	2,513
	hoch (> 30)	1,414	2,513
Stahlbeton (stark bewehrt > 50 kg/m <sup>3</sup> )	gering (< 30)	0,707	1,885
	hoch (> 30)	0,707	1,257

### 5.3.3 Hydraulische Verfahren

Ein hydrodynamisches Verfahren zur Trennung von Bauteilen oder Bauelementen aus Mauerwerk, Beton oder Stahlbeton ist das Hochdruckwasserstrahl-Verfahren. Das Verfahren wird üblicherweise bei der Bauwerksinstandhaltung eingesetzt und nur in seltenen Fällen beim Rückbau. Mittels einer Hochdruckpumpe wird das Wasser mit einem Druck von bis zu 2.500 bar auf die Oberfläche gestrahlt. Die Schneidleistung des Hochdruckwasserstrahl-Verfahrens ist bei harten Materialien begrenzt. Demzufolge ist die Leistungsfähigkeit von der Festigkeit des rückzubauenden Baustoffes abhängig. Damit auch harte Materialien mit einem hydrodynamischen Verfahren getrennt werden können, wird in das Strahlwasser ein Schneidmittel (Abrasiv) zugegeben. Durch das sogenannte Hochdruckwasserabrasivschneiden kann eine höhere Schnittqualität bei der Durchtrennung von Beton, Stahlbeton und Stahl erreicht werden. Mit dem Hochdruckwasserabrasivschneiden kann man mittels maschinengeführter Geräte eine Abbruchleistung von 0,41 m<sup>3</sup>/h und mit manuell geführten Geräten eine Abbruchleistung von 0,05 m<sup>3</sup>/h erreicht werden [WEI2013, S. 56]. Um diese Abbruchleistungen zu erreichen, werden ein hoher Wasserbedarf von circa 3 m<sup>3</sup>/h und ein Abrasivbedarf von circa 90 kg/h benötigt. Infolge einer hohen Verunreinigung des eingesetzten Wassers ist dieses Verfahren nur bedingt einsetzbar.

Hydrodynamische Trennverfahren zeichnen sich durch eine genaue Schnittführung, die Einsatzfähigkeit bei vertikalen Flächen und nahezu keiner Staub- und Lärmbelastigung aus. Es muss berücksichtigt werden, dass eine kontinuierliche Wasserversorgung sichergestellt ist und das Wasser abgeleitet und idealerweise einer Aufbereitung zugeführt werden sollte. Das Verfahren wird vorwiegend zum Trennen von Betonbauteilen, zum selektiven Abtrag sowie zur Reinigung verunreinigter Flächen aus mineralischen Baustoffen und zur Entfernung von Beschichtungen auf mineralischen Baustoffen eingesetzt. Bei Rückbauarbeiten im Bestand ist von einem massiven Wassereintritt in die umgebende Bausubstanz auszugehen.

## 5.4 Marktanalyse des EIV

Abbruch- und Trennverfahren kommen bei Neubaumaßnahmen, Maßnahmen im Bestand und Rückbaumaßnahmen zum Einsatz. Die etablierten Verfahren zeichnen sich durch hohe Emissionen und damit einhergehende Schutzmaßnahmen für das Bedienpersonal aus. Im vorhergehenden Abschnitt wurden die etablierten Abbruch- und Trennverfahren bereits vorgestellt. Mit der Entwicklung der innovativen Rückbautechnologie EIV kann ein Abbruch- bzw. Trennverfahren auf dem Markt etabliert werden, welches nahezu keine Emissionen erzeugt.

Im Rahmen einer Marktanalyse gilt es zu untersuchen, in welchen Bereichen das EIV als Rückbautechnologie etabliert werden kann und wie sich dieser Markt in Zukunft entwickelt.

Die Baubranche entwickelt sich aktuell gut und profitiert deutlich von der Niedrigzinspolitik der Europäischen Zentralbank. Die Bauinvestitionen sind von 2018 zu 2019 um 9 % auf rund 430 Mrd. Euro gestiegen [BAST2017, S 4]. Beim reinen Neubau werden nur bedingt Abbruch- und Trennverfahren eingesetzt, wohingegen diese bei Baumaßnahmen an bestehenden Gebäudestrukturen vermehrt verwendet werden. Im Jahr 2019 wurden 69 % der Bauleistungen des Wohnungsbaus an bestehenden Gebäuden durchgeführt und nur 31 % im Neubau [STA2020]. Bauleistungen an bestehenden Gebäuden beinhalten die Sanierung, Modernisierung und Renovierung im Hochbau. Demzufolge werden bei einem Großteil der Bauleistungen im Wohnungsbau Abbruch- und Trennverfahren zur Durchführung der Arbeiten eingesetzt.

Im Wirtschaftszweig 43.1 Abbrucharbeiten und vorbereitende Baustellenarbeiten gibt es im Jahr 2019 5.262 Betriebe, in welchen circa 40.000 Personen tätig sind [STA2021-1]. Diese Entwicklung des Baugewerbes wird durch die Umsatzentwicklung des Wirtschaftszweiges 43.1 verdeutlicht. Der Umsatz ist von 2012 bis 2018 von 2,2 Mrd. Euro auf 3,8 Mrd. Euro im Bereich der Abbrucharbeiten und von 3,1 Mrd. Euro auf 4,3 Mrd. Euro im Bereich der vorbereitenden Baustellenarbeiten angestiegen [STA2021-2]. Weiterhin ist das Investitionsvolumen in Sachanlagen im Wirtschaftszweig 43.1 im Jahr 2019 auf 228 Mio. Euro angestiegen [STA2021-3].

Anhand der aufgeführten Daten ist eine positive Entwicklung des Wirtschaftszweiges 43.1 zu erkennen. Das hohe Investitionsvolumen in Sachanlagen (z. B. Baumaschinen und Geräte) beschreibt den Markt für die Abbruchtechnologien und damit auch für die EIV-Technologie im Bauwesen.

Die Wahl des Verfahrens obliegt dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der vertraglich geforderten Leistungen des Auftraggebers. Die Entscheidung basiert auf der Wirtschaftlichkeit, der Arbeitssicherheit sowie dem Gesundheitsschutz und der Minimierung schädlicher Umwelteinflüsse.

Durch die innovative Rückbautechnologie EIV können mineralische Baustoffe bereits auf der Baustelle selektiv zurückgebaut werden. Die mineralischen Baustoffe werden mittels der elektrischen Impulse nicht nur aus dem Verbund gelöst, sondern zusätzlich zerkleinert. Durch die selektive Trennung und die Zerkleinerung der mineralischen Baustoffe auf der Baustelle ist es möglich, kostenintensive Arbeiten für das Brechen und Trennen von Baustoffen einzusparen. Dies stellt einen wirtschaftlichen Vorteil des EIV im Vergleich zu den etablierten Verfahren dar.

Eine Besonderheit des EIV ist die Möglichkeit, die Bewehrung des Stahlbetons lokal begrenzt ohne Beschädigung der Bewehrung freizulegen. Infolge der Zugbeanspruchung der mineralischen Baustoffe bleibt die Schädigung des Bauteils / Bauelementes lokal begrenzt. Die Elektroden des EIV werden auf den zurückzubauenden mineralischen Baustoff aufgesetzt beziehungsweise über diesen geführt. Es findet keine mechanische Belastung der Elektroden statt. Die Standzeit eines EIV-Gerätes ist im Vergleich zu den etablierten Abbruch- und Trennverfahren länger und der Verschleiß geringer.

In sensiblen Bereichen werden immer mehr Anforderungen hinsichtlich der Emissionen von eingesetzten Verfahren gestellt. Durch das EIV können die Emissionen deutlich gesenkt werden. Es treten nur geringe Erschütterungen, nahezu kein Lärm und keine Staubbelastung auf. Im Baugewerbe gibt es eine Vielzahl an Anwendungsbereichen für die innovative EIV-Rückbautechnologie, welche sich insbesondere durch eine Verringerung der Emissionen und den materialelektiven Rückbau von Baustoffen auszeichnet.

## 6 Experimentelle Untersuchungen zum EIV

### 6.1 Grundlagenversuche

#### 6.1.1 Versuchsbeschreibung

Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung geeigneter Impulsparameter und einer dazugehörigen Elektrodengestaltung für den Abtrag verschiedener Baumaterialien im baulichen Kontext. Damit sollen die Voraussetzungen für die Gestaltung einer EIV-Anwendungstechnologie geschaffen werden, mit der es möglich ist, beispielsweise eine bestehende Wand mit einem handgeführten Werkzeug partiell abzutragen. Da sich die bisherigen EIV-Forschungen auf den Abtrag von Natursteinen, wie Granit, und runde Bohrlöcher konzentriert haben, stellt die Ausrichtung auf einen großflächigen Abtrag eines Baustoffs ein neues Forschungsgebiet dar, für das die Grundlagen neu ermittelt werden müssen. Beton und Kalksandstein verfügen beispielsweise über ein anderes Gefüge und eine andere Druckfestigkeit als Granit. Aufgrund dessen müssen vor allem die Impulsparameter, die einen effizienten Abtrag ermöglichen sollen, neu ermittelt werden. Die Anpassung der Impulsparameter erfolgt über die Gestaltung der Elektrode und die Auslegung des Impulsspannungsgenerators. Da die Elektrode und der Generator aufeinander abgestimmt sein müssen, waren mehrere Iterationen in der Auslegung erforderlich.

Die Ermittlung der grundlegenden Parameter erfolgt über eine Vielzahl von Einzelversuchen, bei denen folgende Parameter variiert wurden:

- Elektrodengeometrie,
- Elektrodenabstand bzw. Elektrodenanordnung,
- Impulsanzahl,
- Impulsenergie,
- Polarität der Impulse,
- Baumaterial,
- Verschmutzungsgrad des Wassers und
- vertikaler bzw. horizontaler Abstand beim Nachsetzen der Elektrode.

Die Durchführung der Versuche erfolgte mit einem einfachen Versuchsaufbau, bestehend aus dem Impulsspannungsgenerator in einem Gehäuse, einem Wasserbecken und dem Probenhalter, der auch ein verstellbares Elektrodenpaar aufnimmt (siehe Abbildung 11). Die verwendeten Elektroden sind in Abbildung 12 dargestellt. Das Gehäuse des Impulsspannungsgenerators ist als Druckbehälter ausgeführt. Der Druck im Inneren beträgt 5 bis 6 bar. Durch den erhöhten Druck wird eine höhere Isolierfestigkeit der Luft im Gehäuse erreicht, mit der es möglich ist, höhere Spannungen am Generator zu erzeugen. Die Spannungsversorgung erfolgt über eine Stoßspannungsquelle, über die auch der Versuch gesteuert wird. Die Messung der Impulsspannung erfolgt über ein Oszilloskop.

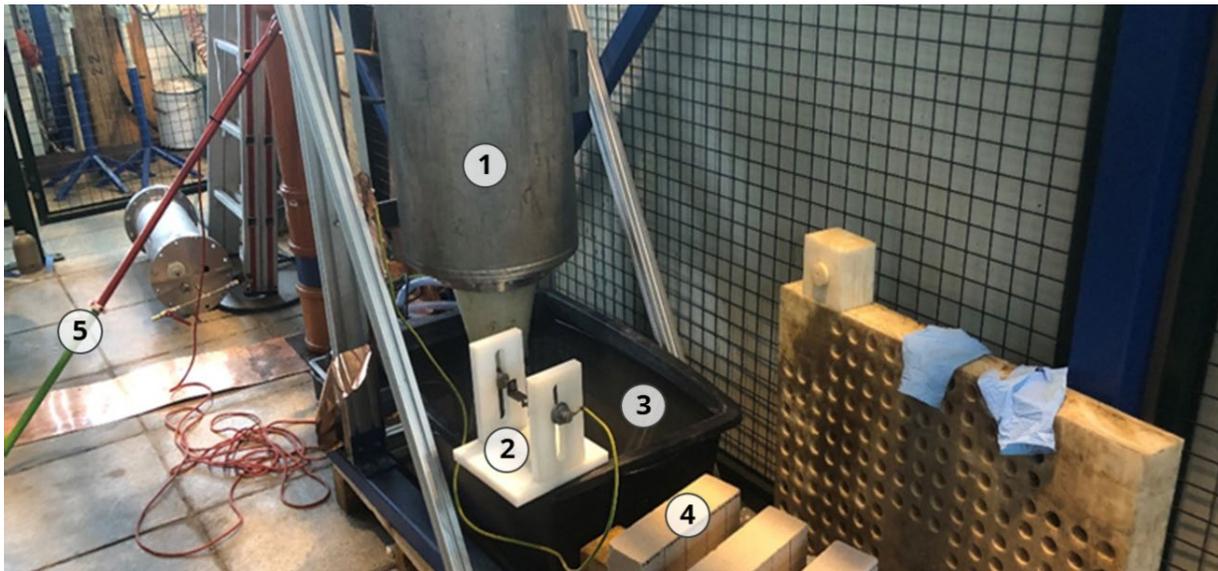


Abbildung 11: Versuchsaufbau für Grundlagenversuche (1 – Impulsspannungsgenerator im Druckbehälter, 2 – Probenbehälter, 3 – Wasserbecken, 4 – Kalksandsteinziegel, 5 – Erdung)

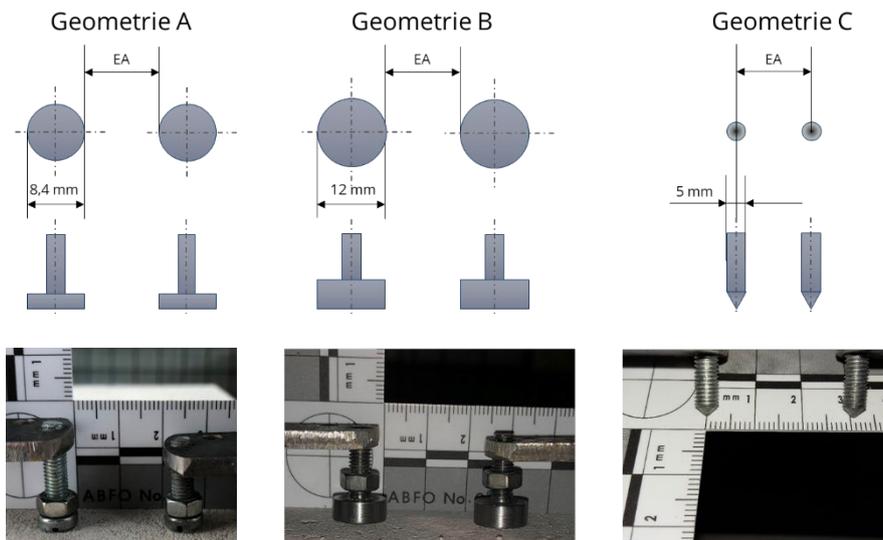


Abbildung 12: Elektrodenpaar A, B und C

Um die grundsätzlichen elektrischen Parameter des EIV bestimmen zu können, sollte zu Beginn ein möglichst homogener Baustoff verwendet werden. Deswegen fiel die Wahl zunächst auf Kalksandsteinziegel. Die Stoffkennwerte des verwendeten Kalksandsteins sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Stoffkennwerte Kalksandstein [BWL2020]

Maße	240x11x71	mm
Norm	DIN EN 771-2	
Druckfestigkeitsklasse	12	N/mm <sup>2</sup>
Mittlere Mindestdruckfestigkeit	15	N/mm <sup>2</sup>
Rohdichteklasse	2	kg/dm <sup>3</sup>
Rohdichte	1,81-2,00	kg/dm <sup>3</sup>
Gewicht	3,7	kg

Als Dielektrikum und Spülmedium kommt Leitungswasser zum Einsatz. Die Probenaufnahme wird zusammen mit dem Ziegel vollständig ins Wasser gelegt. Der genaue Ablauf eines Einzelversuches ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Schema Versuchsablauf

Die Proben werden in einer Weise beschriftet, dass jeder Einzelversuch genau zugeordnet werden kann. Die Beschriftung erfolgt direkt auf dem Ziegel. Die Beschriftung erfolgt nach dem in Abbildung 14 dargestellten Beispiel.

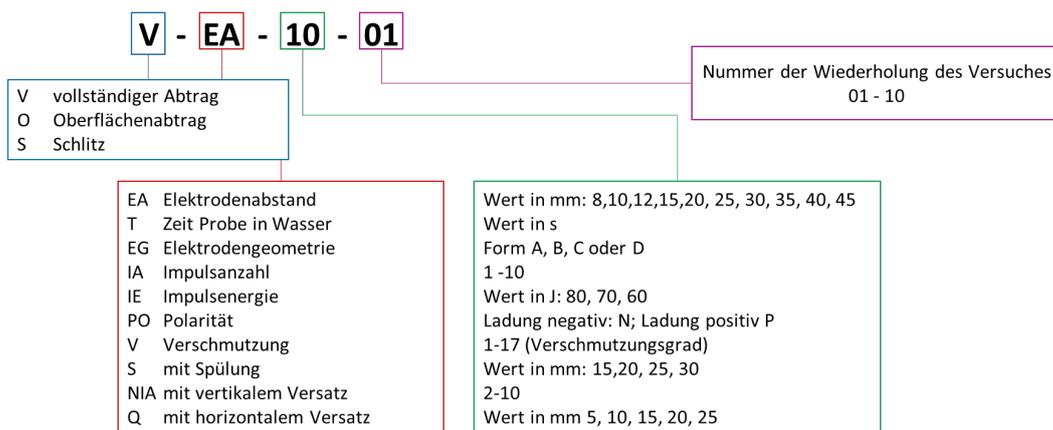


Abbildung 14: Beispiel Beschriftung der Probe

Der Ziegel wird vor und nach dem Versuch fotografiert, so dass zum Beispiel Rissausbreitungen nachvollzogen werden können (Abbildung 15). Bei Beton kann beispielsweise bei sehr grober Körnung zu erkennen sein, ob ein Riss sich entlang eines Kornes oder durch das Korn ausgebildet hat.



Abbildung 15: Versuchsdokumentation am Beispiel eines Versuchs mit Kalksandstein

Aus vorhergehenden Forschungsarbeiten und aus der Literatur ist bekannt, dass das Aufbringen von einem einzelnen Impuls nicht sehr effektiv ist. Durch den ersten Impuls wird das Gefüge meist nur vorgeschädigt. Erst beim zweiten oder dritten Impuls wird Material herausgelöst. Deswegen werden bei einem Einzelversuch immer fünf Impulse auf die gleiche Stelle des Gesteins aufgebracht, ohne die Elektroden oder das Gestein dabei zu versetzen. Nach den Versuchen soll der entstandene Krater im Gestein und damit das herausgelöste Volumen bestimmt werden.

Dies erfolgt über die Verwendung eines Abformsilikons. Die Materialeigenschaften des Silikons sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Stoffkennwerte Abformsilikon [TFC2020]

TFC Silikon Kautschuk Typ 28 Abformsilikon mittelhart 1:1 RTV NV		
Dichte	1,16	g/cm <sup>3</sup>
Mischzeit (23 °)	1	min
Verarbeitungszeit (23 °C)	15	min
Aushärtezeit (23 °C)	60	min
Viskosität	4000	mPas
Dimensionsänderung nach 24 h	0,02	%
Reißfestigkeit	9	N/mm <sup>2</sup>

Das Silikon wird nach dem Versuch in den Krater eingebracht. Um ein rückstandsfreies Herauslösen des Silikons aus dem Stein zu gewährleisten, wird der Krater zuvor mit Klarlack eingesprüht. Nach der Aushärtung wird das Silikon aus dem Krater herausgelöst. Die Breite, Länge und Dicke des Silikonstückes werden vermessen, woraus die Breite, Länge und Tiefe des Kraters abgeleitet werden können. Es wurden jeweils die Maximalwerte für Länge, Breite und Tiefe gemessen. Oft hat der entstandene Krater eine sehr unregelmäßige Form. Über die Masse und die bekannte Dichte des Silikonstückes kann dessen Volumen und damit das Kratervolumen bestimmt werden.

Die Daten, die für jeden Versuch erfasst, gemessen und berechnet werden, sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24: Erfasste Messdaten

<b>Erfassen/Messen vor dem Versuch von</b>	<b>Messen nach dem Versuch von</b>	<b>Berechnen</b>
Versuchsnummer	Dicke Silikonstück	Ausgangsspannung
Elektrodenabstand	Breite Silikonstück	projizierte Fläche
Elektrodenform	Länge Silikonstück	Verhältnis Länge/Breite
Zeit des Steins im Wasser	Masse Silikonstück	Überschnitt Länge
Ladespannung		Überschnitt Breite
Anzahl der Impulse		Volumen
Leitfähigkeit Wasser		spez. Energie
Temperatur Wasser		Nutzleistung
Erfassen/Messen der Werte für jeden Einzelversuch		
Bilden des Mittelwertes jedes Parameters für eine Versuchsreihe		
Bestimmung Standardabweichung jedes Parameters einer Versuchsreihe		
Bestimmung Minimum jedes Parameters einer Versuchsreihe		
Bestimmung Maximum jedes Parameters einer Versuchsreihe		

Die Auswertung erfolgte nur für Versuche, bei denen ein vollständiger Krater entstanden ist (Abbildung 15, Mitte). Bei einigen Versuchen kam es nur zu punktuellen Ausbrüchen (Abbildung 16, links) oder es entstand nur ein schmaler Durchschlagskanal (Abbildung 16, rechts). Der Durchschlag erfolgt im Gestein, allerdings reicht die Energie des Impulses nicht aus, um einen vollständigen Krater auszubilden. Der Kalksandstein wird vermutlich auf Grund seiner geringen Festigkeit und Porosität nachgeben, wodurch die Zugspannungen nicht auf das umliegende Gestein übertragen werden.



Abbildung 16: Punktuelle Ausbrüche (li.) und Ausbildung des Durchschlagkanals (re.)

### 6.1.2 Versuchsablauf

Tabelle 25 stellt den durchgeführten Versuchsplan für Kalksandstein dar. Dabei wird für jede Versuchsreihe die verwendete Elektrode, die eingestellten Elektrodenabstände, die Polarität des Impulses, die Impulsanzahl, die Energie des Generators, ob Spülung verwendet wurde oder nicht und welche Zeit der Stein im Wasser lag, bevor die Impulse aufgegeben wurden dokumentiert. Zusätzlich ist dargestellt, wie viele Einzelversuche für jede Versuchsreihe durchgeführt wurden. Insgesamt sind es 916 Einzelversuche. Davon konnten 592 Versuche ausgewertet werden. Dies sind rund 65 % der Versuche.

Tabelle 25: Versuchsmatrix Kalksandstein

Versuchsreihe	Elektrodengeometrie				Elektrodenabstand in mm											Polarität		Impulsanzahl										Energie des Generators in %					Spülung			Zeit Stein im Wasser in min			Einzelversuche gesamt	ausgewertete Versuche	
	A	B	C	D	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	-	+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100	90	80	70	60	50	ohne	mit	< 5	5 - 10	10 - 20	> 20			
V_EA	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*					*						*					*	*	*	*				112	72	
V_T	*							*							*					*							*				*	*	*	*				25	25		
V_IA	*							*							*	*	*	*	*	*							*				*	*	*	*				20	20		
V_EG_B	*	*						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*						*				*	*	*	*				82	54		
V_EG_C		*						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*						*				*	*	*	*				82	41		
V_T_C		*						*							*					*						*				*	*	*	*				40	36			
V_IA_A	*							*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		20	19		
V_IA_B		*						*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		60	37		
V_IA_C		*						*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		105	70		
V_IE_A	*							*							*					*						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		50	23		
V_IE_B		*						*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		55	18	
V_IE_C		*						*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		50	17	
V_S_A	*							*	*	*	*				*					*						*				*	*	*	*	*	*	*	*		40	23	
V_S_B		*						*	*	*	*				*					*						*				*	*	*	*	*	*	*	*		40	26	
V_S_C		*						*	*	*	*				*					*						*				*	*	*	*	*	*	*	*		40	34	
V_S_D		*						*	*	*	*				*					*						*				*	*	*	*	*	*	*	*		40	31	
V_NIA_A	*							*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		30	21	
V_NIA_C		*						*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		25	25

### 6.1.3 Variation des Elektrodenabstandes

Der Abstand der Elektroden wurde zu Beginn für die Elektrode A zwischen 8 mm und 45 mm variiert. Der Abstand bezieht sich auf den inneren Abstand zwischen den Elektroden (EA in Abbildung 12). Begonnen wurde mit 8, 10 und 12 mm Elektrodenabstand. In vorhergehenden Forschungen mit hartem Gestein, wie Granit, war bekannt, dass mit diesen Elektrodenabständen eine effektive Gesteinslösung möglich ist. Für den Kalksandstein zeigte sich schnell, dass auch größere Elektrodenabstände möglich sind. Deswegen wurde dieser bis auf 45 mm erweitert. Bei 45 mm konnten keine Einzelversuche mehr ausgewertet werden und es wurde auf Versuche mit noch größeren Abständen verzichtet. Für die Elektroden B und C wurde auf Versuche mit den kleinen Elektrodenabständen verzichtet, es wurden ausschließlich Versuche mit Elektrodenabständen zwischen 15 und 45 mm durchgeführt.

Bei der Bewertung der Effizienz des Systems sind das gelöste Volumen, die daraus resultierende spezifische Energie und die Nutzleistung am aussagefähigsten. Der Mittelwert und die dazugehörigen Minimal- und Maximalwerte aus den Einzelversuchen des gelösten Volumens und der spezifischen Energie sind für die drei verschiedenen Elektroden in Abbildung 17 dargestellt.

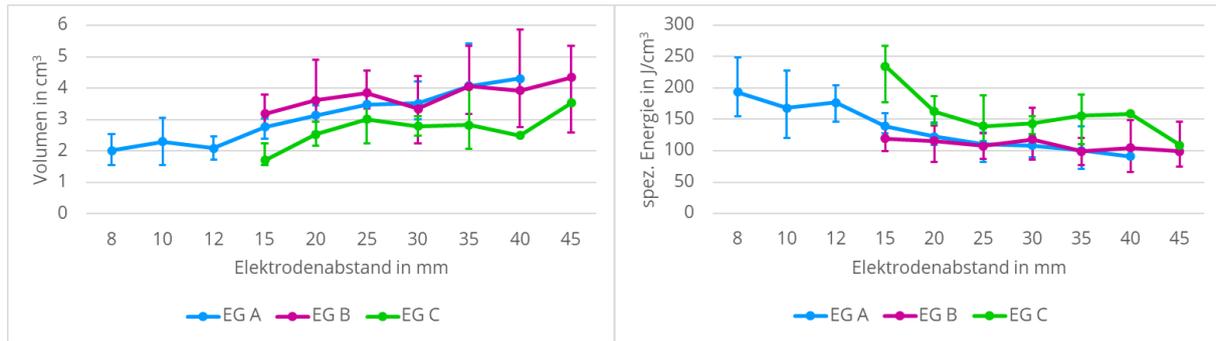


Abbildung 17: Gelöstes Volumen (li.) und spez. Energie (re.) in Abhängigkeit des Elektrodenabstands

Bei allen drei Elektroden ist zu erkennen, dass das gelöste Volumen bis zu einem Elektrodenabstand von 25 mm zunimmt. Danach ist nur noch eine geringe Zunahme zu erkennen. Abbildung 18 verdeutlicht die Ergebnisse graphisch. Die Anzahl der ausgewerteten Versuche nimmt ab 25 mm zusätzlich deutlich ab. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Elektrodenabstand bei Kalksandstein für den verwendeten Generator nicht größer als 20 mm sein sollte.

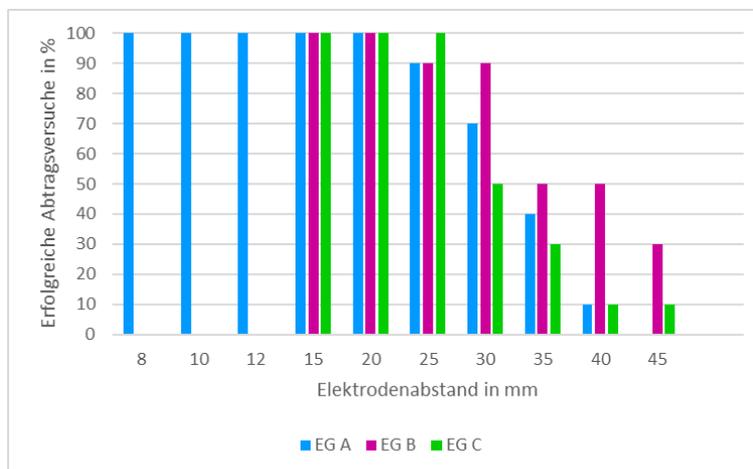


Abbildung 18: Ausgewertete Einzelversuche in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes

Aus Sicht des gelösten Volumens ist die Elektrode B die Vorzugsvariante für den vollflächigen Abtrag. Durch die größere Grundfläche hat die Elektrode auch dann noch Kontakt mit dem Gestein, wenn bereits ein Krater entstanden ist. So kann der nächste Impuls automatisch an einer anderen Stelle in das Gestein eindringen und dieses herauslösen. Außerdem ist die größere Elektrodenform aus mechanischer Sicht zu bevorzugen, da diese deutlich robuster ist als z. B. die beiden Spitzen der Elektrode C.

Auf die Eindringtiefe des Impulses und damit auf die abgetragene Materialtiefe hat der Elektrodenabstand keinen Einfluss. Diese liegt für alle Versuche im Bereich von 6 – 8 mm.

### 6.1.4 Variation der Impulsanzahl

Zu Beginn der Versuche wurde aus Erfahrungswerten eine Impulsanzahl von fünf pro Versuch festgelegt. Bei der Durchführung der Versuche wurde akustisch festgestellt, dass die ersten zwei bis vier Impulse lauter und dumpfer klingen. Dieses deutet darauf hin, dass der Impuls durch das Gestein erfolgt. Die restlichen Impulse klangen hingegen leiser und heller. Dies ließ vermuten, dass diese Entladungen im Wasser, also außerhalb des Festgesteins stattfanden. Um diese Annahme zu belegen, wurden in den nächsten Versuchen die Anzahl der Impulse ohne ein Versetzen der Elektrode untersucht. In Abbildung 19 ist das gelöste Volumen und die dazugehörige spezifische Energie in Abhängigkeit der Impulsanzahl dargestellt. Zu sehen ist der Mittelwert und die erreichten Minimal- und Maximalwerte aus den Einzelversuchen. Der Elektrodenabstand betrug bei dieser Versuchsreihe 20 mm.

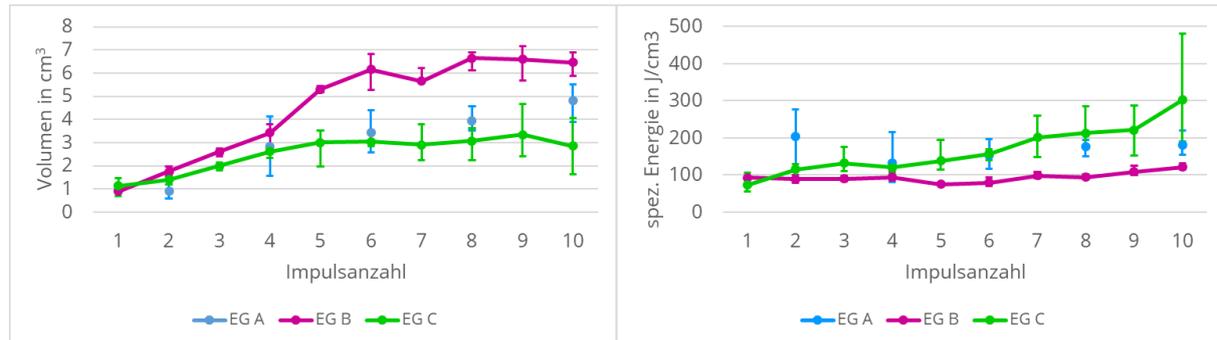


Abbildung 19: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit der Impulsanzahl

Es ist zu erkennen, dass bis zu einer Anzahl von sechs Impulsen mit jedem Impuls mehr Volumen gelöst werden kann. Bei einer höheren Impulsanzahl ist das gelöste Volumen annähernd konstant. Das bestätigt die Annahme, dass nur die ersten Impulse durch das Gestein verlaufen und Material lösen. Vermutlich ist dann das Gestein um die Elektrode vollständig gelöst und es besteht kein direkter Kontakt mehr zwischen Elektrode und Gestein. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Entladung im Gestein erfolgt.

Es wird außerdem deutlich, dass mit der Elektrode B mehr Volumen als mit der Elektrode C gelöst werden kann. Dies liegt, wie bereits beschrieben, an der größeren Kontaktfläche zwischen Elektrode und Gestein.

Für einen kontinuierlichen Fortschritt ist neben der Maximierung des gelösten Materials auch die dabei entstehende Geometrie zu beachten. Soll z. B. die Elektrode in den entstandenen Krater nachgesetzt werden, dann muss dies geometrisch gewährleistet sein. Das heißt, dass die Außenkontur der Elektrode in die Kontur des Kraters passen muss. Es wird ein bestimmter Überschchnitt benötigt. Ein Überschchnitt ist gewährleistet, wenn das gelöste Volumen über die Außengeometrie der Elektrode hinausreicht. Berechnet wird der Überschchnitt aus der Differenz zwischen der Außengeometrie der Elektrode und der maximalen Länge des Kraters. Bei einem negativen Überschchnitt befindet sich demnach noch Gestein unter der Elektrode, wodurch es nicht möglich ist, die Elektrode nachzusetzen. Mit jedem Impuls wird mehr Gestein abgetragen und damit vergrößert sich der entstandene Krater. Dies wird durch Abbildung 20 noch einmal verdeutlicht. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der größten Länge des Kraters mit den entsprechenden Minimal- und Maximalwerten aus den zehn Einzelversuchen.

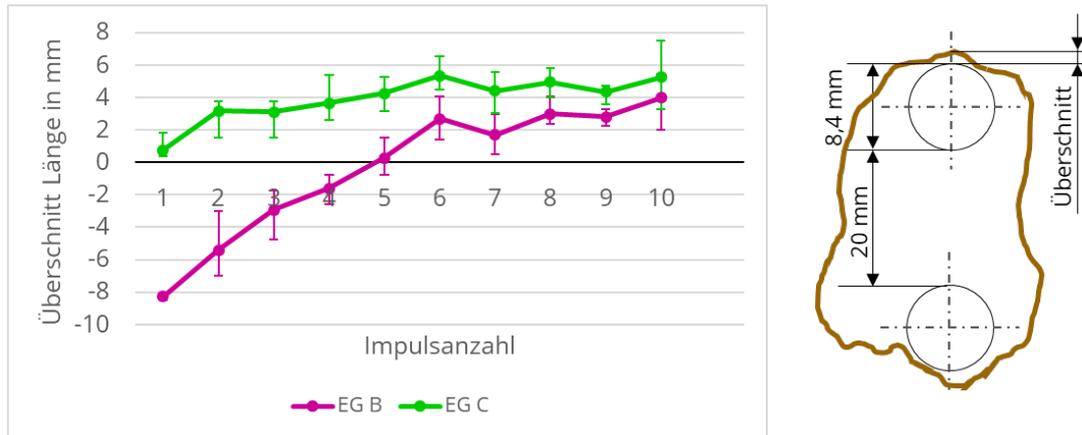


Abbildung 20: Überschnitt in Längsrichtung in Abhängigkeit der Impulsanzahl

Es ist zu erkennen, dass die Elektrode B bei wenigen Impulsen einen negativen Überschnitt hat. Das heißt, sie kann nicht in den Krater nachgesetzt werden, da die Elektrode noch auf der Gesteinsfläche um den Krater aufsetzt. Dies wird in der folgenden Abbildung noch einmal verdeutlicht. Es werden mindestens 5 Impulse auf derselben Stelle benötigt, um das gesamte Material unter der Elektrode abzutragen.

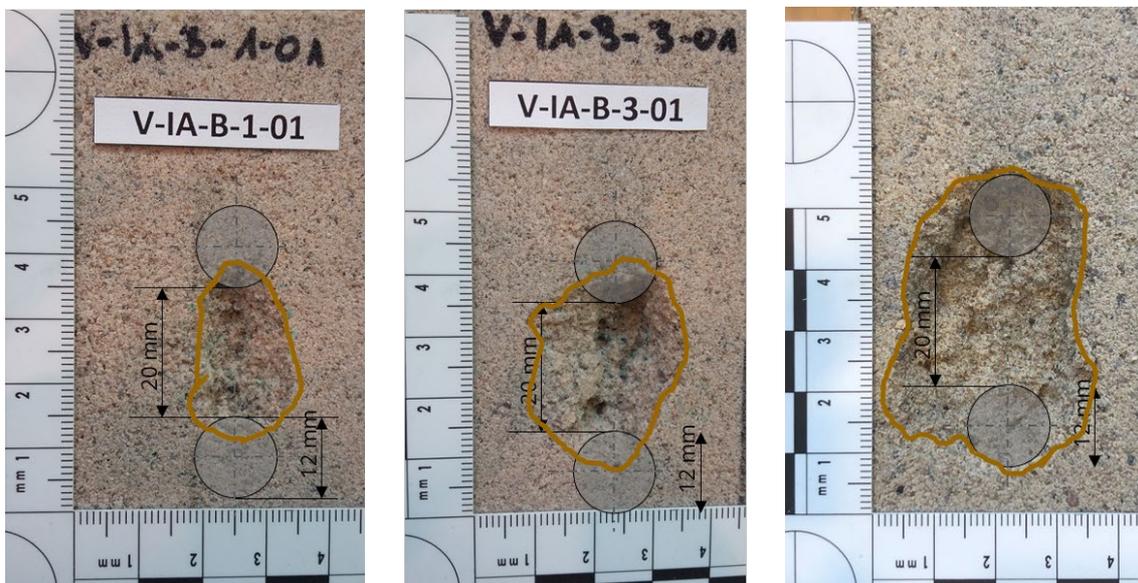


Abbildung 21: Entstandene Krater nach 1, 3 und 6 Impulsen mit Elektrode B

Aus dieser Betrachtung heraus ist die Elektrode C mit dem kleinsten Durchmesser am besten geeignet, da bei dieser ein Nachsetzen schon ab dem 1. Impuls möglich wäre.

Wird für den Betrieb in der Praxis eine Impulswiederholrate von 25 Hz angestrebt, ist davon auszugehen, dass mehrere Impulse an der annähernd gleichen Stelle in das Gestein eingeleitet werden. Für diesen Fall wäre die Elektrode B zu bevorzugen, da so sichergestellt ist, dass immer ein Eintrag des Impulses in das Gestein erfolgt. Bei Elektrode C kann bereits nach einem Impuls kein Kontakt mehr mit dem Gestein garantiert werden. Somit kann es passieren, dass mehrere Impulse nicht in das Gestein eindringen, bevor die Elektrode nachgeführt werden kann. Somit ist die Wahl der Elektrodengeometrie stark von der späteren Anwendung abhängig.

### 6.1.5 Variation der Impulsenergie

Die Energie, die in einem Impuls steckt, hängt von der Kapazität des Impulsspannungsgenerators und der Impulsspannung ab. Eine zu geringe Impulsenergie kann dazu führen, dass das vorliegende Material nicht gelöst werden kann. Dahingegen kann eine zu hohe Impulsenergie wiederum dazu führen, dass die Bestandteile nicht mehr entlang der Korngrenzen getrennt werden und somit viel Energie für die unerwünschte Zerkleinerung der einzelnen Bestandteile verbraucht wird.

Formel 1: Impulsenergie (1)

$$E_{Imp} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$E_{Imp}$  – Impulsenergie in J

$C$  – Kapazität in F

$U$  – Spannung in V

Der für die Versuche eingesetzte Generator verfügt über 5 Stufen mit jeweils 10 Kondensatoren. Die Ladespannung beträgt etwa 40 kV. Damit ergibt sich eine Entladespannung von ca. 200 kV. Je nach Anzahl der Stufen in Verbindung mit den Kondensatoren kann die Ladespannung und damit auch die Entladespannung verändert werden. Es sollte untersucht werden, inwieweit sich eine Reduzierung der Impulsenergie auf das Löseverhalten auswirkt. Eine reduzierte Impulsenergie bedeutet für den Anwendungsfall einen geringeren Leistungsbedarf, was sich in einer Kosteneinsparung infolge Reduktion der erforderlichen Energie widerspiegelt.

Die Impulsenergie wurde reduziert, indem aus jeder Stufe ein Kondensator entfernt wurde. Für den verwendeten Generator (ca. 80 J) sind das ca. 8 J (10 %) weniger pro entferntem Kondensator. Die Ladespannung wurde dabei konstant gehalten (Abbildung 22).

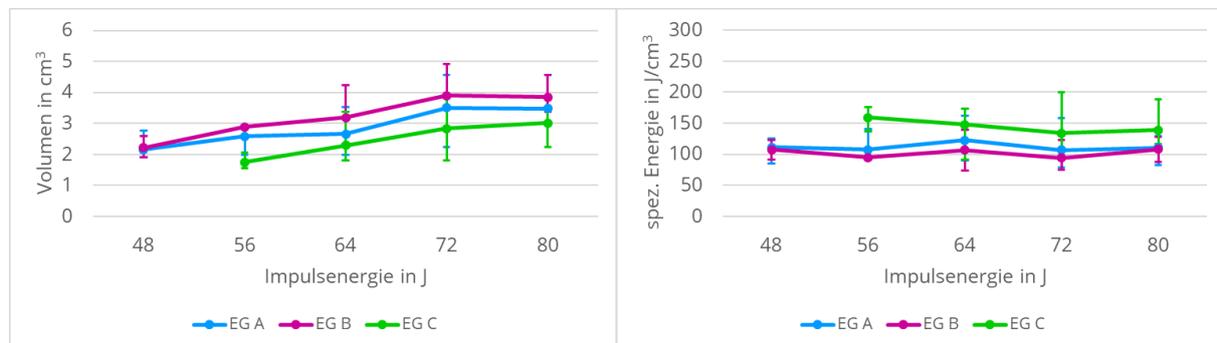


Abbildung 22: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) bei Variation der Impulsenergie (Elektrodenabstand EA = 25 mm)

Es ist zu erkennen, dass das gelöste Volumen mit der Reduzierung der Impulsenergie abnimmt. Wird die spezifische Energie betrachtet, zeigt sich, dass diese annähernd konstant ist. Das heißt, dass das gelöste Volumen und die Impulsenergie in einem konstanten Verhältnis zueinanderstehen. Werden aber die auswertbaren Versuche mit einbezogen, dann zeigt sich, dass eine Reduzierung der Impulsenergie die Wahrscheinlichkeit, Gestein zu lösen, deutlich reduziert (Abbildung 23).

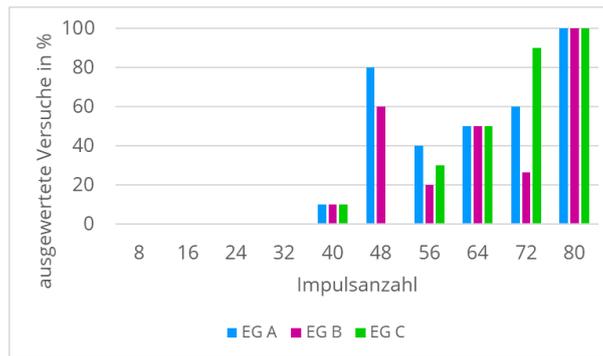


Abbildung 23: Anzahl der ausgewerteten Versuche für verschiedene Impulsanzahlen

Die Anzahl der ausgewerteten Versuche und damit die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Impuls sinken deutlich mit der Reduzierung der Impulsenergie. Es ist also empfehlenswert, die maximal mit dem Generator mögliche Impulsenergie zu verwenden, um einen konstanten Abtrag zu gewährleisten.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich auch eine Erklärung für die bereits vorher festgestellten nicht auswertbaren Versuche begründen. Es ist anzunehmen, dass die Impulsenergie gerade ausreicht, um einen Abtrag zu gewährleisten. Die verwendeten Kalksandsteinziegel können leichte Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften, wie bspw. Druckfestigkeit oder Porosität, haben. Aufgrund dieser Unterschiede kann es sein, dass die Impulsenergie bei einer höheren Porosität oder einer höheren Druckfestigkeit nicht mehr ausreicht, um das Gestein vollständig zu lösen.

#### 6.1.6 Spülen des Abtragbereiches

Die bisher durchgeführten Versuche wurden in einem Wasserbecken ohne Zirkulation durchgeführt. Das heißt, dass durch die Impulse gelöste Gestein bleibt in dem Abtragbereich liegen. Ein möglicher Nachteil davon könnte sein, dass es bei nachfolgenden Impulsen statt zum Lösen von neuem Material zu einer Weiterzerkleinerung des bereits abgetragenen Materials kommt. Dies würde zu einer Reduzierung des Wirkungsgrads des Verfahrens führen. Um dies zu verhindern und diese Vermutung zu beurteilen, wurde der Bereich zwischen den Elektroden mit einem stetigen Volumenstrom gereinigt. Dies hat neben dem Abtransport des Materials noch den Vorteil, dass eventuell entstehende Luftblasen ebenfalls weggespült und so Fehlimpulse verhindert werden.

Verwendet wurde eine Schmutzwassertauchpumpe mit einem konstanten Volumenstrom von circa 40 l/min. Dieser Volumenstrom war ausreichend, um das abgetragene Material aus dem Bereich zwischen den Elektroden zu entfernen. Bei der angewendeten Impulswiederholrate von 1,5 Hz erfolgte die vollständige Reinigung jeweils zwischen zwei Impulsen. So konnte sichergestellt werden, dass der Abtragbereich bei jedem Impuls vollständig bereinigt war.

Ziel dieser Untersuchung war herauszufinden, ob sich das Abtragverhalten durch den Einsatz der Spülung verbessert und ob eine Nachzerkleinerung verhindert werden kann. Dazu wurden Versuche mit einem Elektrodenabstand von 15 bis 30 mm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt.

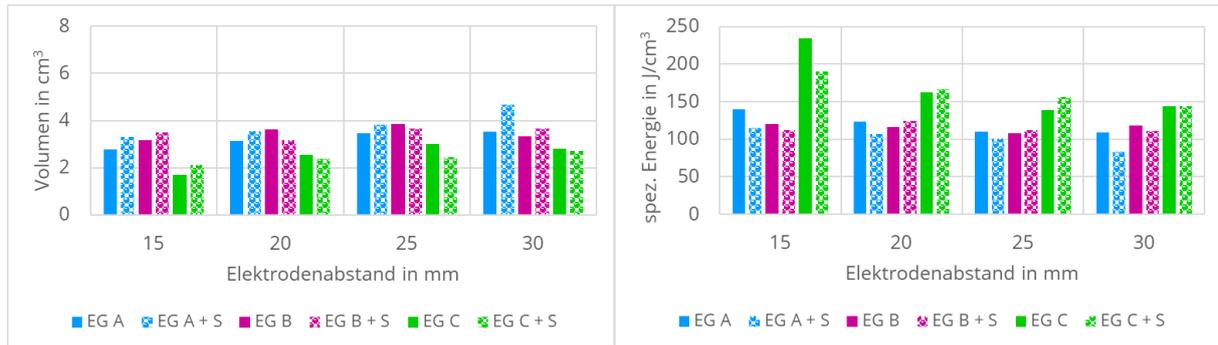


Abbildung 24: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) mit und ohne Wasservolumenstrom

Es ist zu erkennen, dass das Spülen des Abtragbereiches keinen nennenswerten Einfluss auf die Löseleistung hat. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit und ohne Wasservolumenstrom sind gering und lassen sich sowohl auf die Inhomogenität des verwendeten Steins als auch auf das Verfahren selbst zurückführen.

Zusätzlich zu dem gelösten Volumen wurde auch die Partikelgrößen des gelösten Materials untersucht. Dazu wurde jeweils eine Probe des Abtragmaterials nach den Versuchen ohne und mit Volumenstrom genommen und anschließend die Partikelgrößenverteilung durch Siebung bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 25 zu sehen.

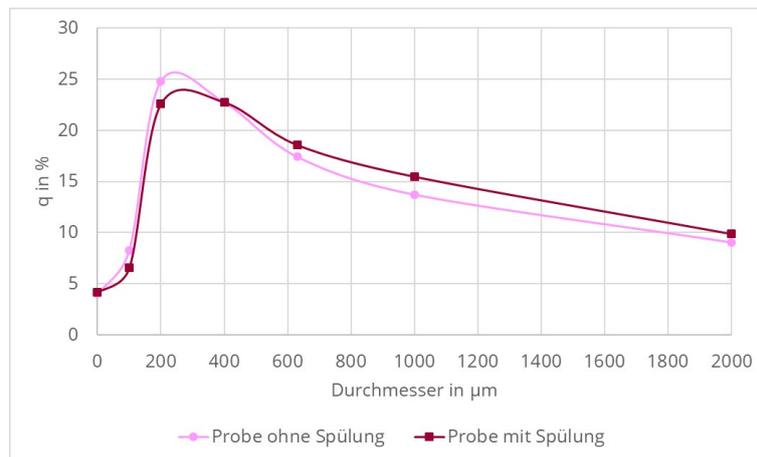


Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung nach Siebung

Die Siebung der beiden Proben ergibt ein ähnliches Bild, wie auch die Betrachtung des gelösten Volumens. Es ist ein kleiner Unterschied zwischen den beiden Proben zu erkennen. Dieser ist allerdings so gering, dass er auf eine mögliche unterschiedliche Probennahme zurückzuführen sein kann.

Insgesamt kann aus den Ergebnissen der Rückschluss gezogen werden, dass es auch ohne Spülung nicht zu einer Nachzerkleinerung des bereits abgetragenen Materials kommt. Es kann aber auch festgestellt werden, dass der Wasservolumenstrom keinen negativen Einfluss auf das Löseverhalten hat. Demzufolge muss lediglich sichergestellt sein, dass durch den Wassereintrag keine Luftblasen in den Bereich der Elektroden eingebracht werden.

In der Praxis werden nicht nur kleine Bereiche abgetragen, sondern es werden große Volumina zu entfernen sein. Für diesen Fall muss ein stetiger Abtransport des Materials gewährleistet werden. Dabei ist es von Vorteil, dass der Wasservolumenstrom keinen Einfluss auf das Löseverhalten hat, da so der Volumenstrom unabhängig von den Impulsparametern auf den idealen Abtransport eingestellt werden kann.

### 6.1.7 Einfluss der Verschmutzung des Wassers

Das Elektro-Impuls-Verfahren benötigt Wasser als umgebendes Medium (Dielektrikum). Das Wasser hat den Vorteil, dass feine sowie feinste Partikel gebunden werden, wodurch kein Staub entsteht. Über das Wasser lässt

sich der Abtransport des abgebauten Materials gut umsetzen. Verfahrensbedingt wird sowohl eine ständige Zufuhr von Wasser als auch die Entsorgung des Schmutzwassers benötigt. Ein hoher Wasserverbrauch ist mit erhöhten Kosten verbunden und ökologisch als kritisch zu betrachten, weshalb eine Aufbereitung des anfallenden Wassers für eine erneute Verwendung anzustreben ist. Da ganz allgemein gesagt werden kann, dass der Aufwand zum Abtrennen von Feststoff größer wird, je feiner die Partikel werden, kam die Fragestellung auf, inwieweit das EIV von Feststoff in Wasser beeinträchtigt wird. Dabei waren vor allem die feinen Partikel von Interesse, die nicht unmittelbar absinken, sondern in dem Bereich zwischen den Elektroden verweilen.

Um den Einfluss der Verschmutzung zu untersuchen, wurden jeweils 5 Einzelversuche für verschiedene Verschmutzungsgrade durchgeführt. Begonnen wurde mit sauberem Leitungswasser. Danach wurden jeweils 250 g Feststoff hinzugegeben. Der Feststoff war das Material, dass durch alle vorangegangenen Versuche entstanden ist und gesammelt wurde. So konnte sichergestellt werden, dass für die Verschmutzung jenes Material genommen wurde, welches durch das EIV entstanden ist. Insgesamt wurde 16-mal Feststoff hinzugegeben. Zusätzlich entstand bei jedem Einzelversuch weiteres gelöstes Material, das ebenfalls im Becken verblieb und zusätzlich hinzugerechnet wird. Nach den 17 Versuchsreihen befand sich somit 4,7 kg Feststoff in dem Wasserbecken (ca. 75 l). Dies entspricht 63 kg Feststoff auf 1 m<sup>3</sup> Wasser.

Die Versuche wurden mit einem Elektrodenabstand von 15 mm, der Elektrode B und mit Spülen des Abtraggereiches durchgeführt. Die Ergebnisse der 17 Versuchsreihen sind in Abbildung 26 dargestellt. Zu sehen ist jeweils der Mittelwert des gelösten Volumens bzw. der spezifischen Energie mit den entsprechenden Minimal- und Maximalwerten aus den fünf Einzelversuchen.

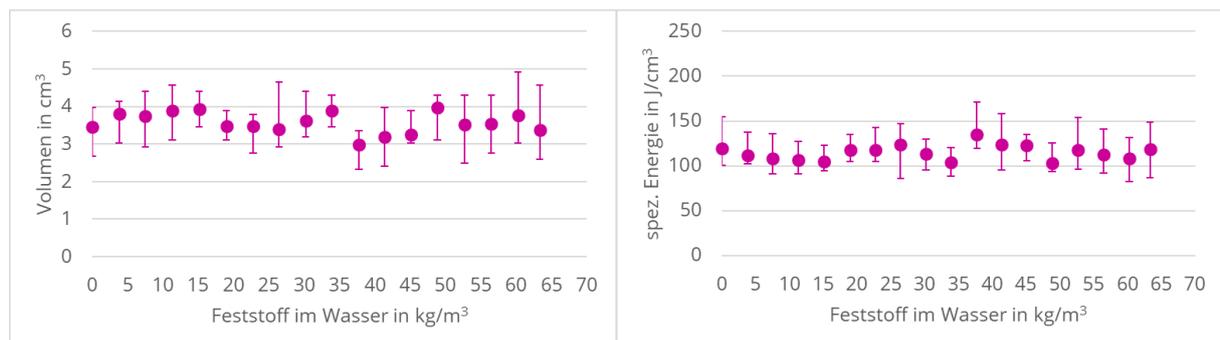


Abbildung 26: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades

Es ist zu erkennen, dass sowohl das Volumen als auch die spezifische Energie in einem bestimmten Bereich konstant sind. Die Schwankung des gelösten Volumens und damit der spezifischen Energie wird, wie bereits vorher beschrieben, durch das Verfahren selbst, als auch durch die Inhomogenität des Gesteins erzeugt. Es kann festgestellt werden, dass die Verschmutzung bis zu dem erreichten Verschmutzungsgrad keinen Einfluss auf das EIV hat. Das Wasser war nach Beendigung der Versuche deutlich getrübt (Abbildung 27, links). Die feinen Partikel haben sich nach circa 4 Tagen abgesetzt, sodass anschließend das Wasser entfernt werden konnte. In Abbildung 27, rechts ist der eingetragene und entstandene Feststoff zu sehen.



Abbildung 27: Getrübtes Wasser (li.) und Feststoff im Versuchsbecken (re.)

Um den Feststoffanteil und die Partikelgröße in dem trüben Wasser bestimmen zu können, wurde nach jedem Versuch eine Wasserprobe entnommen. Für diese Proben wurde der Masseanteil des Feststoffes bestimmt (Abbildung 28). Der Feststoffanteil, hat wie zu erwarten war, stetig zugenommen. Die Streuung kann auf die Probenahme zurückgeführt werden. Die letzte Wasserprobe hat einen Feststoffanteil von circa 0,3 %. Dies würde bei 1 m<sup>3</sup> (65 kg Feststoff insgesamt) etwa 190 g feine Partikel bedeuten, die nicht durch einfache Sedimentation abgetrennt werden können und weitere Aufbereitungsschritte benötigen.

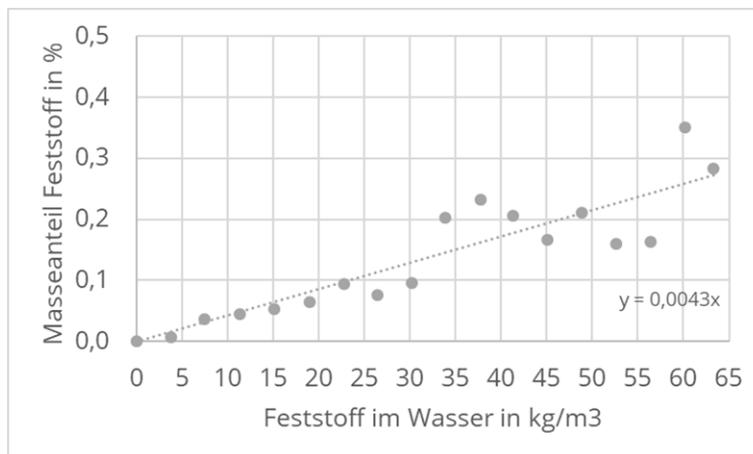


Abbildung 28: Masseanteil Feststoff des getrübten Wassers

Damit diese weiteren Aufbereitungsschritte konzeptioniert werden können, muss die Partikelgröße bekannt sein. Diese wurde für den Feinanteil mittels Siebklassifizierung (Partikel > 100 µm) und einer Partikelanalyse mit dem Partikelmessgerät LA-300 HORIBA (Partikel < 100 µm) ermittelt (Abbildung 29). In das Messgerät wurden nur Partikel < 100 µm gegeben. Gemessen wurden auch größere Partikel. Diese haben sich höchstwahrscheinlich im Messgerät zu größeren Partikeln konglomeriert.

Die kleinste gemessene Partikelgröße beträgt 3 µm. Das heißt, dass bei der Konzeptionierung der Wasseraufbereitung möglichst auch diese Partikelgröße mit vorgesehen werden muss, auch wenn das EIV einen gewissen Feststoffanteil verträgt.

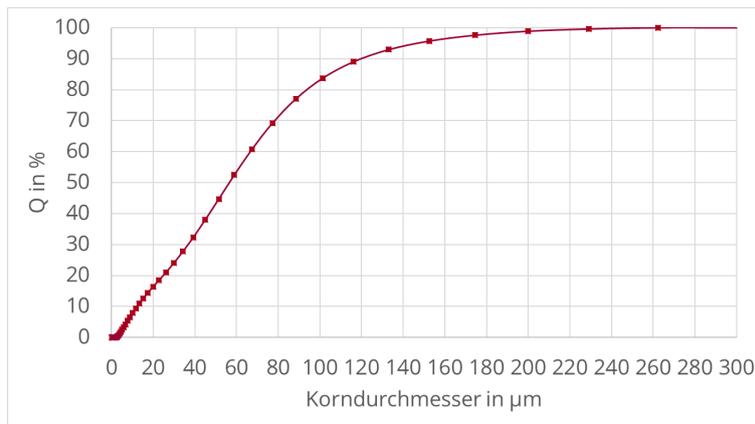


Abbildung 29: Partikelanalyse mit dem Partikelmessgerät LA-300 HORIBA

### 6.1.8 Variation der Impulswiederholrate

Die bisherigen Versuche wurden mit einer Impulswiederholrate von 1,5 Hz durchgeführt. Diese wurde gewählt, da die Versuche manuell gestartet und gestoppt werden. Bei 1,5 Hz lassen sich die einzelnen Impulse akustisch gut voneinander unterscheiden und die Umsetzung der richtigen Impulsanzahl kann sichergestellt werden. In der Praxis wären 1,5 Hz für einen effektiven Abtrag zu wenig. Es werden 20 bis 25 Hz für die praktische Umsetzung angestrebt. 25 Hz ist die technische Obergrenze, da sonst die Kondensatoren des Impulsspannungsgenerators überhitzen.

Die Fragestellung hier war, ob sich die Impulswiederholrate auf die Löseleistung des Verfahrens auswirkt. Um dies zu beantworten, wurden Versuche mit 0,5 Hz, 2 Hz und 4 Hz durchgeführt. Ein Versuch mit mehr als 4 Hz war mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht möglich, da wie bereits beschrieben, das Ein- und Ausschalten manuell erfolgt. Bei einer höheren Impulswiederholrate konnte nicht sichergestellt werden, dass nur 5 Impulse pro Einzelversuch erzeugt werden. Das Ergebnis der Versuche ist in Abbildung 30 dargestellt.

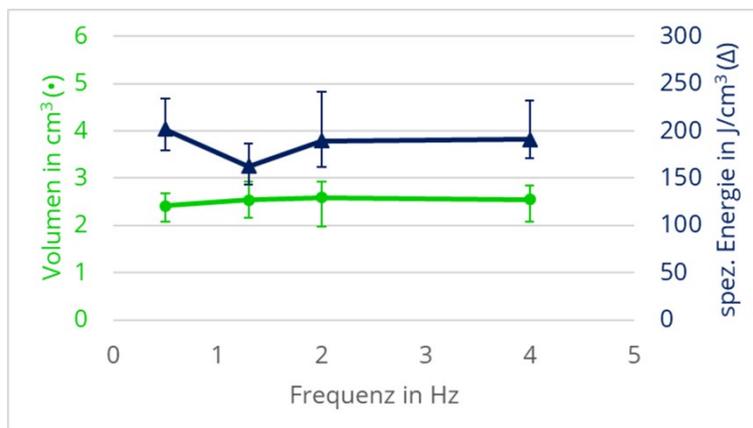


Abbildung 30: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit der Impulswiederholrate

Es konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Impulswiederholraten bis 4 Hz festgestellt werden. Für höhere Impulswiederholraten muss dies noch weiter untersucht werden.

### 6.1.9 Nachsetzen der Elektrode

Die bis hierhin gewonnenen Erkenntnisse aus den Einzelversuchen sollten nun schrittweise in einen praxisrelevanten Maßstab überführt werden. Für einen großflächigeren Abtrag ist es erforderlich, die Elektrode

nachzusetzen. Dies ist in die Tiefe des Materials (vertikal) oder parallel zu dessen Oberfläche (horizontal) möglich.

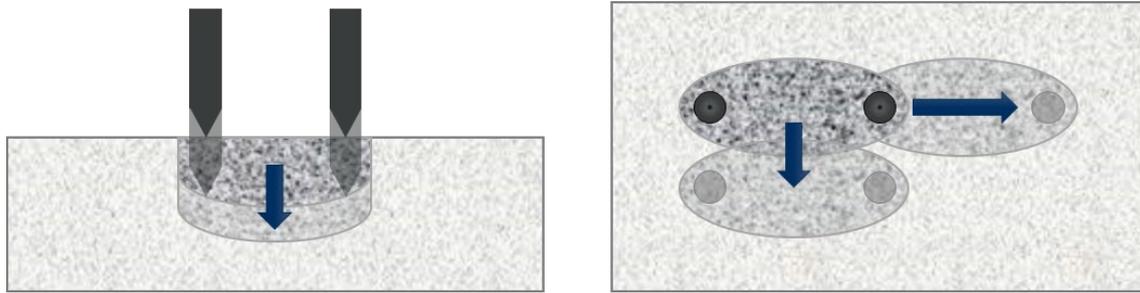


Abbildung 31: Nachsetzen der Elektroden, vertikal (li.) und horizontal (re.)

Begonnen wurde damit, die Elektrode vertikal nachzusetzen. Dabei wurden die Elektroden unabhängig voneinander nach jedem Impuls auf die Gesteinsoberfläche gesetzt. Die Versuche wurden mit Spülung und einem Elektrodenabstand von 20 mm durchgeführt. In Abbildung 32 entsprechen die durchgezogenen Linien den Ergebnissen ohne Nachsetzen aus Kapitel 0 und die gestrichelten Linien jenen Versuchen mit Nachsetzen. In Abbildung 32 sind jeweils die Mittelwerte des gelösten Volumens und der spezifischen Energie aus 6 Einzelversuchen dargestellt.

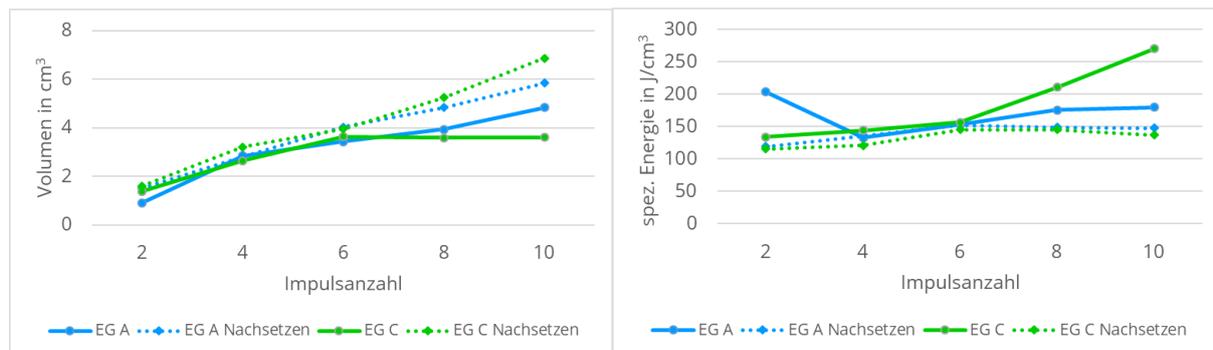


Abbildung 32: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) bei vertikalem Nachsetzen der Elektroden

Es ist vor allem bei der Elektrode C zu erkennen, dass durch das Nachsetzen deutlich mehr Gesteinsvolumen gelöst werden kann. Bei 10 Impulsen konnte nahezu eine Verdopplung des gelösten Volumens ( $3,6 \text{ cm}^3$  auf  $6,9 \text{ cm}^3$ ) erreicht werden. Die spezifische Energie wird damit annähernd konstant gehalten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass durch das Nachsetzen jeder Impuls in das Gestein eingebracht und damit ein ständiger Abtrag gewährleistet werden kann. Wird nicht nachgesetzt und besteht kein Kontakt mehr zwischen Gestein und Elektrode gehen die Impulse durch das Wasser, wodurch Energie verloren geht, was sich in einer Erhöhung der spezifischen Energie widerspiegelt.

Die Elektrode C kann beim Nachsetzen mehr Volumen als die Elektrode B lösen. Dies liegt in der Geometrie der beiden Elektroden begründet. Auf Grund des kleineren Durchmessers lässt sich die Elektrode C besser in dem entstandenen Krater nachsetzen (Abbildung 33). Für eine Anwendung, welche sich durch vertikales Nachsetzen auszeichnet, wäre demnach die Elektrode C zu bevorzugen.

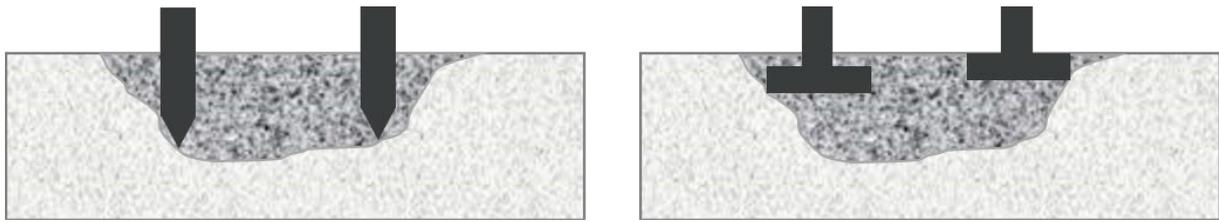


Abbildung 33: Nachsetzen der Elektrode C (li.) und der Elektrode B (re.)

Die spezifische Energie und damit der Wirkungsgrad des Verfahrens können also allein dadurch verbessert werden, indem sichergestellt wird, dass die Elektroden immer in Kontakt mit dem Gestein stehen.

Beim horizontalen Nachsetzen der Elektrode ist der Kontakt mit dem Gestein leichter zu gewährleisten. Hier stellt sich aber im Besonderen die Frage, wie groß die Abstände beim Nachsetzen sein können, um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen. Abgeleitet daraus ergibt sich dann für einen kontinuierlichen Prozess eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit.

Damit dies ermittelt werden kann, wurden flächige Versuche durchgeführt. Dabei wurde eine Strecke von 60 mm mit der Elektrode B bearbeitet. Der Elektrodenabstand betrug dabei 15 mm. Auf jeder Position wurden 5 Impulse erzeugt und daraufhin wurde die Elektrode um einen bestimmten Abstand nachgesetzt. Dieser betrug 5, 10, 15 und 20 mm (Abbildung 34). Da immer dieselbe Fläche bearbeitet wurde, werden bei größerem Abstand weniger Impulse benötigt.

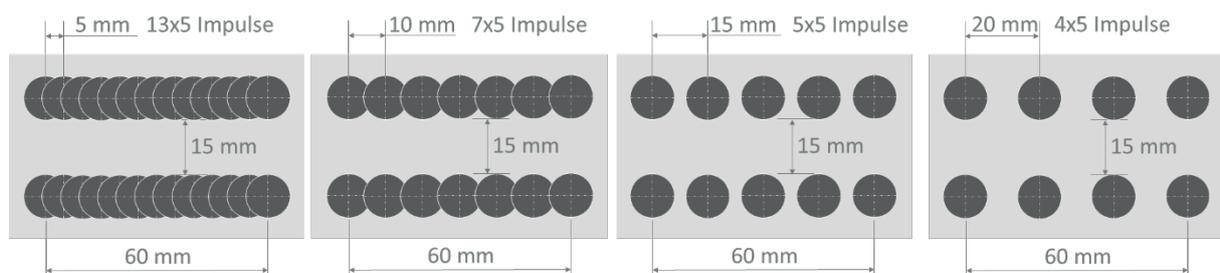


Abbildung 34: Horizontales Nachsetzen der Elektrode

In Abbildung 35 sind die Silikonabdrücke der entstandenen Krater dargestellt. Es ist bereits optisch zu erkennen, dass mit 5 mm Abstand der größte Abtrag erzielt wurde. Bei 10 mm Abstand ist eine relativ ebene Oberfläche entstanden. Wird nun die Elektrode vertikal nachgesetzt und die Oberfläche erneut bearbeitet, so wirkt sich dies positiv aus, da die Elektrode gut auf das Gestein aufgesetzt werden kann. Die glatte Oberfläche ist aber auch dann von Vorteil, wenn beispielsweise nur eine dünne Schicht abgetragen und das darunterliegende Material nicht beschädigt werden soll. Bei einem Abstand von 20 mm ist gut zu erkennen, dass kleine Stege stehen bleiben. Dies wäre für eine Nachbearbeitung von Nachteil.

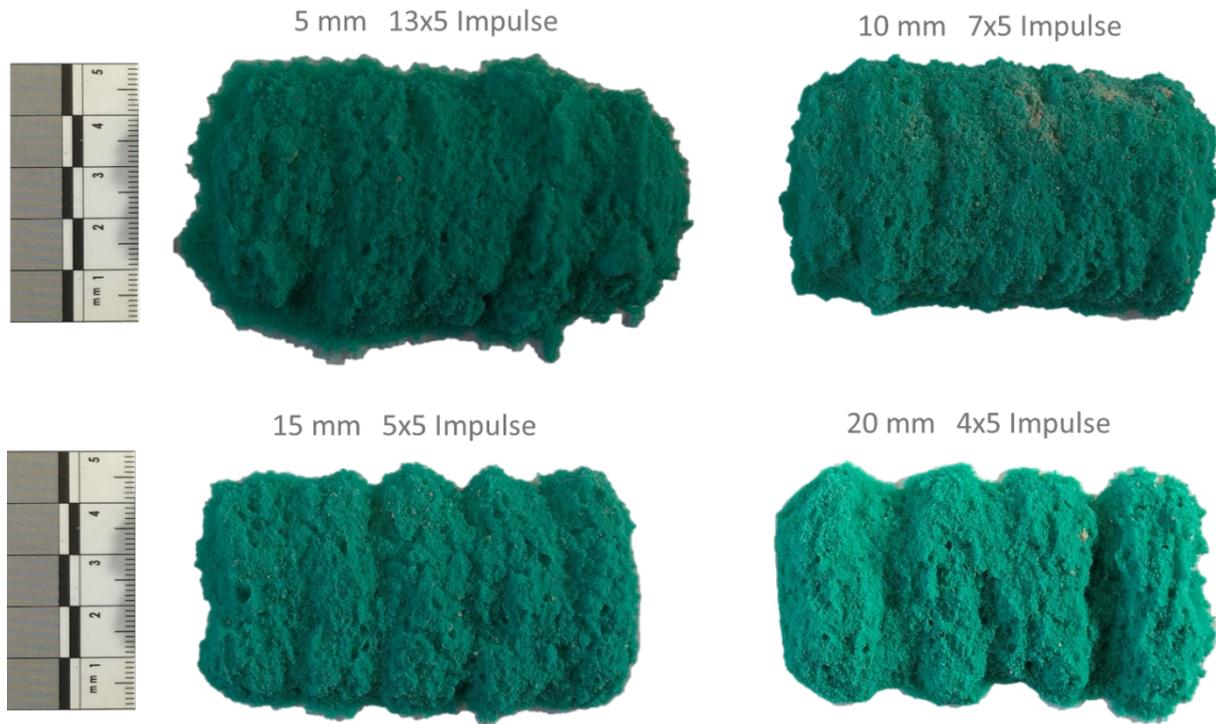


Abbildung 35: Silikonabdrücke nach horizontalem Nachsetzen

In Tabelle 26 ist das gelöste Volumen und die erreichte spezifische Energie dargestellt. Es zeigte sich, dass bei einem Abstand von 15 mm die niedrigste spezifische Energie und damit der höchste Wirkungsgrad erreicht wird.

Tabelle 26: Ergebnisse nach horizontalem Nachsetzen

5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
65 Impulse	35 Impulse	25 Impulse	20 Impulse
5200 J	2800 J	2000 J	1600 J
29,7 cm <sup>3</sup>	26,4 cm <sup>3</sup>	22,6 cm <sup>3</sup>	17,9 cm <sup>3</sup>
171 J/cm <sup>3</sup>	107 J/cm <sup>3</sup>	89 J/cm <sup>3</sup>	90 J/cm <sup>3</sup>

Aus der Betrachtung der Oberflächengüte und der spezifischen Energie lässt sich schlussfolgern, dass der beste Abstand für die Elektrode B im Bereich von 10 bis 15 mm liegt. Bei einem kontinuierlichen Vorschub werden nicht 5 Impulse auf einer Position erzeugt, sondern die Elektrode bewegt sich dann auch zwischen den einzelnen Impulsen. Um den Vorschub für die weiteren Versuche zu berechnen, wurde angenommen, dass die Elektrode sich innerhalb von 5 Impulsen um den Nachsetzabstand bewegen muss. Das heißt, dass sich die Elektrode bei einem Abstand von 10 mm und 5 Impulsen um 2,5 mm zwischen jedem Impuls bewegen muss. Wie hoch der Vorschub dabei ist, hängt zusätzlich von der Impulswiederholrate ab. In Tabelle 27 sind mögliche Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt.

Tabelle 27: Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Nachsetzabstandes und der Impulswiederholungsrate

<b>Nachsetzen 5 Impulse</b>	<b>10</b>	-	<b>15</b>	<b>mm</b>
Nachsetzen 1 Impuls	2,5	-	3,75	mm
spezifische Energie	107	-	89	J/cm <sup>3</sup>
Vorschubgeschwindigkeit bei 10 Hz	1,7 62	- -	2,4 86	cm/s m/h
Vorschubgeschwindigkeit bei 25 Hz	4,3 154	- -	6,0 216	cm/s m/h

## 6.2 Vergleichende Versuche mit Beton

### 6.2.1 Einzelversuche

Für die Grundlagenversuche wurde zunächst Kalksandstein ausgewählt, da dieser homogener ist als Beton. In der Praxis soll das Verfahren hauptsächlich für den Abtrag von Beton verwendet werden. Da Beton andere mechanische Eigenschaften hat, sollte zunächst untersucht werden, inwieweit die Ergebnisse des Kalksandsteins mit denen von Beton vergleichbar sind.

Dazu wurden zunächst drei Proben aus Kernbohrungen im Beton von dem Bau eines Einfamilienhauses herangezogen. Die Bohrkern verfügen über unterschiedliche Gesteinskörnungen (Abbildung 36). Da darüber hinaus keine weiteren Angaben über den Beton zur Verfügung standen, wurden diese nach dem Aussehen als feine (F), mittlere (M) und grobe (G) Gesteinskörnung geordnet. Die Kerne wurden in circa 10 cm dicke Scheiben geschnitten.

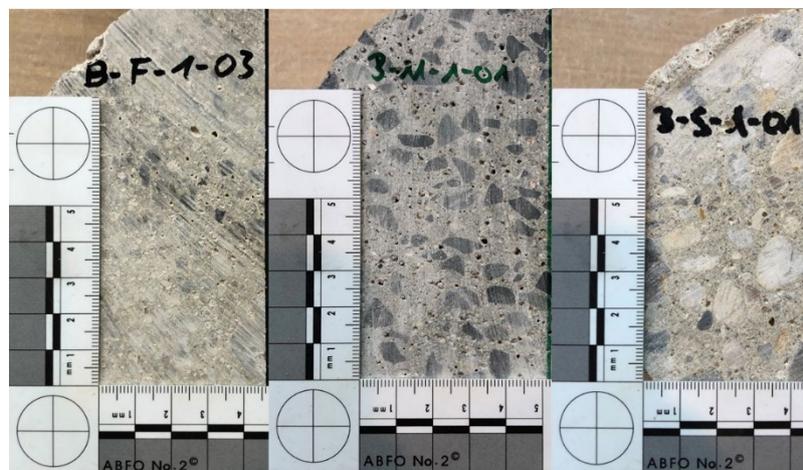


Abbildung 36: Schnittbild der drei Betonkerne

Mit den drei Kernen wurde eine Versuchsreihe mit der Elektrode C, in einem Elektrodenabstand von 15 mm und unter der Verwendung von Spülung wiederholt. Die Ergebnisse wurden mit jenen des Kalksandsteines verglichen. Auf Grund der Größe der Bohrkern wurden unterschiedlich viele Einzelversuche für die verschiedenen Gesteinskörnungen durchgeführt:

- Gesteinskörnung F: 16 Einzelversuche
- Gesteinskörnung M: 4 Einzelversuche
- Gesteinskörnung G: 12 Einzelversuche

Es wurde wieder der Mittelwert sowie die zugehörigen Minima und Maxima des gelösten Volumens und der spezifischen Energie ermittelt (Abbildung 37).

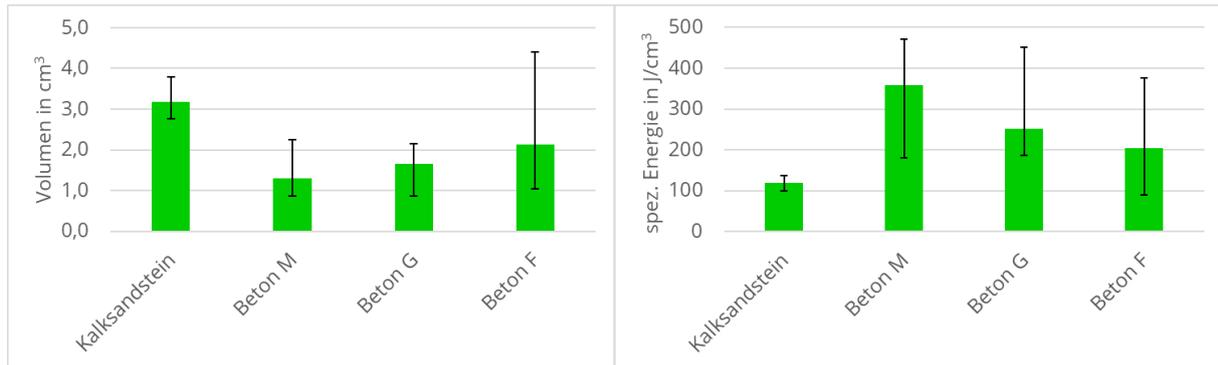


Abbildung 37: Vergleich des gelösten Volumens (li.) und der spezifischen Energie (re.) von Kalksandstein und Beton

Die Versuche haben gezeigt, dass bei denselben Versuchsparametern bei Beton ein geringeres Volumen als beim Kalksandstein gelöst werden kann. Dies führt zu einer höheren spezifischen Energie. Der Beton hat eine höhere Druck- sowie Zugfestigkeit im Vergleich zum Kalksandstein. Wie bereits in Kapitel 0 beschrieben, kann die Impulsenergie bei gleichbleibender Spannung erhöht werden. Dies könnte im Beton für ein besseres Löseverhalten sorgen.

Die Diagramme zeigen aber auch, dass die Streuung der Ergebnisse bei Beton deutlich größer als bei Kalksandstein ist. Dies ist auf die Inhomogenität durch die unterschiedliche Gesteinskörnung zurückzuführen. Je nachdem, ob der Impuls durch einen Stein der Körnung geht oder entlang der Korngrenze zwischen Beton und Stein. In dem einen Fall wird Energie verbraucht, um den einzelnen zu zerkleinern, in dem anderen wird der Stein aus dem Verbund gelöst, ohne ihn zu zerkleinern, was energetisch als deutlich besser zu bewerten ist.

### 6.2.2 Versuche mit Kunststoffhalter und Bewehrungsstab

Da die verwendeten Kerne von einer realen Baustelle stammen, konnten weitere Effekte untersucht werden. So befand sich auf der einen Seite eines Kernes der Gesteinskörnung F eine dünne Schicht Putz (Abbildung 38, links). Diese Schicht hatte keinen Einfluss auf das Lösungsverhalten im Vergleich zu den Proben ohne Putz. Nach den ersten 5 Impulsen zeigte sich ein Abstandshalter aus Kunststoff, der in dem Beton eingegossen war (Abbildung 38, Mitte). Nach der Auswertung des Versuches wurden weitere 50 Impulse (10 x 5 Impulse mit Nachsetzen) in den Beton eingebracht (Abbildung 38, rechts). Der Kunststoffhalter konnte daraufhin unbeschädigt aus der Betonmatrix herausgelöst werden. Damit wäre in der Praxis theoretisch eine Wiederverwendung oder eine getrennte Entsorgung möglich.



Abbildung 38: Versuchsreihe B-F-1-12

An einer Kernscheibe der Gesteinskörnung G befand sich seitlich ein Stück eines Bewehrungsstabes (Abbildung 39). Dieser konnte mittels 5x5 Impulsen mit der Elektrode C und einem Elektrodenabstand von 20 mm vollständig aus der Betonmatrix entfernt werden. Der Bewehrungsstab befand sich dabei zwischen den beiden Elektroden. Der Bewehrungsstab war frei von Betonrückständen.

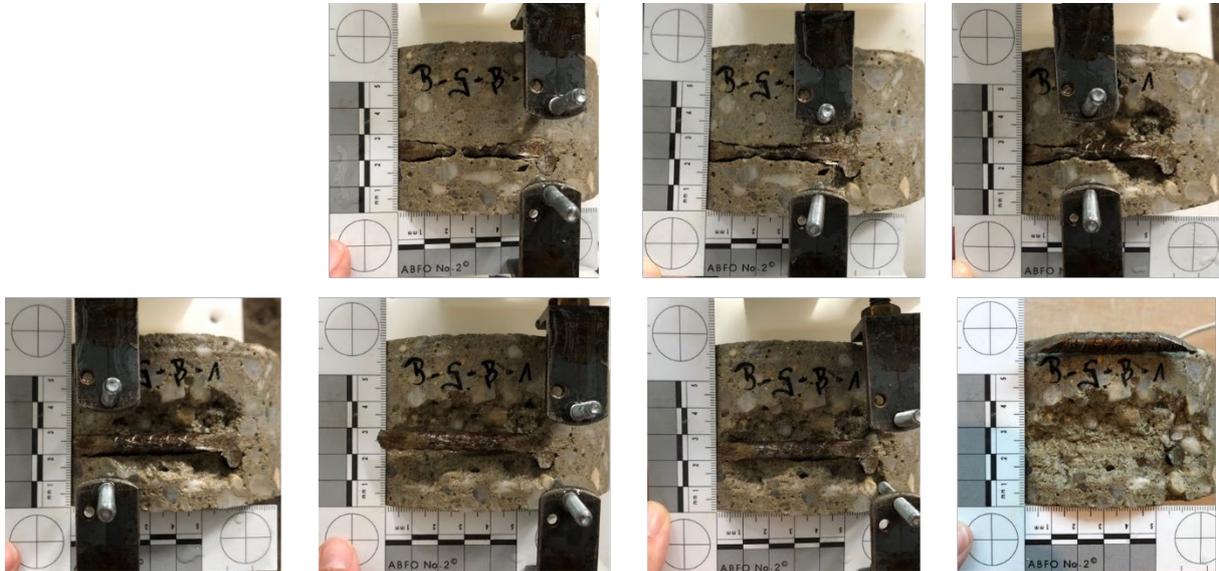


Abbildung 39: Bewehrung in Kernscheibe der Gesteinskörnung G

### 6.2.3 Versuche mit Nachsetzen der Elektrode

Ähnlich zu den Versuchen mit Kalksandstein sollte auch im Beton untersucht werden, welche Abtragleistung erreicht werden kann, wenn eine größere Fläche mit dem EIV bearbeitet wird. Dies sollte vor allem unter dem Gesichtspunkt verschiedener Korngrößen der Gesteinskörnung erfolgen. Dazu wurden weitere Betonproben mit einer Kantenlänge von 15 cm gefertigt, die bei sonst gleichen Eigenschaften über verschiedene Korngrößen verfügten (0 bis 8 mm, 0 bis 16 mm und 0 bis 32 mm).

Die Würfel wurden mit einer Steinsäge in zwei Hälften geschnitten. Die Schnittflächen sind in Abbildung 40 dargestellt. Die unterschiedlichen Korngrößen sind gut zu erkennen.



Abbildung 40: Schnittfläche der Betonproben (Links 0 – 8 mm, Mitte 0 – 16 mm, Rechts 0 -32 mm)

Im Gegensatz zu den Versuchen mit Kalksandstein sollte der Beton mit zwei Spuren bearbeitet werden, um die Löseleistung besser beurteilen zu können (Abbildung 41). Bei Einzelversuchen können die Ergebnisse auf Grund der Inhomogenität des Betons stark streuen. Dies soll durch die größere Fläche reduziert werden. Allerdings ist vor allem bei großen Korngrößen immer noch mit einer starken Streuung der Ergebnisse zu

rechnen. Bei Korngrößen bis 32 mm und einer zu bearbeitenden Länge von 90 mm ist noch mit einem starken Einfluss zu rechnen, wie viele Körner sich in dem Bereich befinden und welchen Abstand diese zueinander haben. Bei einem Elektrodenabstand von 15 mm ist ebenfalls damit zu rechnen, dass die Elektroden ausschließlich auf der Gesteinskörnung aufstehen und nicht in Kontakt mit dem Beton kommen. Es soll geklärt werden, wie sich dies auf das Löseverhalten auswirkt.

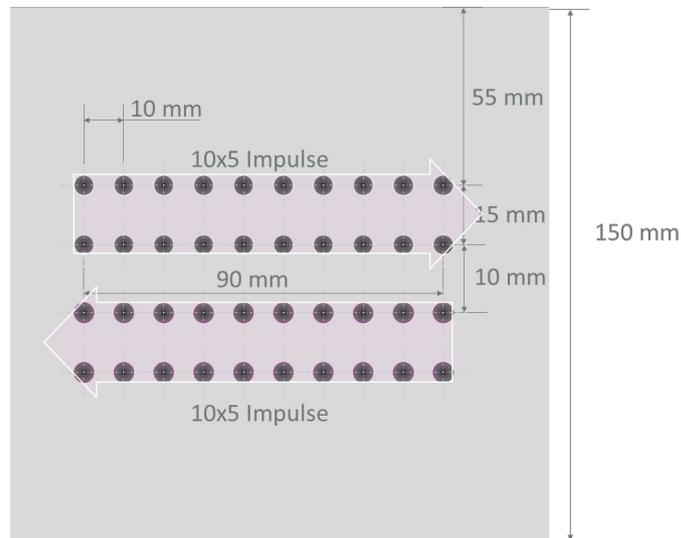


Abbildung 41: Elektrodenposition der Nachsetzversuche mit Beton

Der Versuch wurde für jede Gesteinskörnung mit der Elektrode C, mit Spülung und einem Elektrodenabstand von 15 mm zweimal wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt.



Abbildung 42: Ergebnisse der Spurversuche in Beton (Links 0 – 8 mm, Mitte 0 – 16 mm, Rechts 0 – 32 mm)



Abbildung 43: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) der Spurversuche in Beton

Es zeigte sich, dass das gelöste Volumen und die spezifische Energie für die 3 Gesteinskörnungen annähernd gleich sind. Diese hat demnach bei sonst gleichen Eigenschaften des Betons keinen Einfluss auf die Löseleistung. Die ermittelte spezifische Energie liegt mit 250 bis 300 J/cm<sup>3</sup> in einem ähnlichen Wertebereich wie es auch bei den Einzelversuchen mit den Betonproben F, M und G der Fall war (vergleiche Abbildung 37). Es ist anzunehmen, dass die spezifische Energie durch die Erhöhung der Impulsenergie und mit einem damit möglichen größeren Elektrodenabstand gesenkt werden kann.

Bei der Betrachtung des gelösten Materials zeigte sich, dass die Gesteinskörnung meist durch die Impulse zerstört wurde, je nachdem, wo die Elektrode aufgesetzt wurde. Es konnten auch ganze Gesteinskörner herausgelöst werden. Die besten Ergebnisse hinsichtlich des Lösens ganzer Gesteinskörner konnten bei der Gesteinskörnung von 0 bis 8 mm der Probekörper beobachtet werden.

Eine weitere Fragestellung in diesen Zusammenhang war, wie sich das Löseverhalten verändert, wenn die Elektroden vertikal nachgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde der Versuch bei zwei Proben wiederholt und dabei wurden die Elektroden immer wieder auf die Gesteinsoberfläche aufgesetzt. Dabei konnten die Elektroden unabhängig voneinander eingestellt werden.

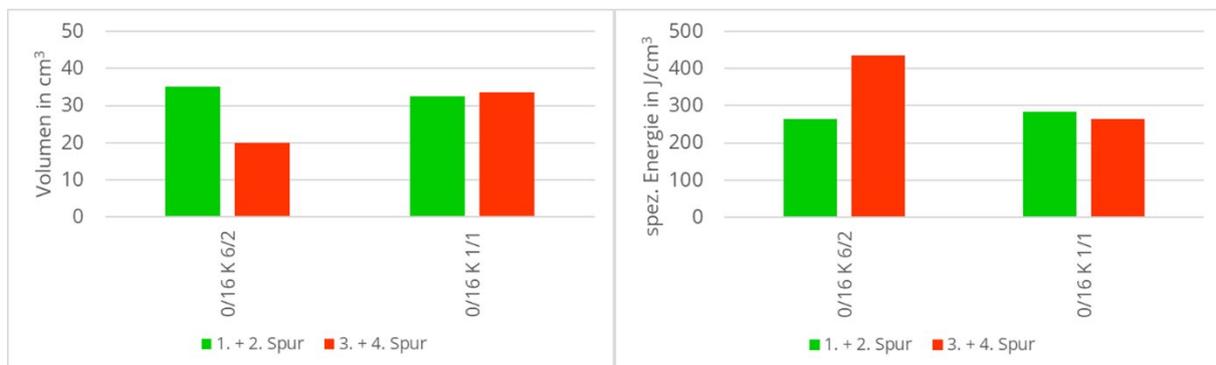


Abbildung 44: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) der erweiterten Spurversuche im Beton

Es zeigte sich, dass das gelöste Volumen nach der 3. und 4. Spur stark davon abhängig ist, wo die Elektrode aufgesetzt wird. Die Einzelversuche mit Kalksandstein und Beton haben gezeigt, dass bei den gewählten Impulsparametern eine Eindringtiefe von circa 8 mm erreicht werden kann. Wird die Elektrode auf eine Erhöhung der nun rauen Oberfläche gesetzt, kann der Impuls nicht so tief in das Material eindringen und löst dementsprechend weniger Material (Abbildung 45). Dies ist mehrfach bei dem Versuch mit der Probe 0/15 K 6/2 geschehen. Bei der anderen Probe konnte die Elektrode meistens tiefer gesetzt werden, was sich dann auch in dem gelösten Volumen und damit in der spezifischen Energie widerspiegelte.

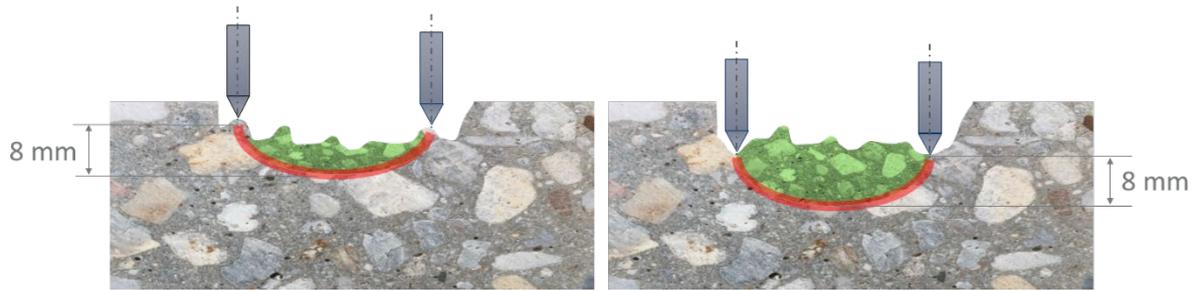


Abbildung 45: Löseverhalten in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit

Auf die Rauigkeit selbst kann kein Einfluss genommen werden. Eine Verbesserung des Löseverhaltens kann an dieser Stelle durch eine Anpassung der Elektrodengeometrie und des Elektrodenabstands erreicht werden.

### 6.3 Kontinuierliche Versuche

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde der Versuchsstand modifiziert, sodass es möglich ist, auch an einer Wand Material mittels EIV zu lösen. Der Aufbau ist in Abbildung 46 zu sehen. Für die Versuche wurden Betonplatten mit einer Kantenlänge von 55 cm und einer Dicke von 8 cm gefertigt.

Die Elektroden können mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit vertikal über den Probekörper bewegt werden. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Elektroden über den Probekörper verfahren werden können, kann von 1,6 bis 12,8 m/min eingestellt werden.



Abbildung 46: Versuchsstand kontinuierliche Versuche vertikal

Es wurde eine spezielle Elektrodenaufnahme entwickelt. An ihr können die in den Einzelversuchen erprobten Elektroden montiert und der Elektrodenabstand stufenlos im Bereich von 10 bis 25 mm, bezogen auf die Elektrodenmitte, verstellt werden. Zudem wurde eine flexible Dichtung vorgesehen, die Unebenheiten auf der Wandoberfläche ausgleichen kann. Die Dichtung soll dabei nur eine ausreichende Wasserüberdeckung um die Elektroden garantieren. Eine Leckage an der Wand entlang wurde zugelassen. Abbildung 47 zeigt die Elektrodenaufnahme mit flexibler Prozessraumabdichtung.



Abbildung 47: Elektrodenaufnahme mit flexibler Prozessraumabdichtung

Der Andruck der Elektroden erfolgt durch eine Zugfeder so, dass stets ein Kontakt mit der Oberfläche gewährleistet ist. Die Stoßspannung wird über ein Kabel zugeführt, sodass nur die Elektroden bewegt werden und nicht auch der Impulsgenerator. Dadurch werden die Kräfte für die Bewegung deutlich reduziert. Die Versuche zeigen einen kontinuierlichen Schlitz bereits nach der ersten Überfahrt.

In Abbildung 48 sind die Schnittresultate mit den zugehörigen Versuchsparametern dargestellt. Darüber hinaus sind in Abbildung 49 die zugehörigen spezifischen Löseenergien im Vergleich zu den vorgenannten Einzelversuchen aufgeführt. Bei dem Einzelversuch (2) war der Andruck der Elektrodenaufnahme samt Abdichtung nicht durchgängig, weshalb eine spezifische Energie von  $1.958 \text{ J/cm}^3$  für den Schlitz benötigt wurde.



- (1) Impulswiederholrate 15 Hz, Vorschub 1,6 m/min, resultierender Impulsabstand 1,8 mm
- (2) Impulswiederholrate 15 Hz, Vorschub 1,6 m/min, resultierender Impulsabstand 1,8 mm
- (3) Impulswiederholrate 10 Hz, Vorschub 1,6 m/min, resultierender Impulsabstand 2,7 mm

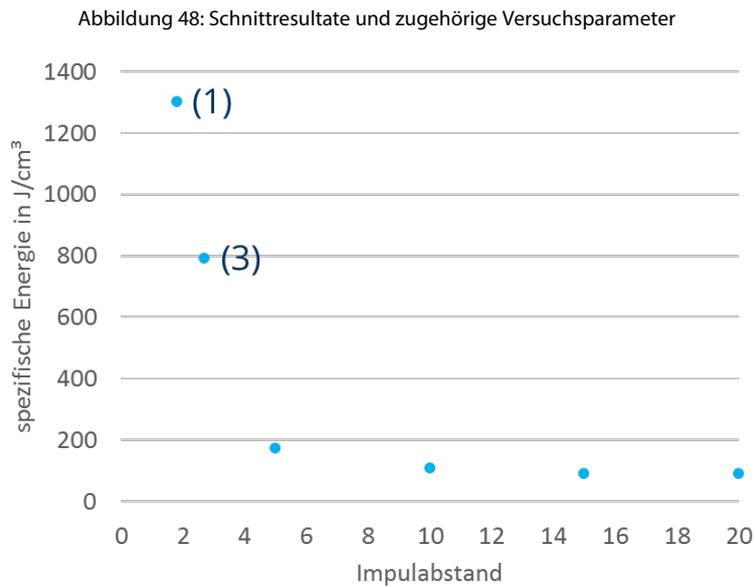


Abbildung 49: Spezifische Energie der Schnittresultate und Einzelversuche

Die spezifische Energie ist so hoch, da die Impulswiederholrate noch nicht auf die Bewegungsgeschwindigkeit abgestimmt ist. So ergibt sich bei Versuch 1 sowie Versuch 2 ein Impulsabstand von 1,8 mm und bei Versuch 3 von 2,7 mm in Vorschubrichtung. Aus den Vorversuchen ist bekannt, dass dieser Wert im Bereich von 20 mm liegen muss. Es ist also aus Sicht der spezifischen Löseenergie noch deutliches Einsparpotenzial vorhanden. Grund hierfür ist, dass nicht genug zu lösendes Material an den Elektroden ansteht und somit die Impulse nur sehr ineffizient arbeiten können. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Abschnitt 0 im Rahmen der Versuche des horizontalen Nachsetzens der Elektroden herausgearbeitet.

Für den Vergleich mit gängigen Abbruchverfahren wird die Nutzleistung betrachtet. Diese ist ein Maß dafür, wie viele Kubikmeter Material in der Stunde abgetragen werden können. Für einen Vergleich mit der Praxis ist in Tabelle 28 die Nutzleistung eines handgeführten Abbruchhammers dargestellt.

Tabelle 28: Vergleich Nutzleistung handgeführter Abbruchhammer nach [SCH2015]

Baustoff	Besonderheiten	Festigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Nutzleistung beim Abbruch (m <sup>3</sup> feste Masse/h)	
			d < 0,3 m	d > 0,3 m
Beton	keine Bewehrungs- einlagen	gering (< 30)	0,37 bis 0,44	0,32 bis 0,38
		hoch (> 30)	0,19 bis 0,28	0,19 bis 0,23

Zur Bestimmung der Nutzleistung wird überschlägig angenommen, dass beim EIV bei einer Impulswiederholrate von 25 Hz über die Dauer von einer Stunde immer das in den Versuchen ermittelte Volumen bezogen auf einen Impuls erreicht wird.

Formel 2: Überschlägige Abschätzung der Abbruchleistung [m³/h]

(2)

$$P_N = \frac{V}{i} \cdot f \cdot 3600$$

$P_N$  - Nutzleistung in m³/h

$V$  - gelöstes Volumen in m³

$i$  - Anzahl der Impulse

$f$  - Impulswiederholrate in Hz

Die Nutzleistung für die verschiedenen Elektrodenabstände ist in Abbildung 50 dargestellt. Die Nutzleistung steigt mit größerem Elektrodenabstand. Demnach ist ein möglichst großer Elektrodenabstand anzustreben. Da allerdings ab einem Abstand von 30 mm nur noch die Hälfte der Impulse zu einem Abtrag führt, wird zum aktuellen Zeitpunkt ein Elektrodenabstand von 20 mm als Optimum angesehen.

Die aus den Einzelversuchen abgeschätzte Nutzleistung des EIV im Kalksandstein liegt deutlich unter der Nutzleistung eines Abbruchhammers im Beton. Grund dafür ist, dass beim EIV deutlich kleinere Bruchstücke gelöst werden. Bei konventionellen Werkzeugen werden sehr grobe Stücke herausgebrochen. Dadurch können die Nutzleistungen nur sehr begrenzt miteinander verglichen werden. Das EIV bringt vor allem an den Stellen seine Vorteile ein, wo mit konventionellen Geräten und großen Kräften nicht gearbeitet werden kann oder wo Erschütterungen vermieden werden müssen. Als Anwendungsszenarien sind hier das Sägen oder Schlitzen im Bestand, aber auch das Freilegen von Bewehrung zu sehen.

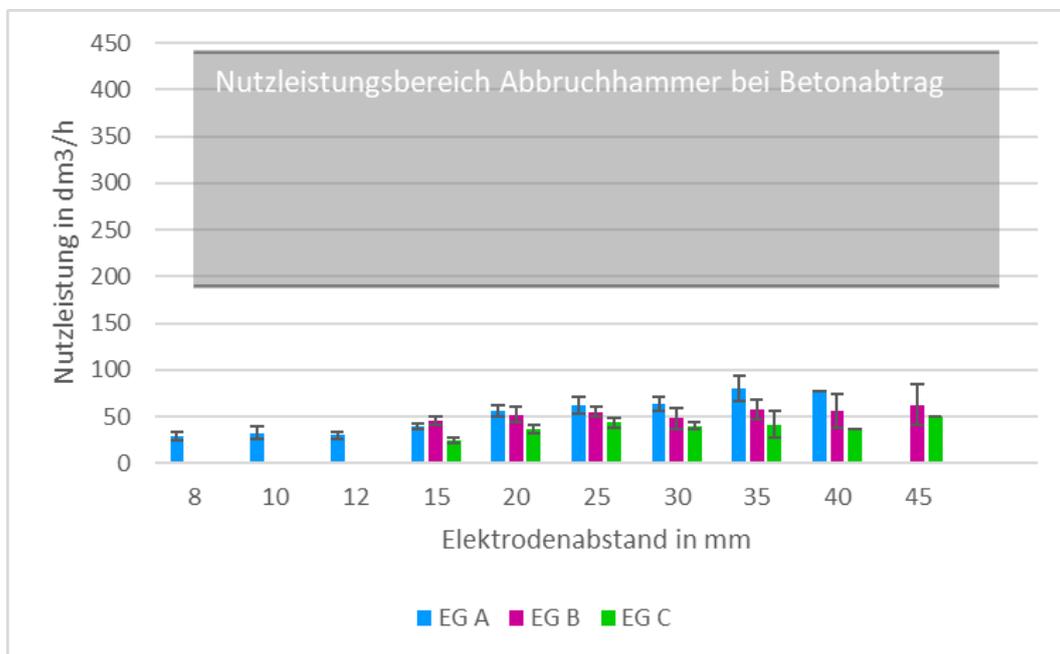


Abbildung 50: Nutzleistung in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes

---

Es ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Nutzleistung höher ausfallen wird. Zum einen wird durch das Nachsetzen der Elektrode mehr Volumen gelöst werden können, da das umliegende Gestein bereits vorgeschädigt ist und dann mit dem nächsten Impuls gelöst wird. Außerdem wird das Verfahren zusätzlich verbessert werden können, wenn das abgetragene Material durch eine umlaufende Spülung weggespült wird. In den Einzelversuchen bleibt das gelöste Material im Bereich der Elektroden liegen, wodurch es zu einer Nachzerkleinerung kommt. Die Energie, die in die Nachzerkleinerung geht, kann nicht zum Lösen von neuem Material beitragen. Eine bessere Abschätzung der Nutzleistung kann gegeben werden, wenn die Elektroden nachgesetzt werden und eine größere Fläche bearbeitet wurde.

Ein weiterer Aspekt, welcher im Rahmen des Forschungsprojektes nicht betrachtet worden ist, ist die mechanische Ergänzung etablierter Abbruch- und Trennverfahren mit dem EIV. Durch das Herstellen von Schlitzten oder definierten Blöcke die anschließend lediglich herausgebrochen werden müssen, kann die Nutzleistung im Abtrag deutlich erhöht werden.

## 7 Konzeptionelle Empfehlung für Geräte- und Komponentenentwicklung

Das EIV-Gesamtgerät ebenso wie die einzelnen Komponenten, welche für den Einsatz des EIV-Gerätes benötigt werden, müssen an den Rückbau von baustellenspezifischen Materialien und Geometrien der Bauteile angepasst werden. Diese Anpassung ist für eine Adaption des EIV als innovative Rückbautechnologie im Bauwesen notwendig. Neben dem Gesamtaufbau eines EIV-Gerätes sind auch die einzelnen Komponenten entsprechend zu konzeptionieren.

In diesem Kapitel wird zunächst der allgemeine Aufbau eines EIV-Gerätes verdeutlicht. Auf die spezifische Anordnung des Geräteaufbaus eines handgeführten EIV-Gerätes und eines EIV-Anbaugerätes für ein Trägergerät wird anschließend näher eingegangen. Basierend auf den durchgeführten Versuchen im Labor werden die einzelnen Komponenten (Elektrodengeometrie, Prozessraumabdichtung) und die benötigten Hilfsstoffe (Dielektrikum, Strom) und die baustellenspezifischen Maßgaben thematisiert und spezifiziert. Für eine Adaption eines EIV-Gerätes in eine Baustellenumgebung muss sichergestellt werden, dass eine Einbindung sicher und störungsfrei möglich ist. Inwiefern eine Einbindung realisierbar sein könnte, wird in einem abschließenden Abschnitt dieses Kapitels verdeutlicht.

### 7.1 Gerätekonzeption

#### 7.1.1 Allgemein

Wie auch bei den Versuchen im Labor, sollte der allgemeine Aufbau eines EIV-Gerätes zweiteilig realisiert werden. Abbildung 51 verdeutlicht den zweiteiligen Aufbau des EIV-Gerätes. Zur Erläuterung des prinzipiellen zweiteiligen Aufbaus und der einzelnen Komponenten wird ein Teil des EIV-Gerätes als Teil A und der weitere Teil B, entsprechend Abbildung 51, festgelegt.

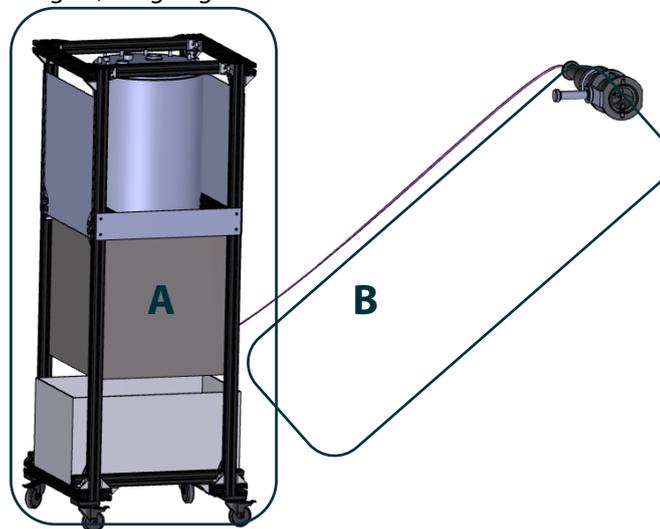


Abbildung 51: Zweiteiliger Aufbau des EIV (links Teil A und rechts Teil B)

Dabei besteht der Teil A aus einem massiven Gehäuse, in welchem sich der in einem Druckbehältnis befindliche Marx-Generator mit der zugehörigen Steuerungstechnik befindet. An einer gut sichtbaren Stelle ist auf dem Gehäuse ein Notausschalter vorzusehen.

Durch die Betätigung des Notausschalters kann im Gefahrenfall oder zur Abwendung einer Gefahr schnell ein sicherer Zustand des EIV-Gesamtgerätes hergestellt werden.

Weiterhin befinden sich am Gehäuse die einzelnen Komponenten zur Sicherstellung der konstanten Versorgung des Prozessraumes mit Dielektrikum. Dazu wird das Behältnis mit dem Dielektrikum (Wasser), eine Pumpe zur Förderung des Dielektrikums sowie eine grobe Absetzanlage benötigt. Mittels der groben Absetzanlage soll das größte Material, welches durch den Löseprozess aus dem Prozessraum in den Wasserkreislauf eingetragen wird, herausgefiltert werden. Wie in den Laborversuchen nachgewiesen wurde, hat die Wasserverschmutzung kaum Einfluss auf den Wirkungsgrad des EIV. Durch die grobe Absetzanlage sollen eine Beschädigung der Pumpe sowie eine Verstopfung der Leitung vermeiden werden.

Das Gewicht des Marx-Generators, welcher im Rahmen der Laborversuche genutzt wurde, liegt bei circa 80 bis 90 kg. Bei den Komponenten zur Sicherstellung der Wasserversorgung liegt das Gewicht bei circa 30 bis 40 kg. Demzufolge liegt das Gesamtgewicht von Teil A des EIV-Gerätes zwischen 110 und 130 kg.

Teil B des EIV-Gerätes setzt sich aus der Zuleitung für die Hochspannungsimpulse, der Erdung, der Zu- und Ableitung des Dielektrikums sowie der Prozessraumabdichtung mit den darin befindlichen Elektroden zusammen. Das Gewicht von Teil B des EIV-Gerätes wird sich auf circa 5 bis 8 kg belaufen. Die Dimensionierung der Zu- und Ableitung des Dielektrikums hat Einfluss auf das Gewicht von Teil B des EIV-Gerätes.

Durch den zweiteiligen Aufbau kann die Führigkeit der Prozessraumabdichtung mit den darin befindlichen Elektroden (Teil B) verbessert werden. Es ist nicht erforderlich, das gesamte EIV-Gerät bei einem Positionswechsel auf oder zu einem weiteren Bauteil umzusetzen. Ein weiterer Vorteil des zweiteiligen Aufbaus ist die Übersichtlichkeit des Kontaktbereiches zwischen Prozessraumabdichtung und dem zurückzubauenden Bauteil respektive der zu bearbeitenden Oberfläche.

Der Abstand zwischen den Geräteteilen A und B und damit die Länge der Leitungen muss begrenzt werden. Die Begrenzung ist zum einen aus elektrotechnischer und zum anderem aus pumpentechnischer / hydraulischer Sicht notwendig. Die Steilheit des Impulses wird durch einen höheren Abstand zwischen dem Generator und den Elektroden gedämpft. Je flacher der Impuls wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Impuls im Prozessraum durch den Feststoff verläuft, sondern er wird dann eher durch das Fluid verlaufen. Zusätzlich muss bei einer längeren Leitung zwischen Gehäuse und dem Prozessraum auch eine leistungsstärkere Pumpe gewählt werden, um einen konstanten Wasserkreislauf aufrecht zu erhalten.

Zur Steuerung des EIV sind Schalter erforderlich. Ein Schalter ist für den Zufluss des Dielektrikums in den Prozessraum und ein Schalter für die Steuerung der elektrischen Impulse. Durch eine farblich differenzierte Gestaltung der Schalter soll einer Verwechslung entgegengewirkt werden. In der Abflussleitung vom Prozessraum, welche das Dielektrikum samt gelöstem Material führt, muss ein Durchflussmesssystem angebracht werden. Bevor die elektrischen Impulse über die Elektroden im Prozessraum freigesetzt werden, muss der Durchflussmesser einen konstanten Durchfluss verzeichnen. Außerdem muss die Freisetzung der elektrischen Impulse umgehend unterbrochen werden, sobald kein beziehungsweise ein deutlich verringerter Durchfluss in der Abflussleitung gemessen wird. Damit kann sichergestellt werden, dass die elektrischen Impulse nur freigesetzt werden, wenn der Prozessraum überwiegend abgedichtet ist und sich damit eine ausreichende Menge des Dielektrikums im Prozessraum befindet.

### 7.1.2 Handgeführtes Gerät

Bei einem handgeführten EIV-Gerät wird Teil B, bestehend aus der Prozessraumabdichtung mit den darin befindlichen Elektroden, der Zu- und Ableitung des Dielektrikums (Wasser), der Zuleitung der Hochspannungsimpulse und der Erdung, durch das Bedienpersonal geführt beziehungsweise an einer Stelle gehalten. Die Abmessungen der Leitungen sind dabei möglichst gering zu wählen, um ein entsprechend niedriges Gewicht zu erreichen.

Die Steuerung des EIV-Gerätes muss durch das Bedienpersonal unmittelbar am Halte- und Führunggriff erfolgen. Es sind entsprechende Schalter vorzusehen, um den Fluss des Dielektrikums und die Impulse zu

steuern. Dabei sollte der zuvor genannte Notausschalter um einen Totmannschalter ergänzt werden. Durch einen Totmannschalter kann sichergestellt werden, dass bei einer Handlungsunfähigkeit des Bedienpersonals die Erzeugung der elektrischen Impulse umgehend unterbrochen wird. Bei einem handgeführten Gerät befindet sich das Bedienpersonal in unmittelbarer Nähe zu den elektrischen Impulsen. Zur Gewährleistung eines zusätzlichen Schutzes des Personals ist die Prozessraumabdichtung mit einem Material auszukleiden, welches eine elektrisch und elektromagnetisch abschirmende Wirkung hat. Es können Abschirmgewebe oder Magnetfeldabschirmfolien verwendet werden. Die Verwendung von Materialien mit einer abschirmenden Wirkung hat nur einen unbedeutenden Einfluss auf das Gesamtgewicht des Teil B des EIV-Gerätes. Insgesamt lässt sich für den zweiten Teil des EIV-Gerätes ein Gewicht von circa 5 kg realisieren.

Teil A des EIV-Gerätes ist auf einem rad- oder raupenmobilen Unterbau zu befestigen, damit es nicht vom Bedienpersonal gehoben werden muss. Eine Steuerung des Unterbaus mittels Fernbedienung erleichtert dabei das Verfahren des EIV-Gerätes am Einsatzort. Es muss darüber hinaus sichergestellt werden, dass Anschlagpunkte für einen Transport auf der Baustelle mittels Hydraulikbagger, Kran oder Mobilkran am Gerät angebracht sind. Weiterhin können die Anschlagpunkte für die Ladungssicherung des Gerätes im öffentlichen Verkehrsraum genutzt werden. Die erforderliche Energie kann aus dem öffentlichen Stromnetz respektive einem baustellentypischen Baustromanschluss bezogen werden. Falls kein entsprechender Anschluss zur Verfügung steht, kann ein mobiler Generator eingesetzt werden.

Am Gehäuse von Teil A des EIV-Gerätes ist eine Halterung für Teil B des EIV-Gerätes vorzusehen, damit das EIV-Gesamtgerät sicher transportiert werden kann. Durch die Halterung kann sichergestellt werden, dass es weder an den Leitungen noch an der Prozessraumabdichtung infolge des Transportes zu Beschädigungen kommt.

### 7.1.3 Maschinengeführtes Gerät (Anbaugerät)

Der zweiteilige Aufbau des EIV-Gerätes soll auch bei einem EIV-Anbaugerät realisiert werden. Teil A des EIV-Gerätes kann wie auch bei einem handgeführten Gerät auf einem rad- oder raupenmobilen Unterbau in unmittelbarer Nähe zum Trägergerät positioniert werden. Der Marx-Generator kann die benötigte Energie dabei wie bereits erläutert aus dem öffentlichen Stromnetz respektive einem Baustromverteiler oder über einen Generator beziehen.

Darüber hinaus besteht bei einem Anbaugerät die Möglichkeit, Teil A des EIV-Gerätes auf dem Trägergerät aufzusetzen. Eine entsprechende Befestigungsmöglichkeit muss auf dem Trägergerät geschaffen werden, damit das EIV-Gerät beim Umsetzen des Trägergerätes einen stabilen Sitz hat. Zusätzlich muss bei der Platzierung des EIV-Gerätes auf dem Trägergerät sichergestellt werden, dass der Schwenkbereich des Trägergerätes nicht beeinflusst wird, da es anderenfalls zu Beschädigungen am Trägergerät oder am EIV-Gerät kommen kann. Die benötigte Energie kann entweder wie beschrieben über das öffentliche Stromnetz bzw. einen Generator bezogen werden oder direkt aus dem Trägergerät, sofern dies gerätetechnisch möglich ist. Durch einen direkten Anschluss an das Trägergerät entfallen Stromkabel, welche im Baufeld geführt werden müssen.

Die Erdung, die elektrische Leitung zu den Elektroden sowie der Zu- und Abfluss des Dielektrikums zum Prozessraum können entlang des Auslegers eines Trägergerätes verlegt werden. Eine entsprechende Befestigung/Führungsschiene muss am Trägergerät im Vorfeld angebracht werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass den Leitungen ein ausreichender Bewegungsspielraum ermöglicht wird, sodass es bei einer Bewegung des Auslegers nicht zu einer Schädigung oder zu Verdrückungen an den Leitungen kommt.

Die Maßgaben der gängigen Hersteller von Schnellwechselsystemen sind für eine reibungslose Aufnahme der Prozessraumabdichtung und den darin befindlichen Elektroden durch das Trägergerät zu berücksichtigen. Zur Nutzung eines Schnellwechselsystems wird die Prozessraumabdichtung an einer entsprechenden Aufnahme montiert. Damit ist ein zügiger Wechsel des Abbruchwerkzeuges möglich. Neben der mechanischen Aufnahme muss auch die Kinematik der Aufnahme so ausgeführt werden, dass einerseits eine zuverlässige Abdichtung des Prozessraumes erfolgt und andererseits die Elektroden mechanisch nicht überlastet werden. In der DIN EN 474 werden die Anforderungen an Schnellwechseinrichtungen für Trägergeräte definiert und müssen zwingend bei einem EIV-Anbaugerät berücksichtigt werden.

Die zur Verfügung stehenden Schaltmodule auf dem Joystick eines Minibaggers beziehungsweise dem Bedienmodul einer Abbruchmaschine, welche zur Bedienung von gängigen Abbruchtechnologien wie beispielsweise Abbruchhammer und Abbruchzange verwendet werden, können zur Bedienung des EIV-Anbaugerätes genutzt werden.

Durch den zweiteiligen Aufbau des EIV-Gerätes können die Abmessungen am Ausleger des Trägergerätes minimiert werden, wodurch die Übersichtlichkeit für das Bedienpersonal deutlich gesteigert werden kann. Je geringer das Gewicht des Teils B des EIV-Gerätes am Ausleger ausfällt, desto höhere Ausladungen können realisiert werden. Weiterhin kann dadurch eine schnellere und reibungslosere Einbindung in etablierten Abläufen auf der Baustelle sichergestellt werden.

Das beschriebene Gerätekonzept ist technisch umsetzbar, bedarf aber einer sehr aufwändigen und gegebenenfalls auch störanfälligen Konstruktion. Inwieweit hier baustellentaugliche Lösungen gefunden werden, ist abhängig von zukünftigen Entwicklungsarbeiten.

## 7.2 Komponentenentwicklung

### 7.2.1 Dielektrikum

Als Dielektrikum werden Stoffe bezeichnet, welche sich zwischen der Impulselektrode und der Erdungselektrode befinden. Ein Dielektrikum muss ein nichtleitender Stoff (Isolator) sein. Nur wenn die Elektroden des EIV auf dem Material aufliegen und von einem Dielektrikum umgeben sind, dessen elektrische Festigkeit höher ist als die des Materials, wird die Entladung des Impulses durch das Material erfolgen. Ein Dielektrikum kann flüssig, fest oder gasförmig sein. Im Allgemeinen gilt, dass die elektrische Festigkeit von Feststoffen größer ist als von Flüssigkeiten, jedoch gibt es einige Flüssigkeiten, bei denen die elektrische Festigkeit in hinreichend kleinen Zeiträumen größer ist als die von Feststoffen. Daher sollte ein flüssiges Dielektrikum genutzt werden. Weiterhin bieten flüssige Dielektrika im Vergleich zu festen Dielektrika den Vorteil, dass sie selbstheilende Dielektrika (Isolatoren) sind. Ein elektrischer Impuls hinterlässt stets eine leitfähige Spur, wodurch üblicherweise die elektrische Festigkeit des Dielektrikums steigt. Bei der Verwendung einer Flüssigkeit werden diese ionisierten Spuren weggespült, wodurch die elektrische Festigkeit erhöht wird. Ein weiterer Vorteil eines flüssigen Dielektrikums ist die Fähigkeit, das gelöste Material aus dem Prozessraum abzutransportieren.

Es eignen sich auch Gele auf pflanzlicher Basis als Dielektrika. Beispiele sind Gele aus Johannisbrotkernmehl E-410, aus Xanthan E-415 und Agar Agar E-406. Die Stoffe müssen mit meist warmem Wasser gemischt werden. Die Viskosität kann durch das Mischungsverhältnis beeinflusst werden. Zwar haftet ein Gel mit einer hohen Viskosität gut an einer rauen Oberfläche, jedoch ist eine nachträgliche Trennung von verfestigtem Gel und gelöstem Material schwierig. Daher wird in der weiteren Betrachtung die Verwendung von Gelen ausgeschlossen.

Brauchwasser kann ebenfalls als Dielektrikum verwendet werden. Die Kosten für Brauchwasser sind gering. Die Abdichtung des Prozessraumes ist infolge der niedrigen Viskosität von Wasser jedoch von großer Bedeutung. Es muss sichergestellt werden, dass möglichst wenig Wasser aus der Abdichtung bzw. dem Wasserkreislauf austritt und somit in das Bauwerk eindringen kann. Optimal ist ein Wasserkreislauf, in welchem das Wasser aus dem Prozessraum mit samt des gelösten Materials aufgefangen wird. Nach einer groben Trennung von Wasser und gelöstem Material kann dieses erneut in den Prozessraum geführt werden. Die Laborversuche haben verdeutlicht, dass eine Verschmutzung des Wassers keinen Einfluss auf die Löseleistung des EIV hat. Im Anschluss an die Abbrucharbeiten muss das Wasser aufbereitet werden.

### 7.2.2 Prozessraumabdichtung

Die Abdichtung des Prozessraumes für die Führung des Dielektrikums ist für das Verfahren von großer Bedeutung. Nur durch eine ausreichende Abdichtung des Prozessraumes kann das EIV kontinuierlich eingesetzt werden. Bei der Entwicklung der Prozessraumabdichtung für das EIV für Anwendungen im

Bauwesen haben wir uns an den Abdichtungssystemen für Strahlverfahren orientiert. Bei Strahlverfahren trifft das Strahlmaterial auf die zu behandelnde Fläche und wird anschließend einschließlich des abgetragenen Materials aus dem Prozessraum geführt. Da das EIV keine vollständige Abdichtung erfordert, wurde bei den Laborversuchen ein weicher Schaumstoff als Abdichtlippe genutzt.

Im Prozessraum befinden sich die Impulselektrode sowie die Erdungselektrode und das Dielektrikum, welches sicherstellt, dass der elektrische Impuls durch das Material verläuft. Je nach Einsatzgebiet muss der Prozessraum nicht vollständig mit dem Dielektrikum ausgefüllt sein. Bei vertikalen Arbeiten an einer Wand muss lediglich sichergestellt werden, dass sich der Wasserstand im Prozessraum während der Rückbauarbeiten stets oberhalb der Elektroden einstellt. In Abbildung 52 wird exemplarisch der Wasserstand im Prozessraum bei Übereinanderliegen von Erdungs- und Impulselektrode in der Draufsicht dargestellt.

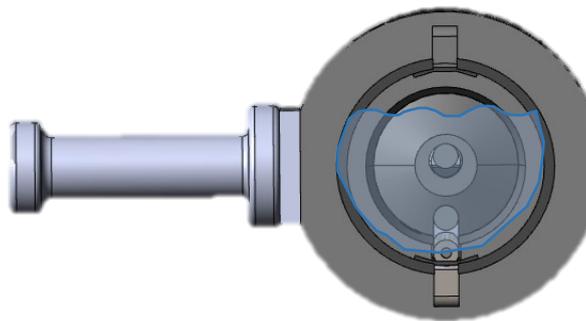


Abbildung 52: Draufsicht Prozessraum mit exemplarischem Wasserstand

Weiterhin muss unterschieden werden, ob die Arbeiten auf dem Boden mit nach unten gerichteten Elektroden oder an der Decke mit nach oben gerichteten Elektroden ausgeführt werden. Bei Überkopparbeiten muss der Prozessraum vollständig mit dem Dielektrikum gefüllt sein, damit die elektrischen Impulse durch das zu lösende Material verlaufen. Dahingegen muss bei Arbeiten mit nach unten gerichteten Elektroden lediglich sichergestellt werden, dass die dann untenliegenden Elektroden ausreichend mit dem Dielektrikum umgeben sind.

Die Prozessraumabdichtung muss sowohl beim Oberflächenabtrag als auch bei tiefergehenden Abbrucharbeiten mittels EIV-Gerät aufrechterhalten werden. Beim Oberflächenabtrag wird das EIV-Gerät kontinuierlich über die Oberfläche bewegt. Um einen kontinuierlichen Löseprozess gewährleisten zu können, muss sich die Prozessraumabdichtung der neuen, gegebenenfalls teilabgebrochenen Oberfläche anpassen. Dabei müssen auch Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche infolge des Abbruchprozesses abgedichtet werden. Beim tiefergehenden Abbruch wiederum werden die Elektroden im Abbruchbereich nachgesetzt. Obwohl das Dielektrikum hier wandseitig gehalten wird, muss mindestens luftseitig eine Kapselung erfolgen. Allein bei vertikal nach unten gerichteten Bohrarbeiten kann bei günstiger Lage auf eine Prozessraumabdichtung verzichtet werden, da das Dielektrikum (Wasser) hier ausreichend gefasst ist.

Sowohl bei vertikalen, als auch bei horizontalen Arbeiten mit einem EIV-Gerät kann bei einem Durchbruch durch ein Bauelement der Prozessraum an der gegenüberliegenden Seite nicht mehr, beziehungsweise nur mit einem sehr hohen technischen Aufwand, abgedichtet werden. Dies schränkt die Einsatzmöglichkeiten des EIV ein.

### 7.2.3 Wasseraufbereitung

Der Transport des gelösten Materials aus dem Prozessraum erfolgt über das Dielektrikum Wasser. Eine Aufbereitung des Wassers ist während der Abbrucharbeiten mittel EIV nicht erforderlich, da eine Verschmutzung des Wassers kaum Einfluss auf die elektrische Festigkeit und die Löseleistung des EIV hat. Jedoch ist das abgetragene Material bereits frühzeitig aus dem Prozesskreislauf herauszufiltern, um eine Verstopfung der Leitung beziehungsweise einer Beschädigung der Pumpe entgegenzuwirken. Dazu kann ein

schräg zur Fließrichtung des Wassers gestellter Stangensizer<sup>17</sup> genutzt werden. Erst am Ende des EIV-Einsatzes muss über die weitere Aufbereitung des Prozesswassers unter Beachtung vorgenannter Verfahren entschieden werden.

Die Aufbereitung des verschmutzten Wassers, welches sich nach Beendigung der Abbrucharbeiten noch im Wasserkreislauf des EIV-Gerätes befindet, erfolgt üblicherweise in mehreren Schritten. Die groben Anteile der Suspension werden zunächst über Sedimentation und anschließende Siebung abgetrennt. Typische Maschenweiten von technischen Sieben reichen von 5 mm bis ca. 50 µm. Feststoff mit einer kleineren Korngröße muss über weitere Schritte abgetrennt werden, beispielsweise mit Hilfe von Hydrozyklonen (110 bis 25 µm) und einer Zentrifuge (120 bis 6 µm). Der Feststoffanteil, der eine kleinere Korngröße als 6 µm aufweist, kann dann nur durch chemische Verfahren abgetrennt werden. Dies könnte z. B. der Zusatz eines Flockungsmittels sein, das zu einer Zusammenlagerung der einzelnen Körner zu größeren Körnern führt, die dann wiederum mit den zuvor genannten mechanischen Verfahren abgetrennt werden können. Prinzipiell kann festgestellt werden, je feiner die Körner und je größer der Anteil der Feinpartikel ist, umso aufwändiger ist das Abtrennen vom Wasser.

Für die Aufbereitung von Schmutzwasser auf der Baustelle existieren am Markt bereits verschiedene Lösungen. Ein Beispiel dafür ist die mobile Aufbereitungsanlage der Firma reprotex GmbH. Die Anlage ist in einem 20-Fuß-Container verbaut, wodurch sie sehr kompakt, mobil und für Einsätze auf der Baustelle geeignet ist. Laut Herstellerangaben werden „5-10 % des Abwassers als Feststoff ausgeschieden und 90-95 % mit einer Reinwasserqualität von weniger als 1µm Partikelgröße der Hochdruckpumpe zur Weiterbeförderung in den Arbeitsprozess zurückgeleitet.“ [REP2020-1] Inwiefern der Aufwand für den Einsatz einer solchen Anlage die Anwendung von EIV rechtfertigt ist separat zu bewerten. Gleiches gilt für die Dimensionierung in Bezug auf die EIV-Anwendung in Kleingeräteformat.



Abbildung 53: Container Abwasseraufbereitung der Firma Reprotex GmbH im Einsatz bei dem Rückbau eines Hochhauses [REP2020-2]

<sup>17</sup> Grobgut-Vorabscheidung

### 7.2.4 Elektrodengeometrie

Die Laborversuche haben verdeutlicht, dass sich je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Elektrodengeometrien eignen. Während mit der Elektrodengeometrie B (vgl. Kapitel 6) eine höhere Löseleistung bei einem vollflächigen Abtrag festgestellt werden konnte, hat sich herausgestellt, dass die Elektrodengeometrie C eine höhere Löseleistung beim Nachsetzen der Elektroden erreicht. Die Elektrodengeometrie hat einen großen Einfluss auf die Löseleistung und muss dem Anwendungszweck entsprechend angepasst werden.

Durch weitere Versuche muss überprüft werden, welche Elektrodengeometrie sich für das Herauslösen der Bewehrung eines Stahlbetons am besten eignet. Durch eine Erhöhung der Kontaktfläche der Elektroden mit dem zurückzubauenden Material kann die Rückbauleistung des EIV gegebenenfalls verbessert werden. Diesbezüglich kann aufbauend auf den Versuchsergebnissen der Tiefenbohrung eine weitere Entwicklung der Elektrodengeometrie für den flächigen Abtrag respektive zur Realisierung von Bohrlöchern ermöglicht werden.

## 7.3 Anwendungskonzept für eine sichere und störungsfreie Einbindung des EIV

Für eine sichere Einbindung des EIV in die Baustellenumgebung sollten Schirmungsmaßnahmen im Nahfeld des EIV umgesetzt werden, um sicherzustellen, dass weitere Gewerke durch den Einsatz des EIV nicht behindert werden. Es ist zwingend erforderlich, dass die regulatorischen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Dies bezieht sich sowohl auf die Kennzeichnungspflicht des Herstellers als auch auf eine Gefährdungsbeurteilung sowie auf regelmäßig stattfindende Sicherheitsunterweisung der auf der Baumaßnahme beschäftigten Personen. Der Aufenthalt von Personen mit Herzschrittmachern oder implantierten Defibrillatoren im Gefahrenbereich des EIV-Gerätes ist verboten und der einzuhaltende Sicherheitsabstand ist dabei sicherzustellen. Weiterführende Informationen dazu gibt das Kapitel 9.

Beim Einsatz eines handgeführten EIV bzw. eines EIV-Anbaugerätes sollte für gewisse Arbeiten am EIV-Gerät eine Person auf der Baustelle anwesend sein, welche die Qualifikationen einer Elektrofachkraft innehat. Dies betrifft beispielsweise den Anschluss der Leitungen sowie das Öffnen des Gehäuses. Durch eine solche Qualifikation einer auf der Baustelle befindlichen Person kann vollumfänglich über die Gefahren bei Arbeiten im Hochspannungsfeld informiert werden und es kann darüber hinaus die Inbetriebnahme, Instandsetzung und Zustandsüberwachung selbstständig ausgeführt werden. Für eine sichere und störungsfreie Einbindung des EIV in die Baustellenumgebung ist dies nicht nur ein Sicherheitsaspekt, sondern auch ein Kostenaspekt.

Das Gesamtgewicht eines handgeführten EIV-Gerätes liegt momentan bei rund 85 kg. Bei diesem Gewicht sollte sich der Marx-Generator auf einem beweglichen Gestell befinden, um das Tragen des Gerätes zu vermeiden. Ein bereiftes oder raupenmobiles Gestell ist dazu vorstellbar. Die Elektroden, die Prozessraumabdichtung sowie die Zuleitung für Strom und Wasserversorgung ausgehend vom Marx-Generator können beim Rückbauprozess durch das Bedienpersonal frei geführt werden. Dieser durch das Bedienpersonal zu führende Geräteteil hat lediglich ein Gewicht von circa 5 kg. Mit einem Gewicht von 5 kg ist das bewegliche Teil des EIV mit dem Gewicht von herkömmlichen handgeführten Abbruchgeräten zu vergleichen.

Die Energieversorgung des handgeführten EIV-Gerätes kann durch einen regulären Stromanschluss mit bis zu 230 V sichergestellt werden. Wie auf Baustellen üblich, muss darauf geachtet werden, dass das Kabel nicht beschädigt wird. Weiterhin ist darauf zu achten, dass das Kabel vollständig ausgerollt ist, da es andernfalls zu einer Erwärmung des Kabels kommen kann.

## 8 Potenziale beim Rückbau mit EIV

In diesem Kapitel werden die Potenziale des EIV als Rückbautechnologie im Bauwesen aufgezeigt. Die im Labormaßstab erreichte Abbruchleistung des EIV wird dabei den gängigen Abbruch- und Trennverfahren gegenübergestellt und ausgewertet. Darüber hinaus werden die Kosten für die Herstellung und den Betrieb eines EIV-Gerätes dargelegt. Die Ergebnisse dieses Kapitels werden im letzten Abschnitt zusammengefasst.

### 8.1 Vergleich der Abbruchleistung

#### 8.1.1 Allgemeines

Neue Abbruchtechnologien werden sich am Markt etablieren, wenn diese entweder wirtschaftlicher, also schneller oder kostengünstiger als vergleichbare Verfahren sind oder in der Art der Leistungserbringung (z. B. Qualität, Emissionen, Einsatzgebiet) sich von vergleichbaren Verfahren abgrenzen.

Die Abbruchleistung einer Rückbautechnologie beeinflusst die wirtschaftlichen Potenziale des Verfahrens maßgeblich. Durch eine höhere Abbruchleistung [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] bzw. Trennleistung [ $\text{m}^2\text{-Trennfläche}/\text{h}$ ] können die Kosten für das Verfahren, bestehend aus Gerätekosten, Stoffkosten und Personalkosten, pro Mengeneinheit deutlich gesenkt werden. Zur Ermittlung der Abbruchleistung der gängigen Abbruch- und Trennverfahren stehen in der Literatur nur bedingt Daten zu Verfügung. Die Daten der Abbruchleistung des EIV basieren auf einer Hochrechnung der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Versuche an Kalksandstein- und Beton-Probekörpern. Zunächst wird die Hochrechnung für die Abbruchleistung des EIV erläutert und die Ergebnisse der Abbruch- und Trennleistung des EIV tabellarisch zusammengefasst. Daraufhin werden in den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels die Abbruchleistungen der gängigen Abbruch- und Trennverfahren, welche bereits in Kapitel 0 vorgestellt wurden, zusammengefasst und der Abbruchleistung des EIV vergleichend gegenübergestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, in welchen Bereichen eine Adaption des EIV aufgrund der Vergleichbarkeit zu den gängigen Verfahren möglich ist. Die Gegenüberstellung erfolgt daher getrennt nach Abbruch- und Trennverfahren.

Die Laborversuche wurden unter der Prämisse durchgeführt, einen möglichst selektiven Rückbau sicherzustellen. Ziel der Versuche war es zu untersuchen, welchen Einfluss das EIV auf das Gestein hat und wie eine lokale Begrenzung des elektrischen Impulses sichergestellt werden kann, um Materialien selektiv aus dem Verbund zu lösen. Eine Untersuchung des Totalabbruchs mittels EIV ohne eine lokale Begrenzung sowie ohne Selektivität war nicht Bestandteil des Forschungsprojektes.

Nachfolgende Ergebnisse basieren auf den Versuchsergebnissen, die im Rahmen des hier gegenständlichen Forschungsprojektes durchgeführt wurden.

#### 8.1.2 Hochrechnung der Abbruchleistung des EIV

Anhand der Versuche an Kalksandstein- und Beton-Probekörpern ist es möglich, eine Abbruchleistung pro Stunde für das EIV zu berechnen. Dabei ist zu beachten, dass die bisher durchgeführten Versuchsreihen hinsichtlich des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung als experimentelle Versuche im Labormaßstab einzuordnen sind. Aus technischer Sicht kann mit dem aktuellen Versuchsaufbau eine Frequenz von 10 Hz und 25 Hz für die Impulse des EIV bei konstanter Lösearbeit realisiert werden, weshalb diese Frequenzen auch für die hier gegenständliche Hochrechnung genutzt wurden. Eine höhere Frequenz kann nicht realisiert werden, da sich die Kondensatoren des EIV zu sehr erwärmen, wodurch eine konstante Nutzung des EIV nicht möglich wäre.

Als Basis für die Berechnung der Nutzleistung des EIV in  $\text{m}^3$  pro Stunde und  $\text{m}^2\text{-Trennfläche}$  pro Stunde dienen die Versuchsergebnisse an den Kalksandstein- und Beton-Probekörpern. Die Elektroden des EIV wurden bei den Versuchen nicht kontinuierlich über die Proben bewegt. Diese wurden vielmehr auf den Probekörper

aufgesetzt, der Probekörper mit 5 elektrischen Impulsen beaufschlagt und die Elektroden anschließend erneut um 10 mm versetzt auf den Probekörper positioniert. Insgesamt wurde der Ablauf 7 Mal wiederholt, sodass insgesamt 35 elektrische Impulse in den Probekörper eingetragen wurden. In Abbildung 54 wird der Versuchsablauf verdeutlicht.

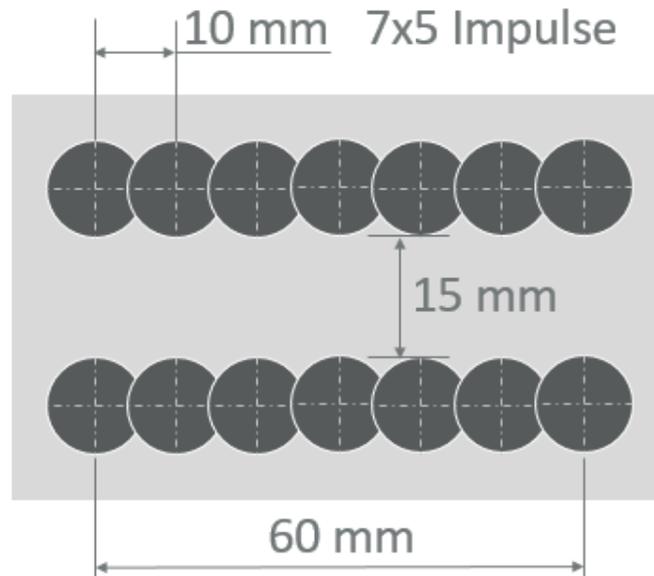


Abbildung 54: Versuchsablauf - Nachsetzen der Elektrode B (38 kV, 80 J/Impuls)

Die Ergebnisse des in Abbildung 54 dargestellten Versuchsablaufs mit Nachsetzen der Elektroden werden in Tabelle 29 zusammengefasst. Es wurde eine Energie von 2.800 J benötigt, um die in Tabelle 29 erreichten Ergebnisse zu generieren.

Tabelle 29: Versuchsergebnisse Nachsetzen der Elektrode B; 10 mm nach 5 Impulsen

Überschnitt Breite [cm]	4,00
Überschnitt Länge [cm]	8,00
Gelöste Menge nach 5 Impulsen [cm <sup>3</sup> ]	3,77
Gelöste Menge nach 35 Impulsen [cm <sup>3</sup> ]	26,40
Mittlere Tiefe [cm]	0,83
Trennfläche nach 35 Impulsen [cm <sup>2</sup> ]	6,60

Mit diesem Versuchsaufbau war es möglich, 26,4 cm<sup>3</sup> aus dem Betonprobekörper herauszulösen. Die Abmessungen der mittels EIV aus dem Beton-Probekörper gelösten Vertiefung wurden mit einer Breite von 4,0 cm, einer Länge von 8,0 cm und einer Tiefe von circa 0,8 cm gemessen. Durch Multiplikation des Überschnittes in der Länge mit der mittleren Tiefe kann die Trennfläche nach 35 Impulsen zu 6,6 cm<sup>2</sup> bestimmt werden.

Je nachdem, mit welcher Frequenz die Hochspannungsimpulse in den zurückzubauenden Baustoff geleitet werden, kann eine differierende Abbruchleistung realisiert werden. Mit dem aktuellen Versuchsaufbau kann, wie bereits genannt, ein konstanter Löseprozess bei einer Frequenz von 10 Hz bis hin zu maximal 25 Hz erreicht werden. Daher wurde die Hochrechnung der Abbruchleistung des EIV sowohl für eine Frequenz von 10 Hz als auch für eine Frequenz von 25 Hz durchgeführt. In Tabelle 30 werden die Ergebnisse der Hochrechnung für eine Frequenz von 10 Hz und in Tabelle 31 die Hochrechnung für eine Frequenz von 25 Hz zusammengefasst.

Tabelle 30: Hochrechnung; Nachsetzen Elektrode B; 10 Hz

Dauer pro Impuls [s]	0,100
Dauer 35 Impulse [s]	3,500
Gelöste Menge pro Minute [cm <sup>3</sup> /min]	452,571
Trennfläche pro Minute [cm <sup>2</sup> /min]	113,143
Gelöste Menge pro Stunde [cm <sup>3</sup> /h]	27.154,286
Trennfläche pro Stunde [cm <sup>2</sup> /min]	6.788,571
Gelöste Menge pro Stunde [m <sup>3</sup> /h]	0,027
Trennfläche pro Stunde [m <sup>2</sup> /h]	0,679

Tabelle 31: Hochrechnung; Nachsetzen Elektrode B; 25 Hz

Dauer pro Impuls [s]	0,040
Dauer 35 Impulse [s]	1,400
Gelöste Menge pro Minute [cm <sup>3</sup> /min]	1.131,429
Trennfläche pro Minute [cm <sup>2</sup> /min]	282,857
Gelöste Menge pro Stunde [cm <sup>3</sup> /h]	67.885,714
Trennfläche pro Stunde [cm <sup>2</sup> /h]	16.971,429
Gelöste Menge pro Stunde [m <sup>3</sup> /h]	0,068
Trennfläche pro Stunde [m <sup>2</sup> /h]	1,697

Bei einer Frequenz von 10 Hz werden für die 35 Impulse 3,5 s und bei 25 Hz lediglich 1,4 s benötigt. Dies bedeutet, dass bei 10 Hz in einer Stunde 1.028 Impulse und bei 25 Hz 2.571 Impulse generiert und eine Trennfläche von 6.788 bzw. 16.971 cm<sup>2</sup> pro Stunde (= 0,679 bzw. 1,697 m<sup>2</sup> pro Stunde) realisiert werden können.

Die Abbruchleistung, welche mit dem EIV an einem Beton-Probekörper realisiert werden konnte, muss für Abbrucharbeiten von Stahlbeton gemindert werden. Je nach Bewehrungsgrad eines Stahlbetons muss mit einer deutlichen Minderung der Abbruchleistung eines EIV-Gerätes gerechnet werden. Begründet wird diese Annahme mit der gezielten Positionierung der Elektroden entlang der Bewehrung. Wenn die Erdungselektrode mit der Bewehrung in Kontakt kommt, wird die Funktion des Verfahrens kaum beeinflusst. Bei Kontakt der Impulselektrode mit der Bewehrung kommt es jedoch zu einem Kurzschluss und es wird kein Material gelöst. Versuche an Stahlbeton-Probekörpern wurden im Rahmen des Forschungsprojektes nur insofern durchgeführt, als dass überprüft wurde, ob sich die Bewehrung ohne Schädigung herauslösen lässt. Mangels weiterer Kenntnisse wird für die folgende Betrachtung angenommen, dass die Abbruchleistung des EIV bei einem Stahlbeton um 20 bis 50 Prozent niedriger ist, als bei Beton. In Tabelle 32 werden die Ergebnisse und Annahmen für die Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes entsprechend des im Labor genutzten Gerätes zusammengefasst.

Tabelle 32: Hochrechnung Abbruchleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; handgeführtes EIV-Gerät; 10 Hz und 25 Hz

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m <sup>3</sup> /h]			
	Mauerwerk	Beton	Stahlbeton (20 % Minderung)	Stahlbeton (50 % Minderung)
Elektro-Impuls-Verfahren, 10 Hz	0,030	0,027	0,022	0,014
Elektro-Impuls-Verfahren, 25 Hz	0,074	0,068	0,054	0,034

Durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen den Elektroden und dem zurückzubauenden Bauteil bzw. Bauelement sowie die Verwendung von zwei Marx-Generatoren kann die Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes um das Dreifache der ermittelten Abbruchleistung basierend auf den Laborversuchen gesteigert werden. Sowohl die Vergrößerung der Kontaktfläche als auch die Verwendung von zwei Marx-Generatoren haben eine Erhöhung des Gesamtgewichtes eines EIV-Gerätes zur Folge. Demzufolge eignet sich ein solches EIV-Gerät nicht mehr für einen handgeführten Einsatz, sondern lediglich als Anbaugerät für ein Trägergerät. In der Tabelle 33 werden die Ergebnisse der Hochrechnung für ein EIV-Anbaugerät zusammengefasst.

Tabelle 33: Hochrechnung Abbruchleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; EIV-Anbaugerät; 10 Hz und 25 Hz

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m <sup>3</sup> /h]			
	Mauerwerk	Beton	Stahlbeton (20 % Minderung)	Stahlbeton (50 % Minderung)
Elektro-Impuls-Verfahren, 10 Hz	0,090	0,081	0,066	0,042
Elektro-Impuls-Verfahren, 25 Hz	0,222	0,204	0,162	0,102

Ergänzend zu der Hochrechnung der Abbruchleistung des EIV wird in Tabelle 34 auch die reine Trennleistung des EIV für Beton zusammengefasst. Eine Leistungsangabe für den Rückbau von Stahlbetonbauteilen ist nicht möglich, da das EIV die in einem Stahlbeton befindliche Bewehrung nicht durchtrennen, sondern nur ohne Schädigung freilegen kann.

Tabelle 34: Hochrechnung reine Trennleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; 10 Hz und 25 Hz

Trennverfahren	Trennleistung [m <sup>2</sup> -Trennfläche/h]
	Beton
Elektro-Impuls-Verfahren 10 Hz	0,679
Elektro-Impuls-Verfahren 25 Hz	1,697

### 8.1.3 Vergleich der Abbruchleistung von EIV mit etablierten Abbruchverfahren

Bei der vergleichenden Betrachtung der etablierten Abbruchverfahren mit dem EIV erfolgt eine getrennte Gegenüberstellung von handgeführten und maschinengeführten Abbruchverfahren. Die Demontage mittels Hebezeug wird an dieser Stelle nicht vertiefend betrachtet, da die Vergleichbarkeit des Verfahrens zum potenziellen Einsatzgebiet eines EIV-Gerätes nicht gegeben ist. Die Darlegung der Abbruchleistung beschränkt sich auf jene Verfahren, welche sowohl im Bereich des Teilrückbaus als auch im Bereich des Totalrückbaus eingesetzt werden können.

#### 8.1.3.1 Vergleich der Abbruchleistung von EIV und handgeführten Abbruchverfahren

Die handgeführten Abbruchverfahren wurden bereits in einem vorangegangenen Kapitel vollumfänglich vorgestellt. In Tabelle 35 werden zunächst die Abbruchleistungen der handgeführten Abbruchverfahren zusammengefasst. Dabei wird nach der Art des zurückzubauenden Materials unterschieden.

Es ist zu erkennen, dass die Abbruchleistung des druckluftbetriebenen Abbruchhammers und des handgeführten Bohrhammers (18 bis 20 Kilogramm) ähnlich ausfallen, ebenso wie die Abbruchleistung des handgeführten elektrischen Abbruchhammers und des handgeführten Bohrhammers (10 bis 12 Kilogramm). Das Gewicht des handgeführten Gerätes hat einen deutlichen Einfluss auf die Abbruchleistung. Mit steigendem Gewicht nimmt die Abbruchleistung zu. Die Ergebnisse der Hochrechnung werden in Tabelle 35 der Abbruchleistung der handgeführten Abbruchverfahren gegenübergestellt.

Tabelle 35: Abbruchleistung handgeführter Abbruchverfahren und EIV

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m³/h]			
	Mauerwerk	Beton	Stahlbeton	
handgeführter Abbruchhammer (elektrisch)	0,394	0,300	0,238	
handgeführter Abbruchhammer (Druckluft)	0,919	0,594	0,300	
handgeführter Bohrhammer (10 bis 12 kg)	0,265	0,213	0,160	
handgeführter Bohrhammer (18 bis 20 kg)	0,803	0,568	0,375	
			<b>20 %</b>	<b>50 %</b>
<b>Minderung der Abbruchleistung Beton</b>				
Elektro-Impuls-Verfahren 10 Hz	0,030	0,027	0,022	0,014
Elektro-Impuls-Verfahren 25 Hz	0,074	0,068	0,054	0,034

Es ist zu erkennen, dass die Abbruchleistung des EIV geringer ist als die Abbruchleistung der handgeführten Abbruchverfahren. In den nachfolgenden Diagrammen wird die Abbruchleistung des EIV den handgeführten Abbruchverfahren gegenübergestellt. Dazu wurde berechnet, wie viel Prozent der Abbruchleistung eines handgeführten Abbruchverfahrens durch das handgeführte EIV-Gerät erreicht werden kann. Die Berechnung wurde für eine Frequenz von 10 Hz und 25 Hz durchgeführt. In Abbildung 55 sind die prozentualen Anteile der theoretisch erreichbaren Leistung mit einem handgeführten EIV-Gerät (Betrieb mit 25 Hz und 10 Hz) im Vergleich zu den etablierten handgeführten Abbruchgeräten dargestellt. Beispielsweise kann mit einem handgeführten EIV-Gerät mit einer Frequenz von 25 Hz eine Abbruchleistung von 9 % eines handgeführten Bohrhammers (18 bis 20 kg) beim Rückbau von Mauerwerk erreicht werden. In Abbildung 56 erfolgt die Betrachtung für den Rückbau von Beton.

Anhand der Abbildungen ist zu erkennen, dass mit steigender Festigkeit des zurückzubauenden Materials eine geringere Differenz der Abbruchleistung realisiert werden kann.

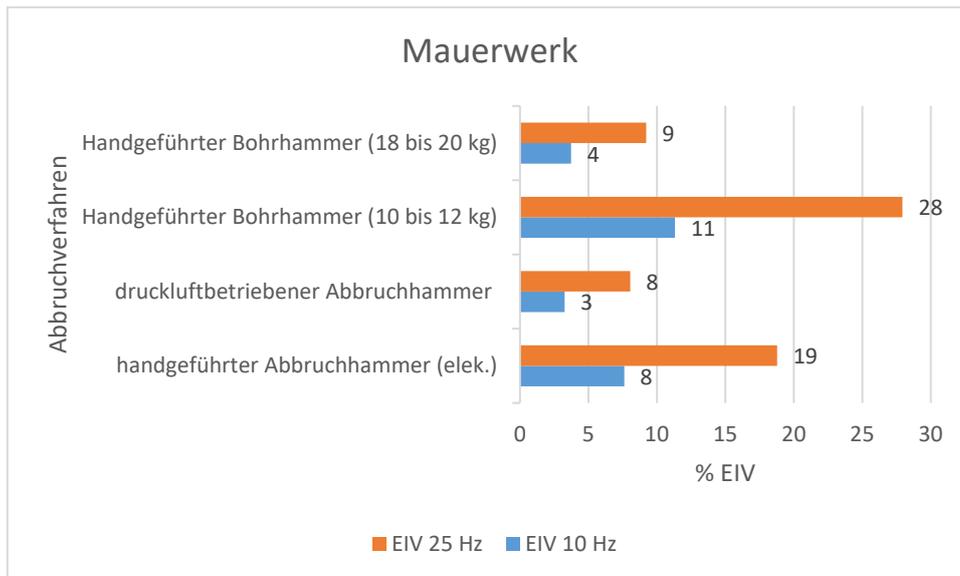


Abbildung 55: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Mauerwerk

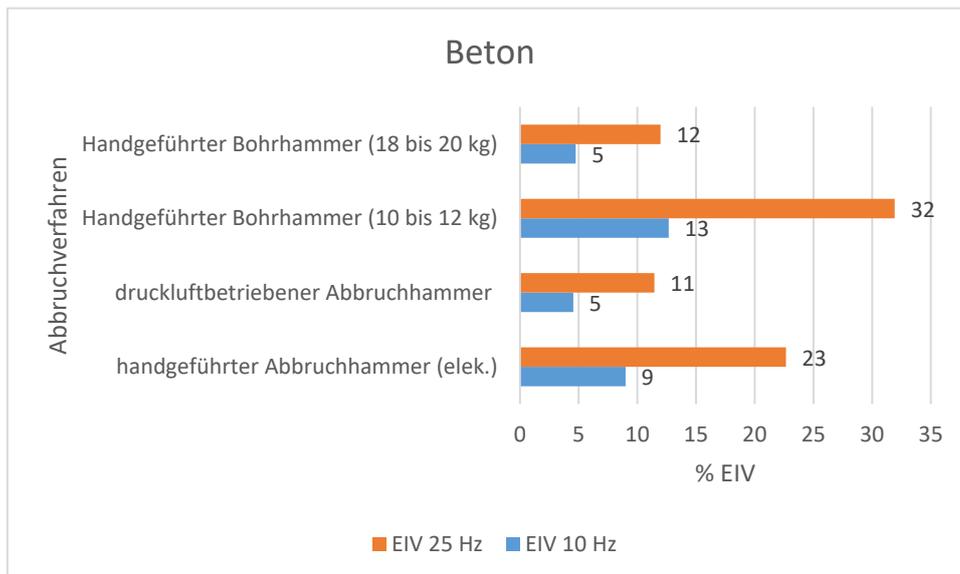


Abbildung 56: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Beton

Darüber hinaus wurde die Abbruchleistung des EIV für den Rückbau von Stahlbeton unter der Annahme einer Minderung der Abbruchleistung von Beton zwischen 20 und 50 Prozent mit den gängigen handgeführten Abbruchverfahren bewertet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 57 für eine Minderung um 20 % und in Abbildung 58 für eine Minderung um 50 % dargestellt.

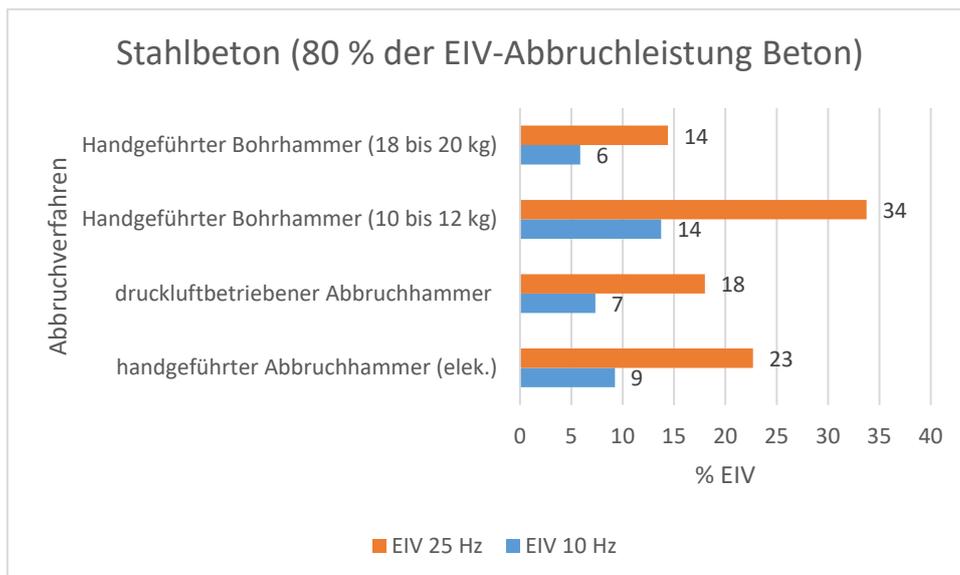


Abbildung 57: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Stahlbeton (80 % Beton)

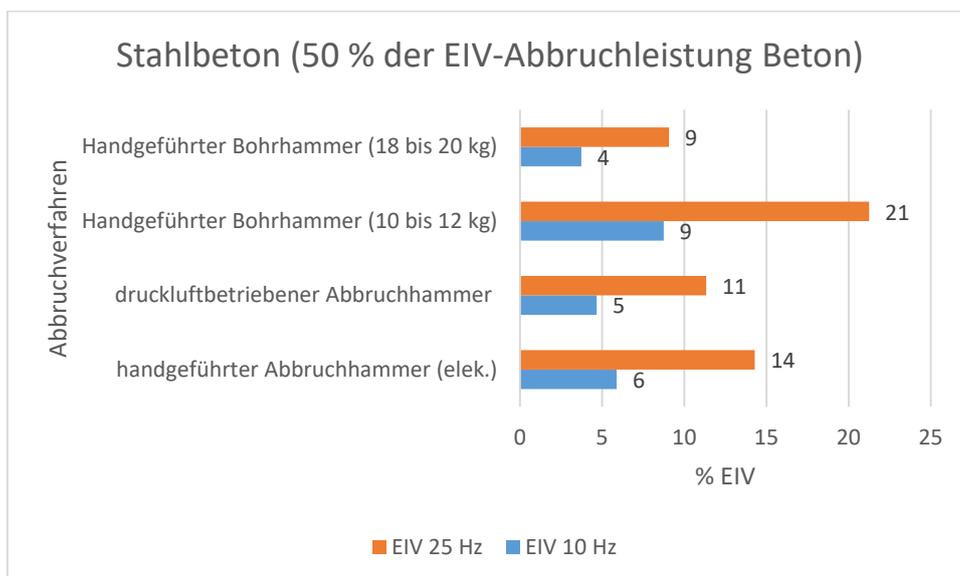


Abbildung 58: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Stahlbeton (50 % Beton)

Es ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen der Abbruchleistung von bisher etablierten handgeführten Abbruchgeräten und dem handgeführten EIV-Gerät bei Stahlbeton (80 % der Abbruchleistung von Beton) geringer ausfällt, als bei Baustoffen mit einer niedrigeren Festigkeit. Weiterhin verdeutlicht Abbildung 58, dass mit dem handgeführten EIV-Gerät auch unter der Annahme, dass beim Rückbau von Stahlbeton nur 50 % der Abbruchleistung von Beton erreicht werden kann, im Vergleich zu den etablierten Abbruchverfahren keine deutliche Verringerung der Abbruchleistung zu verzeichnen ist.

### 8.1.3.2 Vergleich der Abbruchleistung von EIV und Anbaugeräten

Nachdem die Abbruchleistungen der handgeführten Abbruchverfahren mit den Abbruchleistungen handgeführter EIV-Geräte verglichen wurden, soll nachfolgend die Abbruchleistung der Anbaugeräte für Trägergeräte mit der Rückbauleistung des EIV verglichen werden. Die vergleichende Betrachtung beschränkt sich auf den Rückbau der Materialien Beton und Stahlbeton.

Die Abbruchleistungen der Anbaugeräte wurden zunächst für ein Trägergerät mit einem Gewicht von 20 t zusammengetragen, da weder in der Literatur noch in den Datenblättern der Hersteller Angaben zu den Abbruchleistungen von Anbaugeräten für Trägergeräte mit einem Gewicht von 5 t aufgeführt werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Leistungswerte eines Pulverisierers üblicherweise auf die Aufbereitung von bereits gelöstem Material beziehen und nicht auf den Rückbau von Bauteilen oder Bauelementen aus dem Verbund. Um eine Vergleichbarkeit des Verfahrens sicherzustellen, wurde die Annahme getroffen, dass die Abbruchleistung des Pulverisierers für den Rückbau bei 70 % der Aufbereitungsleistung liegt. Zunächst werden die Abbruchleistungen von Anbaugeräten für ein Trägergerät mit einem Gewicht von circa 20 t in der Tabelle 36 zusammengefasst.

Tabelle 36: Abbruchleistung Anbaugeräte für 20-Tonnen-Trägergerät

Abbruchverfahren: Anbaugeräte für Trägergerät	Abbruchleistung [m³/h]			
	Beton		Stahlbeton	
Abbruchhammer	24,0	50,0	15,0	32,0
Abbruchzange	20,0	25,0	8,0	15,0
Pulverisierer (Aufbereitung)	25,0	30,0	13,5	18,0
Pulverisierer (Rückbau)	17,5	21,0	9,5	12,6
Beton-/Abbruchfräse	8,0	15,0	3,0	6,0

Mit dem Anbaugerät Abbruchhammer lässt sich die höchste Rückbauleistung erreichen. In einem weiteren Schritt wurde ermittelt, wie hoch die Abbruchleistungen der Anbaugeräte prozentual im Vergleich zum Abbruchhammer sind. Dazu wurde für jedes Anbaugerät der Mittelwert für den Rückbau von Beton und Stahlbeton herangezogen. In Tabelle 37 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 37: Abbruchleistung Anbaugeräte und Vergleich Anbaugeräte 20-Tonnen-Trägergerät

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m³/h]						% Abbruchhammer	
	Beton			Stahlbeton			Beton	Stahlbeton
	min	max.	MW	min.	max.	MW		
Abbruchhammer	24,0	50,0	37,0	15,0	32,0	23,5	100 %	100 %
Abbruchzange	20,0	25,0	22,5	8,0	15,0	11,5	61 %	49 %
Pulverisierer (Aufbereitung)	25,0	30,0	27,5	13,5	18,0	15,8	74 %	67 %
Pulverisierer (Rückbau)	17,5	21,0	19,3	9,5	12,6	11,0	52 %	47 %
Beton-/Abbruchfräse	8,0	15,0	11,5	3,0	6,0	4,5	31 %	19 %

Die Ergebnisse aus Tabelle 37 wurden zur Ermittlung der Abbruchleistung von Anbaugeräten für Trägergeräte mit einem Gewicht von 5 t herangezogen. Diese Trägergeräte werden auf Baumaßnahmen in sensiblen Bereichen eingesetzt und eignen sich demzufolge auch als Trägergerät für ein EIV-Anbaugerät. Die Abbruchleistung eines Abbruchhammers für ein Trägergerät mit einem Gewicht von 5 t wurde für die Materialien Beton sowie der Mittelwert aus schwach bewehrtem Stahlbeton und stark bewehrtem Stahlbeton ermittelt. Die Abbruchleistung des Abbruchhammers wurde mit rund 5 m³/h bei Beton und 1,50 m³/h bei Stahlbeton festgelegt [SCH2015, S. 298 f.]. Anschließend wurde für die anderen Anbaugeräte der prozentuale Anteil entsprechend Tabelle 37 angesetzt und daraus die Abbruchleistung ermittelt. Es wurde am Beispiel Beton- / Abbruchfräse erfolgreich überprüft, dass der gewählte Ansatz korrekt ist. Tabelle 38 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 38: Abbruchleistung Anbaugeräte für 5-Tonnen-Trägergerät

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m³/h]	
	Beton	Stahlbeton
Abbruchhammer	5,00	1,50
Abbruchzange	3,04	0,74
Pulverisierer (Aufbereitung)	3,72	1,01
Pulverisierer (Rückbau)	2,60	0,71
Beton-/Abbruchfräse	1,55	0,57

Nachdem die Abbruchleistungen der Anbaugeräte für ein 5-Tonnen-Trägergerät ermittelt wurden, können diese mit der Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes basierend auf der Hochrechnung im vorangegangenen Abschnitt erfolgen. In Tabelle 39 werden die Abbruchleistungen der beiden Verfahren tabellarisch gegenübergestellt.

Tabelle 39: Abbruchleistung Anbaugeräte und EIV-Anbaugerät für 5-Tonnen-Trägergerät

Abbruchverfahren	Abbruchleistung [m³/h]		
	Beton	Stahlbeton	
Abbruchhammer	5,00	1,50	
Abbruchzange	3,04	0,74	
Pulverisierer (Aufbereitung)	3,72	1,01	
Pulverisierer (Rückbau)	2,60	0,71	
Beton-/Abbruchfräse	1,55	0,57	
		<b>20 %</b>	<b>50 %</b>
		<b>Minderung der Abbruchleistung Beton</b>	
Elektro-Impuls-Verfahren, 10 Hz	0,081	0,066	0,042
Elektro-Impuls-Verfahren, 25 Hz	0,204	0,162	0,102

Bereits anhand der Tabelle 39 lässt sich erkennen, dass die Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes im Vergleich zu den etablierten Anbaugeräten geringer ist. Wie im vorangegangenen Abschnitt wird an dieser Stelle auch eine vergleichende Betrachtung der Abbruchleistung von bisher etablierten Anbaugeräten und einem EIV-Anbaugerät erfolgen. Dazu wurde berechnet, wie viel Prozent der Abbruchleistung eines bisher etablierten Anbaugerätes durch ein EIV-Anbaugerät erreicht werden kann. In Abbildung 59 wird dargestellt, wie viel Prozent der Abbruchleistung der bisher etablierten Anbaugeräte beim Rückbau von Beton durch ein EIV-Anbaugerät erreicht werden kann. In Abbildung 60 sowie Abbildung 61 wird dargestellt, wie viel Prozent der Abbruchleistung der bisher etablierten Anbaugeräte beim Rückbau von Stahlbeton durch ein EIV-Anbaugerät erreicht werden kann.

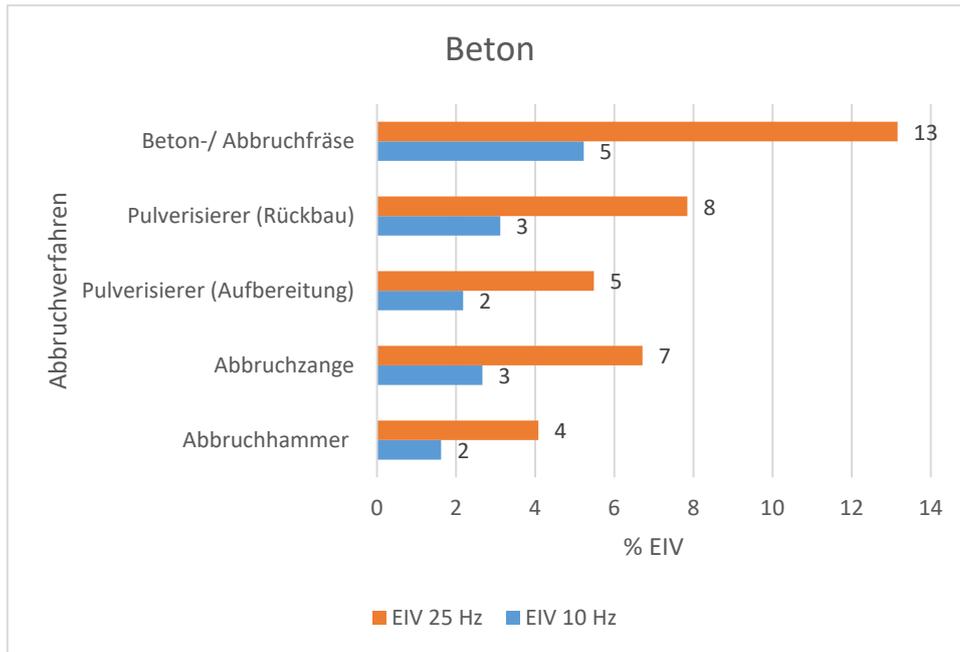


Abbildung 59: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Beton

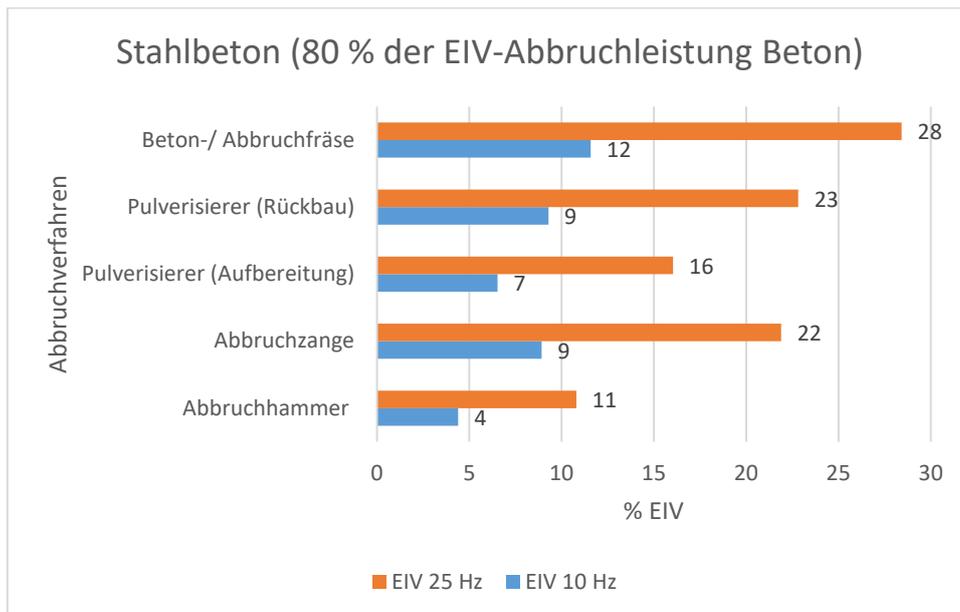


Abbildung 60: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Stahlbeton (80 % Beton)

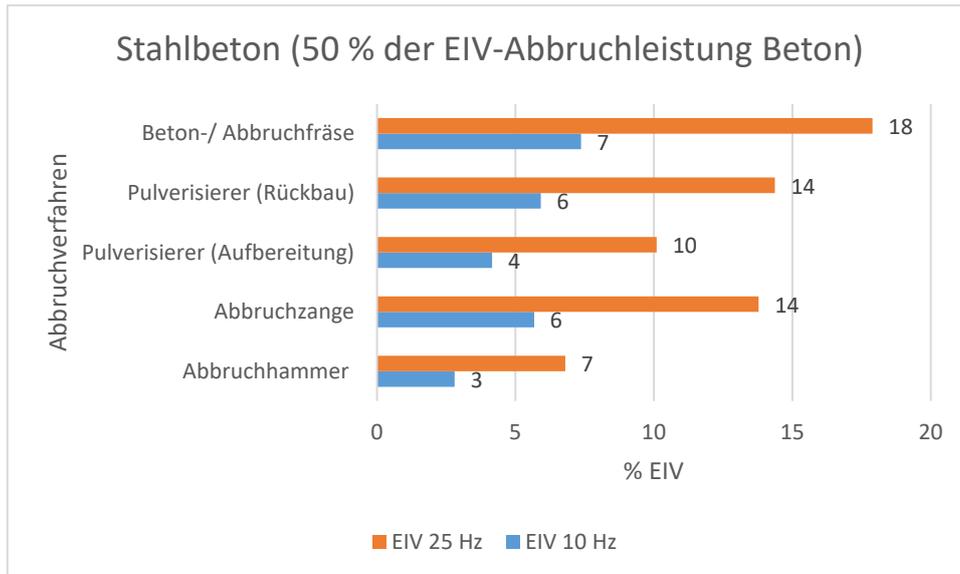


Abbildung 61: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Stahlbeton (50 % Beton)

Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass die Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes mit zunehmender Festigkeit des zurückzubauenden Materials im Vergleich zu den bisher etablierten Anbaugeräten steigt. Dieser Trend konnte bereits beim Vergleich der handgeführten Abbruchverfahren mit dem EIV festgestellt und an dieser Stelle bestätigt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich mit zunehmender Festigkeit des rückzubauenden Materials die Eignung des EIV verbessert. Dabei wurde im Rahmen der durchgeführten Versuche mit circa 10 % bis 30 % der Leistung etablierter Anbaugeräte kein vergleichbarer Leistungswert erreicht.

### 8.1.4 Vergleich der Trennleistung von EIV mit etablierten Trennverfahren

Neben den Abbruchverfahren werden in diesem Abschnitt die Schnitt- und Trennleistungen von etablierten Trennverfahren vergleichend zusammengefasst. Die Schnitt- und Trennleistung der Trennverfahren werden in m<sup>2</sup>-Trennfläche pro Stunde angegeben. Weiterhin werden die Trennverfahren unterschieden in Schnittverfahren und Bohrverfahren. Die vergleichende Gegenüberstellung der Trennverfahren mit dem EIV erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten getrennt nach Schnittverfahren und Bohrverfahren, um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

#### 8.1.4.1 Vergleich der Trennleistung von EIV mit etablierten Schnittverfahren

Schnittverfahren zeichnen sich durch eine deutliche Schnittlinie aus. Die gängigen Schnittverfahren Kreissägeverfahren, Kettensägeverfahren und das Seilsägeverfahren wurden in vorangegangenen Kapiteln bereits vorgestellt und thematisiert. Einige Geräte wie beispielweise die Kettensäge oder die Kreissäge können freihändig bewegt werden. Üblicherweise sind für die Schnittverfahren Vorarbeiten wie beispielsweise die Montage einer Führungsschiene für das Kreissägeverfahren oder Bohrungen zum Durchführen des mit Diamanten besetzten Seils des Seilsägeverfahrens erforderlich. Beim Seilsägeverfahren sind die Vorarbeiten zwingend erforderlich. Bei den Ketten- und Kreissägen kann durch diese Vorarbeiten eine höhere Schnittleistung erreicht werden. Beim Vergleich der Schnittverfahren mit dem EIV wird die reine Trennleistung ohne Berücksichtigung von Nebenarbeiten betrachtet. In Tabelle 40 werden die Schnittleistungen der gängigen Schnittverfahren zunächst zusammengefasst. Anhand der Tabelle 40 ist deutlich zu erkennen, dass mit dem Seilsägeverfahren die höchste Schnittleistung erreicht werden kann. Die Hochrechnung der Schnittleistung des EIV wurde in einem vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels bereits erläutert und die Ergebnisse werden in Tabelle 40 den gängigen Schnittverfahren gegenübergestellt.

Tabelle 40: Schnittleistung Schnittverfahren und Trennleistung EIV

Schnittverfahren	Schnittleistung [m <sup>2</sup> -Trennfläche/h]
	Beton
Kreissäge	1,000
Kettensäge	0,750
Seilsäge	2,500
EIV, 10 Hz	0,679
EIV, 25 Hz	1,697

Zusätzlich wurde wie auch bei den Abbruchverfahren in den vorangegangenen Abschnitten berechnet, wie viel Prozent der Trennleistung der etablierten Schnittverfahren durch das EIV erreicht werden können. Die Berechnung wurde für eine Frequenz von 10 Hz und 25 Hz durchgeführt. In Abbildung 62 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

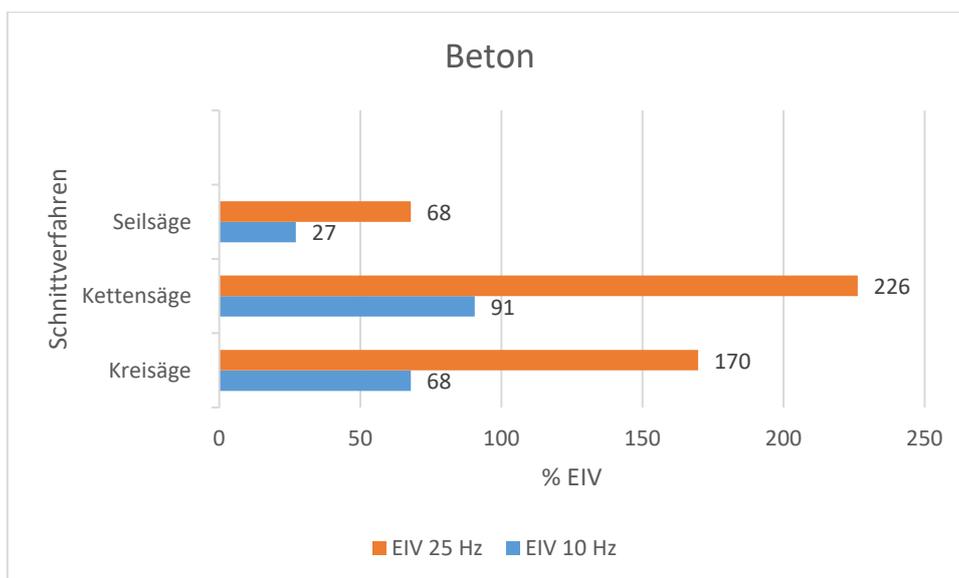


Abbildung 62: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Schnittleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten Schnittverfahren; Beton

Bereits mit einer Frequenz von 10 Hz lässt sich mit dem EIV im Vergleich zu den etablierten Schnittverfahren eine gute Schnittleistung erreichen. Die Schnittleistung des EIV bei einer Frequenz von 10 Hz liegt bei 27 % einer Seilsäge, bei 91 % einer Kettensäge und 68 % einer Kreissäge. Durch die Erhöhung der Frequenz von 10 Hz auf 25 Hz kann die Schnittleistung des EIV deutlich erhöht werden. Während mit dem EIV auch bei einer Frequenz von 25 Hz lediglich 68 % der Schnittleistung einer Seilsäge erreicht werden können, ist es möglich, eine höhere Schnittleistung zu realisieren als Kettensägen und Kreissägen. Die Qualität der Schnittfläche (Ebenheit) ist bei den etablierten Trennverfahren gradlinig und beim EIV sind diese durch Ausbrüche gekennzeichnet, wodurch nur bedingt vergleichbar erreicht werden kann.

#### 8.1.4.2 Vergleich der Trennleistung von EIV und Bohrverfahren

Bei den Bohrverfahren erfolgt die Trennung nicht durch einen kontinuierlich in dem Bauteil bzw. Bauelement fortgeführten Schnitt, sondern durch das vollständige oder teilweise Herauslösen von Teilen des Bauteils bzw. Bauelementes. Da die Vor- und Nebenarbeiten bei den Bohrverfahren geringer ausfallen als bei den Schnittverfahren, erfolgt eine vergleichende Betrachtung der Trennleistung anhand der Nutzleistung.

Für die vergleichende Betrachtung der Nutzleistung der etablierten Bohrverfahren mit der Nutzleistung des EIV werden die Ergebnisse der im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Hochrechnung genutzt. Die Ergebnisse der Hochrechnung des EIV beinhalten keine Vor- oder Nacharbeiten, welche gegebenenfalls beim Einsatz des EIV anfallen. Ziel ist es, das Verfahren unmittelbar nach dem Anschluss an das Stromnetz sowie der Sicherstellung einer ausreichenden Menge an Dielektrikum einzusetzen. Demzufolge ist mit einem sehr geringen Aufwand für Vor- und Nacharbeiten vergleichbar mit dem Einsatz eines Bohrhammers, auszugehen. In Tabelle 41 wird die Trennleistung des EIV den Nutzleistungen der etablierten Bohrverfahren gegenübergestellt. Weiterhin wird in Abbildung 63 dargestellt, wie viel Prozent der Nutzleistung der etablierten Bohrverfahren durch das EIV realisiert werden können.

Tabelle 41: Nutzleistung etablierter Bohrverfahren und Trennleistung EIV

Bohrverfahren	Nutzleistung [m <sup>2</sup> -Trennfläche/h]
	Beton
Kernbohrer (d = 80 mm)	0,325
Kernbohrer (d = 150 mm)	0,725
Kernbohrer (d = 200 mm)	0,950
Kernbohrer (d = 300 mm)	1,725
Bohrhammer senkrecht (d < 300 mm)	3,770
Bohrhammer waagrecht (d < 300 mm)	1,885
EIV 10 Hz	0,679
EIV 25 Hz	1,697

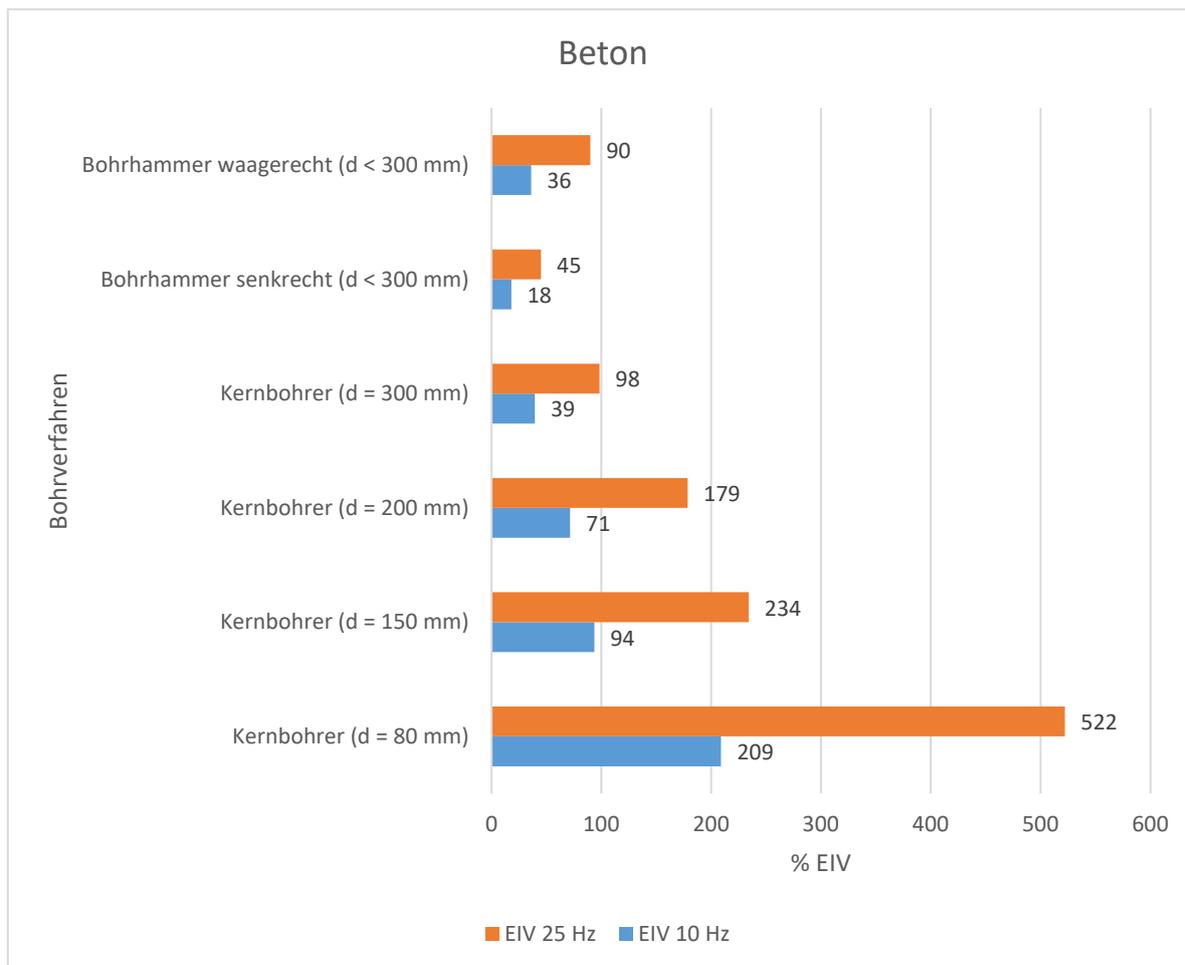


Abbildung 63: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Trennleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten Bohrverfahren; Beton

Verfahrensbedingt kann mit einem Bohrhammer bei senkrechten Arbeiten eine höhere Nutzleistung erreicht werden als bei waagerechten Arbeiten. Mit dem EIV kann sowohl bei senkrechten als auch bei waagerechten Arbeiten die gleiche Trennleistung erreicht werden. Anhand von Abbildung 63 wird deutlich, dass bei einer Frequenz von 10 Hz nur 18 % der Nutzleistung eines senkrecht arbeitenden Bohrhammers und nur 36 % der Nutzleistung eines waagrecht arbeitenden Bohrhammers erreicht werden können. Bei einer Frequenz von 25 Hz hingegen ist es möglich, 45 % der Nutzleistung eines senkrecht arbeitenden Bohrhammers und sogar 90 % eines waagrecht arbeitenden Bohrhammers zu erzielen.

Die Nutzleistung eines Kernbohrers nimmt mit steigendem Durchmesser zu. Mit einem EIV-Gerät kann konstant die gleiche Trennleistung erreicht werden. Dies wird durch Abbildung 63 verdeutlicht. Mit Verringerung des Durchmessers eines Kernbohrgerätes kann das EIV eine höhere Trennleistung realisieren, wodurch der prozentuale Unterschied der Trennleistung zwischen EIV-Gerät und Kernbohrgerät sinkt. Im Vergleich zum Kernbohrer mit einem Durchmesser von 150 mm kann das EIV mit einer Frequenz von 10 Hz bereits 94 % der Bohrleistung erreichen, bei einem Durchmesser von 80 mm sogar 209 %. Durch die Erhöhung der Frequenz von 10 Hz auf 25 Hz kann die Trennleistung des EIV erhöht und damit der prozentuale Unterschied zwischen Bohrverfahren und EIV deutlich verändert werden. Mit einer Frequenz von 25 Hz kann das EIV bereits 98 % der Bohrleistung eines Kernbohrers mit einem Durchmesser von 300 mm und sogar 522 % der Bohrleistung eines Kernbohrers mit einem Durchmesser von 80 mm erreichen.

## 8.2 Gerätekosten des EIV-Gerätes

Der Aufbau eines EIV-Gerätes wurde bereits bei den experimentellen Untersuchungen sowie bei der Gerätekonzeption vorgestellt. Die Gerätekosten werden anhand des prinzipiellen Aufbaus eines EIV-Gerätes dargelegt. Als Beispiel dient das dem Forschungsprojekt zugrundeliegende EIV-Gerät. Die einzelnen Komponenten, welche nachfolgende monetär bewertet werden, sind:

- die Gerätehülle,
- der Marx-Generator (bestehend aus einzelnen Kondensatoren),
- Elektroden,
- Blech- und Kleinteile,
- diverse Kunststoffe und
- Kupferlackdraht.

Die Gerätehülle muss ausreichend robust sein, damit durch den Einsatz auf einer Baustelle das Gerät nicht beschädigt wird. Im Wesentlichen werden durch die Gerätehülle die darin befindlichen Geräteteile vor äußeren Einflüssen wie beispielsweise Stoß, Staub oder Feuchtigkeit geschützt. Die Gerätehülle wurde durch eine externe Firma gefertigt, die Kosten betragen rund 2.500 Euro.

Die Impulsenergie des Marx-Generators kann durch die Anzahl der Kondensatoren reguliert werden. Für eine höhere Impulsenergie wird eine höhere Anzahl an Kondensatoren benötigt. Die Beschaffungskosten für die Kondensatoren des Marx-Generators, welcher im Rahmen der Laborversuche verwendet wurde, belaufen sich auf rund 2.800 Euro. Für die Konstruktion der Erdungs- und Impulselektrode wurde ein handelsüblicher Stahl S355 verwendet. Für das Material und die Herstellung der Elektroden sind Kosten in Höhe von rund 500 Euro anzusetzen.

Für die Montage und Verkabelung der einzelnen Komponenten wurden Bleche und Kleinteile im Wert von circa 120 Euro, Kunststoffe im Wert von circa 500 Euro und Kupferlackdrahte in Höhe von circa 50 Euro benötigt. Die Gesamtkosten an Material für das im Rahmen des Forschungsprojektes eingesetzte EIV-Gerät belaufen sich demzufolge auf rund 6.500 Euro. Darüber hinaus sind für die Montage der einzelnen Komponenten sowie die elektrotechnische Überprüfung des Gerätes Personalkosten einzuplanen.

Im Rahmen einer industriellen Fertigung von handgeführten EIV-Geräten und EIV-Anbaugeräten können die Material- und Personalkosten durch eine industrielle Fertigung stark reduziert werden. Die Anschaffungskosten für ein EIV-Gerät sind damit zumindest bei handgeführten Geräten vergleichbar zu anderen Abbruchgeräten.

## 8.3 Energiekosten EIV-Gerät

Der Marx-Generator benötigt für den Betrieb eine ausreichende Versorgung mit Strom. Wie auch bei der Ermittlung der Rückbauleistungen wurde auf Grundlage der Laborversuche eine Hochrechnung zur Bestimmung des tatsächlichen Energiebedarfes des EIV durchgeführt. In den Laborversuchen wurde deutlich, dass sich mit 5 Impulsen  $4,13 \text{ cm}^3$  eines Kalksandstein-Probekörpers (siehe Abbildung 19) und  $3,77 \text{ cm}^3$  eines Beton-Probekörpers (siehe Tabelle 26) lösen lassen. Die spezifische Energie für die Löseleistung beträgt für den Kalksandstein-Probekörper  $120 \text{ J/cm}^3$  und für den Beton-Probekörper  $272 \text{ J/cm}^3$ . Diese Daten bilden die Basis für die Hochrechnung der benötigten spezifischen Energie für eine Frequenz von 10 Hz und 25 Hz des EIV. In Tabelle 42 wird die Hochrechnung für den Rückbau von Kalksandstein und in Tabelle 43 für den Rückbau von Beton dargelegt.

Tabelle 42: Hochrechnung Energie EIV beim Lösen von Kalksandstein

Frequenz EIV		Dauer für 5 Impulse [s]		Löseleistung [cm <sup>3</sup> pro Minute]	spezifische Energie [J pro Minute]	kWh/ min		Löseleistung [m <sup>3</sup> /h]	spezifische Energie [J pro Stunde]	kWh
10 Hz	→	0,5	→	495	59.400	0,02	→	0,030	3.564.000	0,99
25 Hz	→	0,2	→	1.238	148.500	0,04	→	0,074	8.910.000	2,48

Tabelle 43: Hochrechnung Energie EIV beim Lösen von Beton

Frequenz EIV		Dauer für 5 Impulse [s]		Löseleistung [cm <sup>3</sup> pro Minute]	spezifische Energie [J pro Minute]	kWh/ min		Löseleistung [m <sup>3</sup> /h]	spezifische Energie [J pro Stunde]	kWh
10 Hz	→	0,5	→	452	122.902	0,03	→	0,027	7.374.120	2,05
25 Hz	→	0,2	→	1.131	307.255	0,09	→	0,068	18.435.300	5,12

Durch eine höhere Frequenz des EIV wird eine höhere spezifische Energie benötigt. Wie bereits durch die Eingangsparameter der Hochrechnung ersichtlich, wird eine höhere spezifische Energie für den Rückbau von Beton benötigt als beim Rückbau von Kalksandstein. Die spezifische Energie wird in einem weiteren Schritt monetär bewertet. Der Preis für eine Kilowattstunde Strom liegt bei rund 30 Cent. In Tabelle 44 werden die Kosten für eine Betriebsstunde des EIV unter Berücksichtigung der Frequenz zusammengefasst.

Tabelle 44: Energiekosten pro Betriebsstunde des EIV

Abbruchverfahren	[kWh]	[€/h]
EIV 10 Hz Beton	2,05	0,61
EIV 25 Hz Beton	5,12	1,54
EIV 10 Hz Kalksandstein	0,99	0,30
EIV 25 Hz Kalksandstein	2,48	0,74

Ein handgeführter Abbruchhammer, welcher elektrisch betrieben wird, benötigt bei ständigem Einsatz 2,4 kWh pro Betriebsstunde und verursacht damit Energiekosten in Höhe von 0,72 €. Elektrische Kernbohrgeräte, Bohrhämmer und Sägen arbeiten mit einer ähnlich oder teilweise höheren Aufnahmeleistung. Elektrische Diamant-Kettensägen arbeiten beispielsweise mit einer Aufnahmeleistung von 3.200 W.

Im Vergleich zu den handgeführten Abbruchverfahren zeigt das EIV hinsichtlich der Energiekosten Potenzial, da die Unterschiede relativ gering ausfallen. Darüber hinaus ist es durch eine weitere Optimierung des EIV gegebenenfalls möglich, die spezifische Energie für den Rückbau der Baustoffe zu verringern und dadurch die Energiekosten zu senken.

Die Betriebskosten eines EIV-Anbaugerätes für ein Trägergerät hängen von der Anzahl der eingesetzten Marx-Generatoren ab. Die Hochrechnung des EIV-Anbaugerätes basiert auf der Verwendung von zwei Marx-Generatoren, wodurch die Betriebskosten doppelt so hoch ausfallen wie zuvor erläutert. Außerdem besteht die Möglichkeit, das EIV-Anbaugerät über den Motor des Trägergerätes mit Energie zu versorgen. Es ist davon auszugehen, dass die für den Betrieb des EIV-Anbaugerätes benötigte Energie in etwa der Energie entspricht, welche über das hydraulische System des Trägergerätes für den Betrieb der gängigen Anbaugeräte benötigt wird.

## 8.4 Zusammenfassung der Potenziale beim Rückbau mit EIV

Durch den Vergleich der Rückbauleistung gängiger Abbruch- und Trennverfahren mit dem EIV konnten die Potenziale des EIV im Hinblick auf die Rückbauleistung und damit auch auf Einsatzgebiete eines EIV verdeutlicht werden.

Im Vergleich zu den Abbruchleistungen etablierter handgeführter Geräte und Anbaugeräten für Trägergeräte kann mit dem EIV nur eine geringere Abbruchleistung erreicht werden. Es ist jedoch zu erkennen, dass mit steigender Festigkeit des zurückzubauenden Materials die Differenz der Abbruchleistung geringer wird. Die Energiekosten für eine kontinuierliche Abbruchleistung sind im Vergleich zu den Abbruchverfahren ähnlich hoch.

Während das EIV im Vergleich zu den Abbruchverfahren nur eine geringere Rückbauleistung erreicht, zeigt die Gegenüberstellung der Trennverfahren mit dem EIV, dass die Schnitt- bzw. Bohrleistung teilweise sogar deutlich übertroffen werden kann.

Insgesamt konnte anhand der vergleichenden Betrachtung der Rückbauleistung des EIV mit den gängigen Abbruch- und Trennverfahren das Potential des EIV für den Rückbau verdeutlicht werden. Größere Potenziale für eine Adaption des EIV im Bauwesen sind bei der Trennung und dem Schlitzen von Bauteilen aus mineralischen Baustoffen zu sehen.

Die vergleichende Betrachtung der Rückbauleistung basiert auf der Hochrechnung der im Labor durchgeführten Versuche. Im Rahmen von weiterführenden Versuchen muss untersucht werden, ob die Rückbauleistungen basierend auf den Hochrechnungen in der Praxis realisiert werden können. Im Rahmen weiterer Versuche ist ebenfalls der Energieverbrauch beim Einsatz auf einer Baumaßnahme zu ermitteln. In weiterführenden Versuchen muss untersucht werden, welchen konkreten Einfluss die Bewehrung auf die Abbruchleistung des EIV hat. Die Gerätetechnik muss für den Rückbau von Stahlbeton angepasst werden, um eine möglichst hohe Abbruchleistung zu erreichen. Bei den Ergebnissen aus den Laborversuchen muss berücksichtigt werden, dass lediglich ein Elektrodenpaar punktuell aufgesetzt wurde. Durch eine veränderte Elektrodengeometrie, welche sich flächig auf das zurückzubauende Material aufsetzen lässt, und eine Erhöhung der Anzahl an Elektroden kann eine höhere Abbruchleistung erreicht werden.

## 9 Arbeitsphysiologie und Arbeitssicherheit beim Einsatz des EIV

Die gängigen Abbruch- und Trennverfahren wurden in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt und mit dem EIV verglichen. Dabei wurden bereits die gängigen Emissionen, Immissionen sowie die Arbeitssicherheit und der Gesundheitsschutz der Beschäftigten (Bedienpersonal und Dritte) hinsichtlich der nachfolgenden Aspekte ausführlicher behandelt:

- Staub (z. B. Quarzstäube u. a. enthalten in Sandstein, Granit, Terrazzo, Beton),
- Lärm (ausgehend von Maschinen, Fahrzeugen, Anbaugeräten),
- Ganzkörperschwingungen (beim Arbeiten auf Baumaschinen und Fahrzeugen) und
- Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems (beim Arbeiten mit handgeführten Maschinen oder Geräten).

In diesem Kapitel wird auf die Charakterisierung von Arbeitsphysiologie und Arbeitssicherheit beim Einsatz des EIV im Hinblick auf Arbeiten im dabei vorhandenen Hochspannungsumfeld vertiefend eingegangen. Die Gefahren durch elektrischen Strom müssen auf der Baustelle besonders berücksichtigt werden, da der Strom nicht zu hören, zu riechen oder zu sehen ist – körperlicher Kontakt zu spannungsführenden Teilen aber hohe Verletzungsrisiken mit sich bringt. Die regulatorischen Rahmenbedingungen definieren die Einsatzmöglichkeiten des EIV auf der Baustelle und definieren weiterhin die Anforderungen an die maschinentechnische Konzeption hand- und maschinengeführter EIV-Geräte.

Bei Arbeiten im Hochspannungsumfeld ist die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und die elektromagnetische Umweltverträglichkeit (EMVU) von großer Bedeutung und wurde daher im Rahmen des Forschungsprojektes vertieft untersucht und bewertet. Die Ergebnisse der Messungen werden in diesem Kapitel zusammengefasst. Weiterhin wurde untersucht, welche arbeitsphysiologische Tragweite die Adaption des EIV auf die Belange des Rückbaus auf einer Baustelle mit sich bringt. Wesentliche Frage war dabei, ob das Bedienpersonal neuen störenden Einflüssen ausgesetzt wird, welche es bei der Konzeption des Gerätes zu berücksichtigen gilt.

### 9.1 Regulatorische Rahmenbedingungen (Arbeiten im Hochspannungsumfeld)

Neben den allgemeinen regulatorischen Rahmenbedingungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes sind bei Arbeiten im Umfeld von Spannungen und insbesondere Hochspannungen gesonderte Richtlinien ergänzend zu berücksichtigen. Die wichtigsten Richtlinien sind:

- DIN EN 60204-1 VDE 0113-1: 2019-06 Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen,
- Richtlinie 2014/35/EU,
- DIN VDE 0100: Daten und Fakten für das Errichten von Niederspannungsanlagen.

Weiterhin muss bezüglich der EMV das Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG) und für die EMVU die Regelungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) berücksichtigt werden. Das EMVG formuliert im Bereich der EMV [EMVG, S. 1 f.]:

- Geltungsbereiche, Produkte,
- Schutzanforderungen,
- Sicherstellung der Einhaltung der Schutzanforderungen in Eigenverantwortung des Herstellers bzw. des Inverkehrbringers der angesprochenen Produkte,
- Konformitätsnachweis, CE-Kennzeichnung,
- Beteiligung von benannten Stellen und
- Marktbeobachtung zur Einhaltung der Richtlinienkonformität.

Bei der Entwicklung eines handgeführten EIV oder eines EIV-Anbaugerätes müssen die Forderungen des EMVG sowie der EMFV (Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder – Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern) eingehalten werden. Nur wenn die Forderungen erfüllt werden und das Produkt eine entsprechende Kennzeichnung und Konformität nachweisen kann, kann das Gerät auf einer Baustelle eingesetzt werden. Außerdem müssen die Bestimmungen des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e. V. (VDE) für das Herstellen, Errichten und Betreiben elektrischer Anlagen und Betriebsmittel berücksichtigt werden. Nachfolgend werden einige VDE-Bestimmungen genannt, welche bei der Entwicklung eines handgeführten EIV-Gerätes sowie eines EIV-Anbaugerätes einzuhalten sind:

- VDE 0105 „Betrieb von elektrischen Anlagen“,
- VDE 0113 „Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen“,
- VDE 0140 „Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Forderungen für Anlagen und Betriebsmittel“,
- VDE 0298 „Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen“,
- VDE 0682 „Arbeiten unter Spannung“,
- VDE 0701 – 0702 „Prüfung nach Instandsetzung, Änderung elektrischer Geräte – Wiederholungsprüfung elektrischer Geräte – Allgemeine Anforderungen für die elektrische Sicherheit“ und
- VDE 0839 „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“.

Zentrales Gesetz für die Wahrung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes auf Baustellen ist das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), welches für alle Tätigkeitsbereiche gilt. Die Regelungen des ArbSchG sind allgemein formuliert. Ergänzende Angaben zur Arbeitssicherheit und zum Gesundheitsschutz zu einem möglichen Einsatz des EIV auf Baustellen sind in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV), der Baustellenverordnung (BaustellV), der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und in der Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) zu finden.

Die Gefahren, welche bei einem Einsatz des EIV auf der Baustelle auftreten können, müssen demnach in einer Gefährdungsbeurteilung durch den Arbeitgeber vor Aufnahme der Tätigkeiten aufgeführt werden. Der § 5 ArbSchG fordert eine vollumfängliche Beurteilung der Arbeitsbedingungen und fordert damit eine Gefährdungsbeurteilung nach § 3 der ArbStättV. Ergänzend zu den Regelungen muss der Arbeitgeber vor Aufnahme der Tätigkeiten die Beschäftigten laut § 6 ArbStättV in regelmäßigen Abständen hinsichtlich der Gefahren auf der Baustelle unterweisen.

Die BaustellV ergänzt die ArbStättV bezüglich der Durchsetzung von koordinierten Maßnahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes auf Baustellen. Im Anhang II der BaustellV werden besonders gefährliche Arbeiten aufgeführt, worunter auch die Arbeiten in einem Abstand von 5 m zu freiliegenden Hochspannungsleitungen zu finden sind. Arbeiten mit dem EIV müssen mit hoher Wahrscheinlichkeit diesen gefährlichen Arbeiten zugeordnet werden.

Gemäß der BetrSichV handelt es sich bei einem handgeführten EIV sowie bei einem EIV-Anbaugerät um ein Arbeitsmittel. Diese Einstufung unterstreicht die Notwendigkeit einer Gefährdungsbeurteilung. Darüber hinaus wird in der BetrSichV darauf hingewiesen, dass eine gültige CE-Kennzeichnung des Arbeitsmittels den Auftraggeber nicht von der Pflicht befreit, eine Gefährdungsbeurteilung zu erstellen. Im § 8 BetrSichV wird auf die Schutzmaßnahmen eingegangen, welche bei einer Gefährdung durch Energie, Instandsetzung und Stillsetzen von Arbeitsmitteln zu berücksichtigen sind.

„Der Arbeitgeber darf nur solche Arbeitsmittel verwenden lassen, die gegen Gefährdungen ausgelegt sind durch

1. die von ihnen ausgehende oder verwendete Energie,
2. direktes oder indirektes Berühren von Teilen, die unter elektrischer Spannung stehen, oder
3. Störungen ihrer Energieversorgung.

Die Arbeitsmittel müssen ferner so gestaltet sein, dass eine gefährliche elektrostatische Aufladung vermieden oder begrenzt wird. Ist dies nicht möglich, müssen sie mit Einrichtungen zum Ableiten solcher Aufladungen ausgestattet sein.“ [§ 8 Abs.1 ArbSichV]

Die Regeln der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV-Regeln) sind bei einer Einbindung des EIV in die Baustellenumgebung zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Hochspannung sind insbesondere die DGUV-Regeln 103-011 (2006) „Arbeiten unter Spannungen an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln“ und 103-013 (2006) „Elektromagnetische Felder“ einzuhalten. Weiterhin ist zwingend zu beachten, dass der Zustand des elektrischen Betriebsmittels, die erste Inbetriebnahme und die Änderung bzw. Instandsetzung gemäß § 5 Abs. 1 DGUV Vorschrift 3 durch eine Elektrofachkraft erfolgt.

## 9.2 Sicherheit und Gesundheitsschutz

Die Sicherheit und der Gesundheitsschutz spielen bei Rückbaumaßnahmen eine essentielle Rolle. Im Baugewerbe gehören die Abbruch- und Rückbauarbeiten zu den gefährlichsten Tätigkeitsbereichen. Der direkte Vergleich zum übrigen Baugewerbe zeigt, dass das Risiko, bei Rückbau- oder Abbrucharbeiten einem tödlichen Arbeitsunfall zum Opfer zu fallen, circa 15-mal höher ist als in den übrigen Tätigkeitsbereichen des Baugewerbes [BAUA2020, S. 3]. Aufgrund des hohen Risikos wird stetig versucht, die Arbeitsbedingungen und die Arbeitsverfahren im Rückbau und Abbruch von Bauwerken dahingehend zu verbessern, dass ein höheres Maß an Sicherheit und damit einhergehend auch ein höherer Gesundheitsschutz sichergestellt werden kann. Auf die Anforderungen an die Umwelt ist in einem vorangegangenen Abschnitt bereits eingegangen worden. Es konnte festgestellt werden, dass das EIV im Vergleich zu den gängigen Abbruch- und Trennverfahren keine negativen Emissionen und Immissionen mit sich bringt. An dieser Stelle wird das Themenfeld elektrischer Strom- und Hochspannungsimpulse als eine Besonderheit des EIV vertiefend betrachtet.

Es gibt verschiedene erlaubte Schutzmaßnahmen, um das Bedienpersonal sowie Dritte vor einem elektrischen Schlag zu schützen. Unterschieden wird in Basisschutzvorkehrungen, die einen Schutz gegen direktes Berühren sicherstellen, und Fehlerschutzvorkehrungen, die einen Schutz gegen indirektes Berühren wahren. Die Schutzmaßnahmen können entweder aus einer Kombination von zwei unabhängigen Schutzvorkehrungen, also jeweils einer für den Basis- und Fehlerschutz, bestehen, oder sie vereint Basis- und Fehlerschutz in einer einzelnen verstärkten Schutzvorkehrung. In Abbildung 64 werden die Zusammenhänge zwischen den erlaubten Schutzmaßnahmen verdeutlicht.

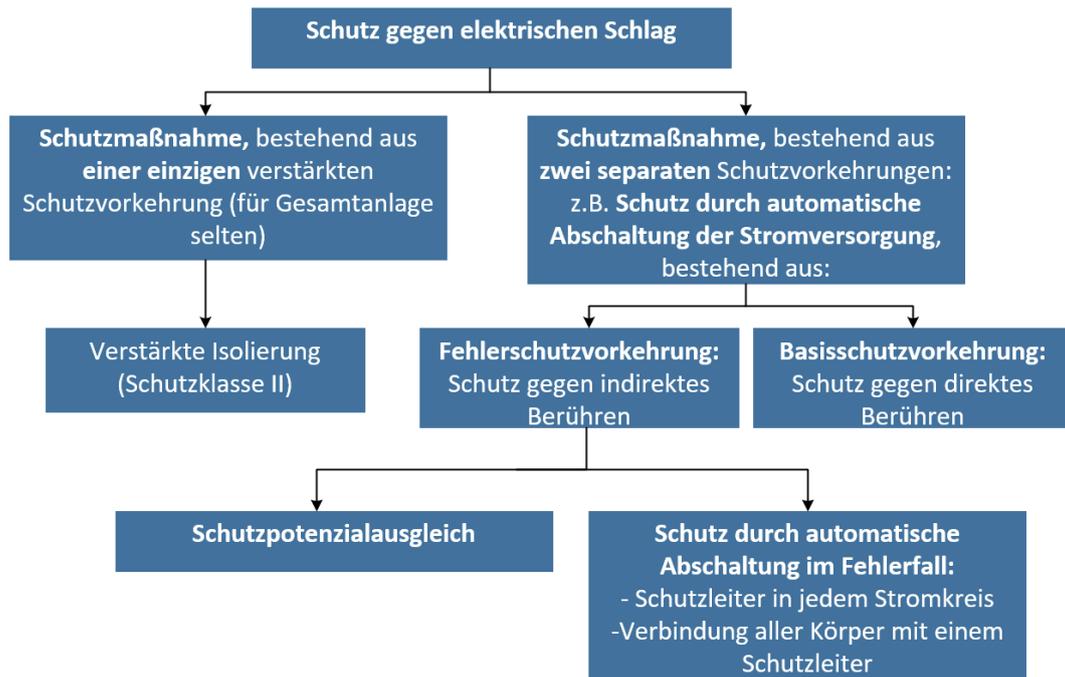


Abbildung 64: Maßnahmen nach DIN VDE 0100-410 [KRE2012, S. 40 f.]

Die Basisschutzvorkehrung umfasst die Auswahl von geeigneten elektrischen Betriebsmitteln und deren korrekte Montage. Der Basisschutz muss vom Hersteller des Gerätes erfüllt sowie nachgewiesen werden. Der Hersteller muss mindestens in einer Montageanleitung darstellen, in welcher Form bei der Errichtung der Basisschutz sichergestellt werden kann. Zur Wahrung des Basisschutzes und der Anforderungen der DIN VDE 0100 ist es denkbar, die nachfolgenden Schutzvorkehrungen (vgl. Tabelle 45) zu realisieren.

Tabelle 45: Technische Schutzvorkehrungen gemäß DIN VDE 0100

Schutz	Mögliche Schutzvorkehrungen am / im Gerät
elektrischer Schlag gemäß DIN VDE 0100-410 (2007)	Schutz vor Eindringen von Fremdkörpern → Gitter mit Öffnungen <math>d = 12,5\text{ mm}</math>
hohe thermische Belastung gemäß DIN VDE 0100-420 (2016)	Motorstarter, Fliehkraftschalter, Rutschkupplung, Temperaturfühler in der Wicklung, Differential-Schutz, Überstrom-Schutzeinrichtung
Kabel und Leitung bei Überstrom gemäß DIN VDE 0100-430 (2010)	Hochspannungskabel mit ausreichend Isolierung, fein bzw. feinst drahtige Anschlussleitungen
Überspannung, elektromagnetische Einflüsse gemäß DIN VDE 0100-444 (2010)	Potenzialausgleichsleiter oder Schutzleiter, Entkopplung durch Abstand, Trennung oder Schirmung
Unterspannung gemäß DIN VDE 0100-450 (1990)	Unterspannungsauslöser / Unterspannungsmodul
Trennen und Schalten gemäß DIN VDE 0100-460 (2018)	Separater Stromkreis für jedes aktive Teil, Schalter für jeden Stromkreis, Warnhinweis, Verschleißeinrichtung, Mittel zum Entladen der Kondensatoren
Brandschutz gemäß DIN VDE 0100-482	Richtig bemessene und einwandfreie Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag und Überhitzung der Kabel und Leitungen, Fehlerstromschutzeinrichtungen (RCDs), Brandschutzschalter (AFDD)

Unter dem Begriff der Fehlerschutzvorkehrungen sind sämtliche Vorkehrungen zu verstehen, welche beim Versagen des Basisschutzes Personen schützen, sofern diese bei einem Isolationsfehler oder ähnlichem mit einem leitfähigen Körper des elektrischen Betriebsmittels in Kontakt treten. Nachfolgend werden einige Fehlerschutzvorkehrungen aufgeführt, welche bei der Adaption des EIV auf einer Baustelle zwingend vorzusehen sind:

- Erdung des elektrischen Gerätes (über Trägergerät),
- Einbau Fehlerstromschutzschalter (Schutzeinrichtung),
- Schutzisolierung (verstärkte doppelte Isolierung zwischen Netzstrom und Ausgangsstrom),
- Schutztrennung (Trennung eines Verbrauchsmittels).

Ergänzend zu den technischen Schutzvorkehrungen, welche vom Hersteller des Gerätes einzuhalten sind, werden von dem Unternehmer, der das Gerät auf der Baustelle einsetzt, organisatorische Schutzmaßnahmen gefordert, um die Arbeitssicherheit und den Gesundheitsschutz für das Bedienpersonal sowie Dritte sicherzustellen. Im Abschnitt drei der DGUV-Regel 103-011 „Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen und Betriebsmittel“ werden Maßnahmen zur Verhütung von Gefahren für Leben und Gesundheit der Arbeiter erläutert. Allgemein sind die vom Unternehmer ausgewählten Verfahren in einer Gefährdungsbeurteilung mit den erforderlichen Schutzmaßnahmen aufzuführen. Unter organisatorischen Schutzmaßnahmen sind die Anordnung eines Sicherheitsabstandes gemäß DIN VDE 0105-100 (2015) und die Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung entsprechend Richtlinie 92/58/EWG (2014) zu verstehen.

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die elektromagnetische Verträglichkeit und die elektromagnetische Umweltverträglichkeit im Baustellenbetrieb und damit einhergehenden Sicherheitsabständen beim Einsatz des EIV näher eingegangen.

Eine Kennzeichnung entsprechend Richtlinie 92/58/EWG muss erfolgen, wenn Risiken oder Gefahren, trotz Maßnahmen wie beispielweise technische Schutzmaßnahmen oder arbeitsorganisatorische Maßnahmen, noch immer bestehen. Auf der Baustelle müssen beim Einsatz des EIV die Kennzeichnungen „Verbot für Personen mit Herzschrittmachern oder implantierten Defibrillatoren“ (Abbildung 65) und „Warnung vor elektrischer Spannung“ (Abbildung 66) angebracht werden.



Abbildung 65: Kennzeichen „Verbot für Personen mit Herzschrittmacher“



Abbildung 66: Kennzeichen „Warnung vor elektrischer Spannung“

In unmittelbarer Nähe des EIV muss auf dem Gehäuse, in welchem die Einrichtungen mit Hochspannung untergebracht sind, ein Warnschild „Hochspannung“ befestigt werden (Abbildung 67). Auf dem Gehäuse, welche die Kondensatoren beinhalten, ist der Hinweis auf Restspannung (Abbildung 68) ergänzend vorzusehen. Die unmittelbare Kennzeichnung auf dem EIV muss durch den Hersteller erfolgen und auf der Baustelle muss der Unternehmer die Kennzeichnung auf Vollständigkeit und Richtigkeit als seine Grundpflicht überprüfen. In der Öffnungsklappe des EIV-Gehäuses ist ein Erdungstrenner zu integrieren. Durch den Erdungstrenner wird sichergestellt, dass keine Hochspannung anliegt und damit sofort ein sicherer Zustand hergestellt wird.



Abbildung 67: Kennzeichen „Warn-Kombischild Hochspannung Lebensgefahr“



Abbildung 68: Kennzeichen „Warnschild Vorsicht Restspannung! Entladezeit länger als 5 s“

Die Verwendung von persönlicher Schutzausrüstung ist nur notwendig, wenn technische und organisatorische Schutzmaßnahmen nicht ausreichen, um eine Gefahr für Bediener und Dritte auszuschließen. Der Einsatz des EIV auf einer Baustelle erfordert nicht zwingend eine Verwendung von persönlicher Schutzausrüstung, jedoch sollte diese vorbeugend vom Bedienpersonal bei Arbeiten am EIV getragen werden.

Die Anordnung der nachfolgenden persönlichen Schutzausrüstung ist im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich des Einsatzes des EIV denkbar und liegt im Ermessen des Arbeitgebers:

- isolierende Schutzhandschuhe,
- isolierende Schuhe,
- isoliertes Werkzeug,
- Standortisolierung.

Das Bedienpersonal eines handgeführten EIV-Gerätes sowie eines EIV-Anbaugerätes sollte stets einen Mindestabstand zu den Elektroden und der Frequenzsteuerung von 1,00 m einhalten. Der Abstand kann durch eine konstruktive Lösung am Gerät sichergestellt werden.

### 9.3 Analyse elektromagnetische (Umwelt-)Verträglichkeit im Baustellenbetrieb (EMV/EMVU)

Alle elektrischen Komponenten eines handgeführten EIV bzw. eines EIV-Anbaugerätes für einen Minibagger oder Abbruchroboter müssen durch den Hersteller EMV-geprüft sein. Eine entsprechende Bescheinigung muss für jede elektrische Komponente vorliegen. Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Messungen der EMV und EMVU haben ergeben, dass im direkten Nahfeld (Abstand von 1 m) zur Impulselektrode für den Menschen die elektrischen und magnetischen Felder unkritisch sind.

Zur Messung wurden sowohl das Gerät Wavecontrol SMP2 als auch das Wavecontrol „WaveMon“ eingesetzt. Das Wavecontrol SMP2 eignet sich weniger für Messungen des ns-Bereiches, in welchem beim EIV die Impulse generiert werden, wohingegen das Wavecontrol „WaveMon“ Störfelder im ns-Bereich erfassen kann und somit eine gute Übersicht im Nahbereich liefert. Mit dem Wavecontrol SMP2 werden vorwiegend niederfrequente Störfelder im Bereich von 1 Hz bis 400 kHz erfasst. Es muss jedoch beachtet werden, dass mit dem Wavecontrol „WaveMon“ keine Messergebnisse erfasst werden konnten, wenn das Gerät außerhalb des Nahbereiches positioniert war. Mit dem Wavecontrol „WaveMon“ werden keine Messergebnisse erfasst, sondern mittels einer LED-Anzeige die Einhaltung der EMF-Richtlinien in Prozent (10, 25, 50, 75, 100, 200 %) angezeigt. Die Messungen mit dem Wavecontrol „WaveMon“ wurden in einem Abstand von bis zu einem Meter durchgeführt und die Messungen mit dem Wavecontrol SMP2 in einem Abstand von bis zu vier Metern. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Felder bei einem Abstand von vier Metern deutlich abfallen. Im Nahfeld konnte, wie bereits erläutert, kein störender Einfluss auf den Menschen gemessen werden. Im Bereich der Netzeinspeisung und Frequenzumrichter sind Störfelder im Bereich 50 Hz mit Oberwelle sowie die Taktfrequenz der Frequenzumrichter zu erwarten, weshalb auch in diesem Bereich der Sicherheitsabstand von einem Meter eingehalten werden sollte.

Ergänzend zu den Wavecontrol-Geräten wurde eine Magnetspule eingesetzt, um die magnetischen Felder zu untersuchen. Die Ausrichtung der Magnetfeldspule wurde im Rahmen der Versuche verändert, damit die Ausbreitung des Magnetfeldes im Raum deutlich wird. Infolge der Impulsform im ns-Bereich können die elektrischen und magnetischen Felder empfindliche Elektronik wie beispielsweise aktive Implantate wie Herzschrittmacher, implantierte Defibrillatoren, Insulinpumpen, Schmerzmittelpumpen oder auch empfindliche Sicherheitstechnik stark stören. Daher ist es sinnvoll, einen Mindestabstand von 10 Metern zum EIV einzuhalten, wenn empfindliche Elektronik auf der Baustelle verwendet bzw. von bestimmten Personengruppen getragen wird.

Das EIV erfordert einen abgedichteten Prozessraum. Durch entsprechende Materialien ist es möglich, die Ausbreitung der elektrischen und magnetischen Felder bei der Entladung des EIV bis zu einem gewissen Rahmen zu begrenzen. Im Rahmen des Forschungsprojektes war es nicht möglich, unterschiedliche Materialien und deren Einfluss auf die Eingrenzung der elektrischen und magnetischen Felder zu untersuchen. In diesem Bereich gibt es weiteren Forschungsbedarf.

Beim Einsatz des EIV auf einer Baustelle muss sichergestellt werden, dass im unmittelbaren Nahfeld Warnhinweise aufgestellt werden. Beim Aufbau eines handgeführten EIV und beim Anschluss eines

maschinengeführten EIV an ein Trägergerät muss darüber hinaus sichergestellt werden, dass die Installation und der Aufbau unter Einhaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der EMV erfolgen. Dies kann durch eine Elektrofachkraft gewährleistet werden. Das Bedienpersonal muss in regelmäßigen Abständen bezüglich der elektrischen Sicherheit geschult werden.

#### 9.4 Arbeitsphysiologische Tragweite

Die arbeitsphysiologische Tragweite einer Adaption des EIV in eine Baustellenumgebung kann als gering angesehen werden. Die Bedienung der Geräte soll sich an der Bedienung von Geräten gängiger Abbruch- und Trennverfahren orientieren, um die arbeitsphysiologischen Auswirkungen möglichst gering zu halten.

Ein EIV-Anbaugerät muss mit einer Schnellwechseleinrichtung ausgestattet werden, damit andere Anbaugeräte bei Bedarf schnell angebracht werden können. Trotz einer Schnellwechseleinrichtung müssen die Anschlüsse für das Dielektrikum (Wasser) und die Energieversorgung (Strom) händisch angeschlossen werden. Beim Wasseranschluss kann auf gängige Systeme wie beispielsweise eine Schlauchkupplung zurückgegriffen werden. Der Stromanschluss sollte durch eine simple Steckverbindung, welche bei vollständigem Kontakt arretiert, sichergestellt werden. Es darf keine Möglichkeit bestehen, die Steckverbindung zu lösen, wenn das Gerät im Betrieb ist. Es ist nicht erforderlich, dass die Bedienelemente des Trägergerätes bzw. die auf dem Bedienmodul der Abbruchmaschine befindliche Steuerung ergänzt werden. Die zur Verfügung stehenden Schaltmodule auf dem Joystick eines Minibaggers oder dem Bedienmodul einer Abbruchmaschine, welche unter anderem zur Bedienung von Abbruchhammer und Abbruchzange verwendet werden, können zur Bedienung des EIV-Anbaugerätes genutzt werden. Durch diese Adaption ist es möglich, das EIV ohne große Umbauarbeiten am Trägergerät bzw. der Abbruchmaschine einzusetzen. Für die Steuerung des EIV sind verschiedene Lösungen denkbar. Zum einen ist es denkbar, dass mittels Schalterdruck zunächst Wasser in den Prozessraum fließt und nach einem zeitlichen Abstand von einigen Sekunden (2 bis 5 Sekunden) die Impulse beginnen. Bei einer erneuten Betätigung des Schalters werden unmittelbar die Impulse sowie die Wasserzufuhr unterbrochen. Eine weitere Überlegung ist, die Steuerung für die Impulse von jenen der Wasserversorgung zu entkoppeln. Demzufolge würde ein Schalter die Wasserzufuhr steuern und ein weiterer Schalter die Impulse. Welche der genannten Steuerungsmöglichkeiten in der Praxis die besten Ergebnisse liefert, muss im Rahmen weiterer Forschung untersucht werden.

## 10 Zusammenfassung

Der Forschungsbericht beinhaltet anfangs eine Einführung in das Elektro-Impuls-Verfahren – EIV (Kapitel 2). Dabei wurde auf die Funktionsweise des EIV, aktuelle Einsatzszenarien sowie den aktuellen Stand der EIV-Technologie unter Bezugnahme konkreter Forschungsprojekte eingegangen. Weiterführend wurden unterschiedliche Möglichkeiten beschrieben, wie mittels elektrischer Impulse Material gelöst werden kann und die beiden Verfahren elektrohydraulisches EIV und elektrodynamisches EIV abgegrenzt.

Anschließend wurde auf die Relevanz des selektiven Rückbaus eingegangen (Kapitel 3). Durch die Forderungen des Gesetzgebers, insbesondere durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz, ist festgelegt, dass der Auftraggeber / Bauherr und damit auch die ausführenden Unternehmen dazu angehalten sind, Baumaterialien bei Rückbaumaßnahmen gezielt und voneinander getrennt zu gewinnen und einer Wiederverwendung zuzuführen. Es wurde in diesem Kontext herausgearbeitet, welche Anforderungen an das zurückgebaute Baumaterial gestellt werden. Die einzelnen Schritte der Materialaufbereitung sind aufwändig und kostenintensiv. Indem die Baustoffe auf der Baustelle voneinander getrennt und die Anforderungen der Normen hinsichtlich Granulometrie durch die Rückbautechnologie beachtet werden, kann der Aufwand für die Materialaufbereitung gesenkt werden. Zusätzlich kann dadurch frühzeitig eine hohe Qualität der Recycling-Baustoffe sichergestellt werden.

Ergänzend zu den Forderungen an eine Wiederverwendung von Baustoffen müssen bei Abbruch- und Rückbauarbeiten in sensiblen Bereichen darüber hinaus noch die Belange weiterer Akteure beachtet werden, beispielsweise von Nachbarn, Nutzern, Verkehrsteilnehmern und Baustellenpersonal (Kapitel 4). Die geltenden Anforderungen und die Gefahren, welche durch diese Arbeiten infolge von Staub, Splitter und Trümmer, Feuchtigkeit, Lärm und Erschütterungen auf die Umwelt einwirken können, wurden dahingehend benannt und weiterführend beschrieben.

Zur Einordnung der neuen Rückbautechnologie EIV wurden die auf dem Markt etablierten Rückbautechnologien analysiert und bewertet (Kapitel 5). Die Analyse der vorhandenen Rückbautechnologien dient als Grundlage für die vergleichende Betrachtung mit dem EIV. Die im Rahmen der experimentellen Untersuchung zum EIV erzielten Ergebnisse lassen sich durch diese Analyse einordnen und damit die Potenziale des EIV herausarbeiten.

Das EIV wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt weiterentwickelt (Kapitel 6). Dabei konnten die wesentlichen Grundlagen für eine Adaption des EIV als Rückbautechnologie für das Bauwesen untersucht werden. Anhand sehr umfangreicher Versuche an Kalksandstein-Probekörpern konnten die Auswirkungen von Elektrodenabstand, Impulsanzahl, Impulsenergie und Elektrodengeometrie auf Art und Form des gelösten Materials bestimmt werden. Durch eine erste Versuchsreihe wurde gezeigt, dass die Löseleistung im Rahmen des verwendeten Versuchsaufbaus unabhängig von der Elektrodengeometrie bis zu einem Elektrodenabstand von 25 mm zunimmt. Bei einem größeren Elektrodenabstand kann nicht mehr sichergestellt werden, dass das Material erfolgreich abgetragen werden kann. Demzufolge sollte der Elektrodenabstand unter Berücksichtigung der benötigten spezifischen Energie zwischen 15 mm und 25 mm liegen.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Auswirkungen der Anzahl der Impulse auf die Menge des gelösten Materials untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass bis zu einer Anzahl von 5 Impulsen das Lösevolumen erhöht werden konnte. Eine höhere Impulsanzahl führt zu einer Steigerung der spezifischen Energie, ohne das Lösevolumen zu erhöhen. Die Elektroden wurden während der Versuche an ihrer Position auf dem Probekörper fixiert. Die optimale Impulsanzahl wurde daraufhin für die weiteren Versuche festgelegt auf 5 Stück. Hinsichtlich der Impulsenergie konnte festgestellt werden, dass das gelöste Volumen und die Impulsenergie in einem konstanten Verhältnis zueinanderstehen und dass durch die Reduzierung der Impulsenergie das gelöste Volumen abnimmt. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Durchschlag durch eine Reduzierung der Impulsenergie abnimmt. Im Ergebnis der Untersuchung wird eine Impulsenergie in Höhe von mindestens 80 Joule empfohlen.

Darüber hinaus wurde in den Experimenten untersucht, ob das Spülen des Abtragbereiches einen positiven Effekt auf die Löseleistung hat und ob die Verschmutzung des Wassers als Dielektrikum die Löseleistung negativ beeinflusst. Die Löseleistung des EIV wird weder durch das Spülen des Abtragbereiches, noch durch eine Verschmutzung des Wassers in besonderem Maße beeinflusst. Es ist dennoch sinnvoll, das gelöste Material aus dem Prozessraum zu entfernen. Es besteht die Möglichkeit, dass Impulse durch das bereits gelöste Material verlaufen und die Effizienz des Verfahrens sinkt.

Für einen kontinuierlichen Einsatz des EIV spielt die Impulswiederholrate eine entscheidende Rolle. Durch die Erhöhung der Impulswiederholrate wird die spezifische Energie nicht beeinflusst. Jedoch kann durch eine Erhöhung das gelöste Volumen pro Zeiteinheit gesteigert werden. Für die Auswertung wurde eine Impulswiederholrate von 25 Hz angenommen. Durch diese sehr schnelle Impulsfolge wurden die elektrischen Komponenten der Schaltung des Versuchsaufbaus jedoch stark erhitzt. Eine weitere Erhöhung ist technisch möglich, im Rahmen der Versuchsanlage an der TU Dresden jedoch nur durch eine Anpassung der Schaltung zu erreichen.

Nach den Grundlagenversuchen an Kalksandstein-Probekörpern wurden vergleichende Versuche an Beton-Probekörpern unterschiedlicher Korngrößenverteilung durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Löseleistung des EIV bei Beton-Probekörpern geringer ausfällt und demzufolge auch eine höhere spezifische Energie benötigt wird. Die höchste Löseleistung konnte an einem Beton-Probekörper mit einer feinen Zuschlagskörnung erreicht werden.

An Beton-Probekörpern konnte auch festgestellt werden, dass sich die in einem Stahlbeton befindliche Bewehrung sowie Abstandhalter aus Kunststoff ohne Beschädigung herauslösen lassen. Die Selektivität des EIV ist dadurch im Vergleich zu den gängigen Abbruch- und Trennverfahren höher zu bewerten.

Nach Abschluss der punktuell durchgeführten Versuche wurde die gesamte EIV-Anlage aufwändig umgebaut. Ziel des Umbaus war die Umsetzung von nichtstationären, also ortveränderlichen Löseprozessen. Die Ergebnisse der punktuellen Versuche konnten als Grundlage für flächige, nichtstationäre Versuche an Beton-Probekörper herangezogen werden. Durch den veränderten Versuchsstand war es möglich, eine kontinuierliche Löseleistung in vertikaler Richtung mit dem EIV auf einem Beton-Probekörper zu realisieren. Bei der Auswertung der Versuche konnte gezeigt werden, dass ein Schlitz mit gleichmäßiger Tiefe und Breite hergestellt werden kann. Eine (Vor-)Schädigung angrenzender Bereiche in unmittelbarer Nähe des Schlitzes konnten an den Beton-Probekörpern nicht festgestellt werden.

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen für Rückbauarbeiten in sensiblen Bereichen eine konzeptionelle Empfehlung für das EIV-Gerät und deren einzelnen Komponenten entwickelt (Kapitel 7). Nach den allgemeinen Empfehlungen für ein EIV-Gerät konnte die Konzeption für ein handgeführtes EIV-Gerät und ein EIV-Anbaugerät an ein Trägergerät konkretisiert werden. Die für das EIV entscheidenden Komponenten Dielektrikum, Prozessraumabdichtung, Wasseraufbereitung und Elektrodengeometrie wurden für das Anwendungsgebiet Baustelle spezifiziert. Die Ergebnisse der konzeptionellen Empfehlung sowie der Komponentenentwicklung sind weiterführend in einem Anwendungskonzept für eine sichere und störungsfreie Einbindung des EIV in die Baustellenumgebung zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Laborversuche wurden weiterführend für die Skalierung eines EIV-Gerätes bei einem kontinuierlichen Löseprozess auf einer Baustelle herangezogen. Die Skalierung erfolgte für ein handgeführtes EIV-Geräte und für ein EIV-Anbaugerät. Bei der Skalierung der handgeführten Geräte wurden die Abbruchleistung (in  $\text{m}^3/\text{h}$ ) und die Trennleistung (in  $\text{m}^2\text{-Trennfläche}/\text{h}$ ) des EIV separat ermittelt. Auf Basis der Skalierung wurde eine vergleichende Betrachtung der Löseleistung der bisher etablierten Abbruch- und Trennverfahren mit dem EIV durchgeführt, um die Potenziale des EIV aufzuzeigen. Die Löseleistung des EIV ist geringer als die Löseleistung von herkömmlichen handgeführten Geräten und Anbaugeräten, welche bei Rückbaumaßnahmen in sensiblen Bereichen eingesetzt werden. Beim Vergleich der Trennleistung des EIV mit den gängigen Trennverfahren konnte ein deutliches Potenzial hinsichtlich der Trennleistung festgestellt werden. Mit dem EIV ist es möglich, die Trennleistung einiger Verfahren zu erreichen und teilweise sogar zu

---

übertreffen. Weiterhin wurden die Potenziale des EIV hinsichtlich der Herstell- und Betriebskosten aufgezeigt, welche es zukünftig durch weiterführende Versuche zu konkretisieren gilt.

Die Untersuchung der Adaption einer neuen Rückbautechnologie erfordert ebenfalls die Analyse von Arbeitsphysiologie und Arbeitssicherheit (Kapitel 9). Durch den Einsatz des EIV können die Emissionen der gängigen Verfahren wie Staub, Lärm und Erschütterungen signifikant reduziert werden. Darüber hinaus werden Ganzkörperschwingungen sowie Schwingungsbelastungen des Hand-Arm-Systems vermieden. Durch die Hochspannungsimpulse des EIV müssen gesonderte Regelungen auf der Baustelle getroffen werden, um die Sicherheit des Bedienpersonals sowie weiterer auf der Baustelle tätiger Personen, zu gewährleisten. Die geltenden regulatorischen Rahmenbedingungen sowie die Kennzeichnung auf der Baustelle wurden erläutert. Die Auswirkung des EIV hinsichtlich der EMV sowie der EMUV wurden im Rahmen der Laborversuche fachkundig erfasst und hinsichtlich der Arbeitssicherheit beim Einsatz des EIV auf einer Baustelle aufgearbeitet.

## 11 Ergebnisse und Ausblick

Im Forschungsprojekt „Grundlagenermittlung zur Adaption eines innovativen Abbruchverfahrens aus dem Bergbau (EIV) als neue Bautechnologie für den selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen“ konnten weitreichende Ergebnisse generiert werden. Die Grundlagenermittlung und die durchgeführten Versuche haben es ermöglicht, die Potenziale und Grenzen der EIV-Technologie für die Anwendung im Bauwesen zu verdeutlichen und zu konkretisieren.

Die Versuche im Rahmen des Forschungsprojektes haben die vielfältigen Einflussfaktoren der Technologie auf den Löseprozess von Festgestein im bauverfahrenstechnischen Kontext aufgezeigt. Der Fokus lag bei den Untersuchungen insbesondere auf der Fragestellung, wie und in welchem Umfang mit möglichst geringen Impulsspannungen und geringen Impulsenergien Stoffe aus dem mineralischen Verbund gelöst werden können. Aufgrund der erforderlichen Menge an spezifischer Energie, welche im Vergleich zu bisher etablierten Verfahren hoch ist, konnte festgestellt werden, dass sich das EIV nur bedingt für den Massenabtrag von Festgestein eignet. Im Gegensatz dazu hat sich die Selektivität des EIV als ein deutlicher Vorteil im Vergleich zu den herkömmlichen Abbruchverfahren herausgestellt. Es wurde gezeigt, dass mineralische Baustoffe wie Kalksandstein und Beton durch das EIV von der mineralischen Matrix separiert werden können. Mit dem EIV werden die mineralischen Baustoffe so feinkörnig aus dem Verbund gelöst, dass eine weitere Zerkleinerung des so gewonnenen Materials im Rahmen der weiteren Verwertung nicht notwendig ist.

Durch die Versuchsergebnisse und die vergleichende Betrachtung des EIV mit den gängigen Abbruchverfahren konnte auch festgestellt werden, dass das EIV unter Wahrung von Selektivität sowie eines geplanten Einsatzes in sensiblen Bereichen für den Totalabbruch und dem damit geforderten Massenabtrag von Baustoffen nur bedingt geeignet ist. Durch Anpassung von Impulsenergie und zudem durch mechanische Unterstützung kann eine technische Löseleistung wie beim Abbruchhammer erreicht werden. Dazu sind jedoch veränderte Versuchsszenarien durchzuführen, um diese Annahme zu prüfen. Ein deutlicher Vorteil der derzeitigen Anwendung ohne mechanische Unterstützung ist die signifikante Reduzierung von Erschütterungen beim selektiven Rückbau, da das Material auf Zug und nicht auf Druck beansprucht wird. Die vergleichsweise geringen Löseleistungen beim Totalabbruch führen zu einer geringen Wirtschaftlichkeit des EIV im Vergleich zu den gängigen Abbruchverfahren.

Unabhängig davon konnten Potenziale eruiert werden, die im geringvolumigen Abtrag und dem Trennen von mineralischen Materialien liegen. Im Bauwesen sind für den Einsatz des EIV deutliche Potenziale in den Bereichen:

- Oberflächenabtrag,
- Oberflächenbehandlung,
- Schlitzen,
- Trennen und
- Bohren

zu erkennen. Beim Oberflächenabtrag und der Oberflächenbehandlung kann mit dem EIV eine vergleichsweise gute Löseleistung erreicht und zudem eine gleichmäßige Oberfläche geschaffen werden. Bei der Herstellung von Schlitzen kann mit dem EIV ebenfalls weitgehend eine gleichmäßige Oberfläche erzeugt und darüber hinaus kann durch das Nachsetzen der Elektroden die Tiefe und durch den Elektrodenabstand die Breite des Schlitzes variiert werden. Im direkten Vergleich zu den konventionellen Trenn- und Bohrverfahren können mit dem EIV gute Resultate erzielt werden. Die mineralischen Baustoffe werden bei den gängigen Trennverfahren wie auch bei dem EIV feinkörnig aus dem Verbund gelöst, weshalb eine bessere Vergleichbarkeit der Verfahren hinsichtlich der Geometrie des abgetragenen Materials gegeben ist.

Der Einsatz gängiger Abbruch- und Trennverfahren ist mit einem hohen Verschleiß der Werkzeuge verbunden. Beim EIV findet aufgrund der fehlenden mechanischen Kräfte kein Verschleiß statt. Ein elektrischer Abbrand der Elektroden ist ebenfalls nicht feststellbar. Dies erhöht die Standzeit des Gerätes im Vergleich zu den mechanischen Verfahren.

Die Untersuchungen haben weiterhin ergeben, dass die maschinentechnische Umsetzung des EIV weitgehend flexibel wählbar ist. Der gerätetechnische Aufbau besteht dabei aus einem Grundgerät zur Herstellung der Spannungsimpulse und der Halteeinrichtung der Elektroden, beide Einheiten sind über Kabel miteinander flexibel verbunden. Je nach Einsatzgebiet kann eine differierende maschinentechnische Umsetzung sinnvoll sein. Es ist möglich, das EIV als handgeführtes Gerät oder als Anbaugerät für ein Trägergerät umzusetzen. Auch im Bereich der Robotik kann das EIV als Anbaugerät genutzt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Führung und Halterung des Dielektrikums in unterschiedlichen Anwendungen (horizontal unten, vertikal, horizontal oben) sowie des Einsatzes einer Kombination aus mehreren Elektrodenpaaren. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes bestehen erhöhte Anforderungen, eine allgemeine Gefahr besteht bei verantwortungsvollem Umgang mit der Technologie nicht. Eine Ausnahme bilden schädliche Einflüsse elektromagnetischer Felder des EIV auf Personen mit Implantaten (EMUV). Inwieweit eine Abschirmung am Gerät zielführend ist, muss weiterführend untersucht werden.

Die Resultate des Forschungsvorhabens liefern viele Anknüpfungspunkte für die weitere Forschung und Entwicklung. Zum einen ist die Weiterentwicklung eines handgeführten Gerätes für Kleinanwendungen im Bereich Sägen, Schlitzen oder auch das beschädigungslose Freilegen von Bewehrung zu empfehlen. Durch die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten der Elektroden ergibt sich eine große Variabilität in der Geometrie und zudem in der möglichen Bearbeitungstiefe. Vor allem bei massiven Konstruktionen ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten, da das EIV nicht durch die Meißellänge oder den Sägeblattdurchmesser sowie einen linearen Leistungsfortschritt limitiert ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung höherer Impulsenergien, Impulsspannungen sowie der gleichzeitig parallele Einsatz einer Vielzahl von Elektrodenpaaren. Dadurch kann die Produktivität des Verfahrens deutlich erhöht werden und sich den Leistungswerten konkurrierender Verfahren annähern. Bezogen auf die gerätetechnische Umsetzung ist an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Ein dritter Aspekt ist die Nutzung der Selektivität des EIV. Hierbei liegt der Fokus auf dem selektiven Abtrag von mineralischen Schichten z. B. Putzschichten oder dem Trennen von bereits abgebrochenem Gestein nach den einzelnen Bestandteilen z. B. Mauerwerk und Putz. Dadurch wird der nachträgliche Aufwand zum Trennen und Recyceln des Baustoffes reduziert und automatisierbar.

Die Forschungsgruppe sieht weiterhin Anwendungspotenzial beim horizontalen und vertikalen Oberflächenabtrag als Alternativverfahren zum Fräsen, Wasser- und Sandstrahlen. Verfahrenstechnische Vorteile (erschütterungs- und staubfrei, lärmarm) lassen hier eine Vielzahl an Anwendungsszenarien zu. Beispielsweise kann das EIV eingesetzt werden, um nicht mehr tragfähige Schichten oder beschädigte Schichten bis auf ausreichend feste Schichten zu entfernen. Ein Anwendungsszenario ist zum Beispiel die flächige Entfernung von beschädigtem Beton an Stahlbetonkonstruktionen, das Freilegen von Bewehrung im Rahmen von Instandhaltungs- und Verstärkungsmaßnahmen oder die geometrische Anpassung von flächigen Bauteilen. Durch die mit Hilfe des EIV geschaffene raue Oberfläche kann ein guter Verbund zwischen altem und neuem Baustoff sichergestellt werden.

Ähnliches ist bei der Entfernung von Putzschichten denkbar. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Abtrag möglichst gleichmäßig erfolgt. Handgeführte Geräte sind für diese Anwendung vermutlich weniger geeignet. Maschinengeführte beziehungsweise automatisierte Verfahren eignen sich besser. Bei den genannten Anwendungsszenarien muss stets das Alleinstellungsmerkmal des EIV hinsichtlich des erschütterungsfreien Arbeitens berücksichtigt werden.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Ergebnisse des Forschungsprojektes interessante Potenzial des EIV für den Einsatz im Baugewerbe aufzeigen und die Basis für weiterführende Forschungen und Entwicklungen zur Erarbeitung anwendungsreifer Lösungskonzepte in unterschiedlichen Bereichen des Bauwesens bildet. EIV wird dabei keine grundsätzliche Alternative zu etablierten Abbruchverfahren großvolumiger Baukörper sein, vielmehr jedoch als Abbruchtechnologie in Frage kommen, die bei speziellen Randbedingungen zum Einsatz kommt. Die Weiterführung der Forschungsarbeiten wird als vielversprechend eingeschätzt.

## Verzeichnisse

### Abkürzungsverzeichnis

32. BImSchV	Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung
AK	Arbeitskraft
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASR	Arbeitsstättenrecht
AVV Baulärm	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm - Geräuschimmission
B	Breite
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
dB	Dezibel
D	Durchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIN EN	Deutsches Institut für Normung e. V. Europäische Norm
EA	innerer Abstand zwischen den Elektroden
EIV	Elektro-Impuls-Verfahren
EKT	Einzelkosten der Teilleistung
elek.	elektrisch
EMFV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch elektromagnetische Felder
H	Höhe
Hz	Hertz
kg/h	Kilogramm pro Stunde
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW	Kilowatt
L	Länge
LärmVibrationsArbSchV	Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung
m <sup>2</sup> /h	Quadratmeter pro Stunde
m <sup>2</sup> -Trennfläche	Quadratmeter Trennfläche
m <sup>2</sup> -Trennfläche/h	Quadratmeter Trennfläche pro Stunde
m <sup>3</sup> /h	Kubikmeter pro Stunde
mg/m <sup>3</sup>	Milligramm pro Kubikmeter
MPa	Megapascal
ns	Nanosekunden
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
T	Tiefe
TRLV Lärm	Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung
WZ	Wirtschaftszweig

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: EIV-Bohrsystem Tiefbohrtechnik [WILL2019].....	11
Abbildung 2: Grundprinzip EIV (1 Hochspannungselektrode, 2 Erdelektrode, 3 Spülflüssigkeit, 4 Gestein, 5 elektrisches Feld, 6 Plasmakanal, 7 gelöstes Material, 8 Risse) .....	12
Abbildung 3: Elektrische Durchschlagfestigkeit verschiedener Stoffe nach [BLU2000].....	12
Abbildung 4: Wacker Neuson SE: Hydraulikhammer NE16 [WAC2020] .....	43
Abbildung 5: Darda GmbH: Abbruchzange CC420 [DAR2020] .....	44
Abbildung 6: Wimmer Anbaufräse Raptor WR03 [BDB2020].....	46
Abbildung 7: Wandsägearbeiten [RUH2020] .....	49
Abbildung 8: Winkelschleifer mit Diamanttrennscheibe [TAS2020] .....	50
Abbildung 9: Diamantkettensäge ICS [JÖR2020].....	50
Abbildung 10: Diamant-Kernbohrgerät auf Deckenplatte [BOE2020] .....	52
Abbildung 11: Versuchsaufbau für Grundlagenversuche (1 – Impulsspannungsgenerator im Druckbehälter, 2 – Probenbehälter, 3 – Wasserbecken, 4 – Kalksandsteinziegel, 5 – Erdung) .....	58
Abbildung 12: Elektrodenpaar A, B und C .....	58
Abbildung 13: Schema Versuchsablauf.....	59
Abbildung 14: Beispiel Beschriftung der Probe.....	59
Abbildung 15: Versuchsdokumentation am Beispiel eines Versuchs mit Kalksandstein .....	60
Abbildung 16: Punktuelle Ausbrüche (li.) und Ausbildung des Durchschlagkanals (re.) .....	61
Abbildung 17: Gelöstes Volumen (li.) und spez. Energie (re.) in Abhängigkeit des Elektrodenabstands.....	63
Abbildung 18: Ausgewertete Einzelversuche in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes.....	63
Abbildung 19: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit der Impulsanzahl .....	64
Abbildung 20: Überschnitt in Längsrichtung in Abhängigkeit der Impulsanzahl.....	65
Abbildung 21: Entstandene Krater nach 1, 3 und 6 Impulsen mit Elektrode B.....	65
Abbildung 22: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) bei Variation der Impulsenergie (Elektrodenabstand EA = 25 mm) .....	66
Abbildung 23: Anzahl der ausgewerteten Versuche für verschiedene Impulsanzahlen.....	67
Abbildung 24: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) mit und ohne Wasservolumenstrom .....	68
Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung nach Siebung.....	68
Abbildung 26: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades .....	69
Abbildung 27: Getrübtes Wasser (li.) und Feststoff im Versuchsbecken (re.).....	70
Abbildung 28: Masseanteil Feststoff des getrübten Wassers .....	70
Abbildung 29: Partikelanalyse mit dem Partikelmessgerät LA-300 HORIBA .....	71
Abbildung 30: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) in Abhängigkeit der Impulswiederholrate .....	71

---

Abbildung 31: Nachsetzen der Elektroden, vertikal (li.) und horizontal (re.) .....	72
Abbildung 32: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) bei vertikalem Nachsetzen der Elektroden .....	72
Abbildung 33: Nachsetzen der Elektrode C (li.) und der Elektrode B (re.).....	73
Abbildung 34: Horizontales Nachsetzen der Elektrode .....	73
Abbildung 35: Silikonabdrücke nach horizontalem Nachsetzen .....	74
Abbildung 36: Schnittbild der drei Betonkerne.....	76
Abbildung 37: Vergleich des gelösten Volumens (li.) und der spezifischen Energie (re.) von Kalksandstein und Beton.....	77
Abbildung 38: Versuchsreihe B-F-1-12 .....	77
Abbildung 39: Bewehrung in Kernscheibe der Gesteinskörnung G.....	78
Abbildung 40: Schnittfläche der Betonproben (Links 0 – 8 mm, Mitte 0 – 16 mm, Rechts 0 -32 mm) .....	78
Abbildung 41: Elektrodenposition der Nachsetzversuche mit Beton.....	79
Abbildung 42: Ergebnisse der Spurversuche in Beton (Links 0 – 8 mm, Mitte 0 – 16 mm, Rechts 0- 32 mm) .....	79
Abbildung 43: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) der Spurversuche in Beton .....	80
Abbildung 44: Gelöstes Volumen (li.) und spezifische Energie (re.) der erweiterten Spurversuche im Beton .....	80
Abbildung 45: Löseverhalten in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit.....	81
Abbildung 46: Versuchsstand kontinuierliche Versuche vertikal .....	81
Abbildung 47: Elektrodenaufnahme mit flexibler Prozessraumabdichtung.....	82
Abbildung 48: Schnittresultate und zugehörige Versuchsparameter .....	83
Abbildung 49: Spezifische Energie der Schnittresultate und Einzelversuche.....	83
Abbildung 50: Nutzleistung in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes.....	84
Abbildung 51: Zweiteiliger Aufbau des EIV (links Teil A und rechts Teil B).....	86
Abbildung 52: Draufsicht Prozessraum mit exemplarischem Wasserstand .....	90
Abbildung 53: Container Abwasseraufbereitung der Firma Reprotex GmbH im Einsatz bei dem Rückbau eines Hochhauses [REP2020-2] .....	91
Abbildung 54: Versuchsablauf - Nachsetzen der Elektrode B (38 kV, 80 J/Impuls) .....	94
Abbildung 55: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Mauerwerk.....	98
Abbildung 56: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Beton .....	98
Abbildung 57: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Stahlbeton (80 % Beton) .....	99
Abbildung 58: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten handgeführten Abbruchgeräten; Stahlbeton (50 % Beton) .....	99

---

---

Abbildung 59: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Beton .....	102
Abbildung 60: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Stahlbeton (80 % Beton).....	102
Abbildung 61: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Abbruchleistung eines EIV-Anbaugerätes an etablierten Anbaugeräten (5-Tonnen-Trägergerät); Stahlbeton (50 % Beton).....	103
Abbildung 62: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Schnittleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten Schnittverfahren; Beton .....	104
Abbildung 63: Prozentualer Anteil der theoretisch erreichbaren Trennleistung eines handgeführten EIV-Gerätes an etablierten Bohrverfahren; Beton .....	106
Abbildung 64: Maßnahmen nach DIN VDE 0100-410 [KRE2012, S. 40 f.].....	113
Abbildung 65: Kennzeichen „Verbot für Personen mit Herzschrittmacher“ .....	114
Abbildung 66: Kennzeichen „Warnung vor elektrischer Spannung“ .....	115
Abbildung 67: Kennzeichen „Warn-Kombischild Hochspannung Lebensgefahr“ .....	115
Abbildung 68: Kennzeichen „Warnschild Vorsicht Restspannung! Endladezeit länger als 5 s“ .....	115

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung [DIN EN 12620, DIN EN 4226-101, DIN EN 4226-102, DIN 1045-2] .....	19
Tabelle 2: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung für die Herstellung von Betonen [nach DEU2019] .....	20
Tabelle 3: Wasserverbrauch in Abhängigkeit des Durchmessers der Diamant-Bohrkrone [SCH2015, S. 356] .....	25
Tabelle 4: Immissionsrichtwerte der AVV Baulärm .....	28
Tabelle 5: Differenzierung nach Richtlinie 2000/14/EG [SCH2015, S. 43] .....	28
Tabelle 6: Emissionen der Abbruchverfahren .....	30
Tabelle 7: Emissionen der Trennverfahren .....	31
Tabelle 8: Anwendungsszenarien EIV-Bau .....	34
Tabelle 9: Abbruchverfahren für Bauwerke aus mineralischen Baustoffen [SCH2015, S. 174] .....	36
Tabelle 10: Handabbruch: Vorteile, Nachteile, Anwendungsgebiet [SCH2015, S. 241] .....	38
Tabelle 11: Abbruch mit handgeführten Abbruchhämmern (elektrisch): Nutzleistung [KOR1987] .....	39
Tabelle 12: Vergleich der Nutzleistung Handabbruch zwischen Handwerkszeug und druckluftbetriebenem Abbruchhammer [KOR1987] .....	40
Tabelle 13: Nutzleistung Bohrlöcher mit handgeführten Bohrhämmern in m/h [KOR1987] .....	41
Tabelle 14: Einsatz von Demontage/Hebezeug in Abhängigkeit des Bauwerksteils und der Dicke [SCH2105, S. 175] .....	42
Tabelle 15: Diamantsägen: Vorteile, Nachteile, Anwendungsgebiet [SCH2015, S. 353] .....	48
Tabelle 16: Schnittleistung von Diamantsägen [SCH2015, S. 349] .....	51
Tabelle 17: Diamant-Kernbohrgerät: Vorteile und Nachteile [SCH2015, S. 356] .....	52
Tabelle 18: Nutzleistung diamantbesetzte Bohrkrone beim Kernbohren [SCH2015, S. 358] .....	53
Tabelle 19: Vollbohrer: Vorteile und Nachteile [SCH2015, S. 361] .....	54
Tabelle 20: Nutzleistung Bohrhammer senkrecht [SCH2015, S. 239] .....	54
Tabelle 21: Nutzleistung Bohrhammer waagrecht [SCH2015, S. 239] .....	55
Tabelle 22: Stoffkennwerte Kalksandstein [BWL2020] .....	58
Tabelle 23: Stoffkennwerte Abformsilikon [TFC2020] .....	60
Tabelle 24: Erfasste Messdaten .....	61
Tabelle 25: Versuchsmatrix Kalksandstein .....	62
Tabelle 26: Ergebnisse nach horizontalem Nachsetzen .....	74
Tabelle 27: Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Nachsetzabstandes und der Impulswiederholungsrate .....	75
Tabelle 28: Vergleich Nutzleistung handgeführter Abbruchhammer nach [SCH2015] .....	83
Tabelle 29: Versuchsergebnisse Nachsetzen der Elektrode B; 10 mm nach 5 Impulsen .....	94
Tabelle 30: Hochrechnung; Nachsetzen Elektrode B; 10 Hz .....	95

---

Tabelle 31: Hochrechnung; Nachsetzen Elektrode B; 25 Hz.....	95
Tabelle 32: Hochrechnung Abbruchleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; handgeführtes EIV-Gerät; 10 Hz und 25 Hz .....	96
Tabelle 33: Hochrechnung Abbruchleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; EIV-Anbaugerät; 10 Hz und 25 Hz.....	96
Tabelle 34: Hochrechnung reine Trennleistung Laborversuche Nachsetzen Elektrode B; 10 Hz und 25 Hz.....	96
Tabelle 35: Abbruchleistung handgeführter Abbruchverfahren und EIV.....	97
Tabelle 36: Abbruchleistung Anbaugeräte für 20-Tonnen-Trägergerät .....	100
Tabelle 37: Abbruchleistung Anbaugeräte und Vergleich Anbaugeräte 20-Tonnen-Trägergerät .....	100
Tabelle 38: Abbruchleistung Anbaugeräte für 5-Tonnen-Trägergerät.....	101
Tabelle 39: Abbruchleistung Anbaugeräte und EIV-Anbaugerät für 5-Tonnen-Trägergerät .....	101
Tabelle 40: Schnittleistung Schnittverfahren und Trennleistung EIV .....	104
Tabelle 41: Nutzleistung etablierter Bohrverfahren und Trennleistung EIV .....	105
Tabelle 42: Hochrechnung Energie EIV beim Lösen von Kalksandstein.....	108
Tabelle 43: Hochrechnung Energie EIV beim Lösen von Beton .....	108
Tabelle 44: Energiekosten pro Betriebsstunde des EIV .....	108
Tabelle 45: Technische Schutzvorkehrungen gemäß DIN VDE 0100 .....	113

## Formelverzeichnis

Formel 1: Impulsenergie.....	66
Formel 2: Überschlägige Abschätzung der Abbruchleistung [m <sup>3</sup> /h] .....	84

## Quellenverzeichnis

- AND2007 Anders, E.; Beyer, T.; Kunze, G.: Untersuchung zur Verfahrens- und Geräteentwicklung für eine ökologische Natursteinbearbeitung mit der Elektroimpulstechnik, Abschlussbericht, Dresden, 07/2007, S. 11-13
- AQU2019 AQUACO GmbH, Übersicht Maschinenmodelle AQUA Standard-Lösungen zur Staubbindung, [https://staubbindung.eu/wp-content/uploads/2019/03/tabelle\\_maschinen\\_aquaco\\_2019.pdf](https://staubbindung.eu/wp-content/uploads/2019/03/tabelle_maschinen_aquaco_2019.pdf), 15.06.2020
- ArbStättV Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV), [http://www.gesetze-im-internet.de/arbstaettv\\_2004/](http://www.gesetze-im-internet.de/arbstaettv_2004/), 15.06.2020
- BAST2021 Basten, M.; Schäfer, D. B.; Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016, <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-11.pdf>freislaufwirtschaft-bau.de), 25.01.2021
- BAUA2020 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Arbeitsschutz bei Abbrucharbeiten, [https://www.baua.de/DE/Angebote/Publicationen/Praxis/A22.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.baua.de/DE/Angebote/Publicationen/Praxis/A22.pdf?__blob=publicationFile&v=1), 30.06.2020
- BAUS2020 Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.; Nachfrage der Bauwirtschaft, Bauen im Bestand, [https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user\\_upload/bbs/Dateien/2016-07-13\\_BBS\\_Zahlenspiegel\\_ES\\_Bestandsbau.pdf](https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/2016-07-13_BBS_Zahlenspiegel_ES_Bestandsbau.pdf), 23.12.2020
- BAU2020 baunetzwerk.biz, Anbaufräsen: Geballte Ladung Kraft, Schlüterschen Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, <https://www.baunetzwerk.biz/anbaufraesens-bagger-gestein-abbau/150/1996/89233>, 22.06.2020
- BDB2020 bd Baumaschinen. Galerie: Kompaktmaschinen 2: Takeuchi Bagger mit Wimmer Anbaufräse Raptor WR03, <https://www.baumaschinendienst.de/artikel/baerenstarke-kompaktmaschinen-im-abbruch-2048/galerie-2065/4/>. Zugegriffen: 2. April 2020
- BIM2020 Bimesmeier, T.; Gruhler, K.; Deilmann, J.; Steinmetzer, S.: Sekundärstoffe aus dem Hochbau: Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem Hochbau für den Baubereich, Stuttgart: Fraunhofer IRB – Verlag, 2020
- BIO2020 BIOTRONIK SE & Co. KG, Ratgeber: „Elektromagnetische Verträglichkeit von Herzschrittmachern, ICDs und CRT-Implantaten von BIOTRONIK“, [https://biotronik.cdn.mediamid.com/cdn\\_bio\\_doc/bio24030/15537/bio24030.pdf](https://biotronik.cdn.mediamid.com/cdn_bio_doc/bio24030/15537/bio24030.pdf), 17.08.2020
- BLU2000 Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H. Hoppe, P.; Schultheiß, C.; Straßner, R.: Application of Pulsed HV Discharges to Material Fragmentation and Recycling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol77, No. 5, S. 625–636, 2000
- BOE2020 Boels Baumaschinenverleih Österreich GmbH. Bohren und Stemmen: Diamantbohrer, <https://www.boels.at/mieten/bohren-und-stemmen>. Zugegriffen: 7. April 2020
- BWL2020 Baustoffwerke Löbnitz, Produktdatenblatt Kalksandstein KS-NF, [https://www.bwloebnitz.de/images/downloads/LE\\_NF.pdf](https://www.bwloebnitz.de/images/downloads/LE_NF.pdf), zuletzt geprüft: 15.01.2020
- DAR2020 Darda GmbH. Produktdatenblatt Darda CC420, <https://www.darda.de/produkte/betonzangen.html>. Zugegriffen: 26. März 2020.
- DEU2019 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Anforderungen an Ausgangsstoffe zur Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2, 2019
- DIN4150 DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, 10772 Berlin, Beuth Verlag GmbH

- EMVG2016 Gesetz über die elektronische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (Elektromagnetische Verträglichkeit-Gesetz – EMVG) Ausfertigung: 14.12.2016
- GIR2010 Girmscheid, G.: Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, 4. Auflage, Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, 2010
- JÖR2020 Jörg Brauner, Handwerkermarkt24. Diamantkettensäge ICS 680ES GC Benzin 30 cm, <https://handwerkermarkt24.de/576882-Diamantkettensaegen-ICS-680ES>. Zugegriffen: 6. April 2020
- KIN2020 Kinshofer GmbH, Produktdatenblatt der DRC-Serie für Bagger, [https://www.kinshofer.com/de/images/pdf\\_bagger\\_ger/DRC260-700\\_ger.pdf](https://www.kinshofer.com/de/images/pdf_bagger_ger/DRC260-700_ger.pdf), 22.06.2020
- KOR1987 Korth, D.; Lippok, J.: Abbrucharbeiten. Vorbereitung und Durchführung, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987
- KRE2012 Krefter, K.-H.; Schmolke, H.: DIN VDE 0100-410, 3. Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2012
- KÜCH2009 Küchler, A.; Hochspannungstechnik. Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- LÄRM2020 Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch Lärm und Vibration, Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV), [https://www.gesetze-im-internet.de/l\\_rm\\_vibrationsarbschv/LärmVibrationsArbSchV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/l_rm_vibrationsarbschv/LärmVibrationsArbSchV.pdf), 15.06.2020
- LOHN2020 Liebig, A.; [https://www.lohn-info.de/mindestlohn\\_bauhauptgewerbe.html](https://www.lohn-info.de/mindestlohn_bauhauptgewerbe.html), 27.10.2020
- MEE2015 Meetz, M.; Mettke, A.; Liesemeier, B.; Schmidt, S.; Verheyen, F.: Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden – Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2015
- MOT2016 Motzko, C.; Klingenberger J.; Wöltjen, J.; Löw, D.: Bewertungsmatrix für die Kostenplanung beim Abbruch und Bauen im Bestand – Datenbank zur Analyse und Bewertung in Bezug auf Kosten, Technologie und Dauern – Endbericht, Technische Universität Darmstadt, Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-13.21, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2016
- MTEC2020 M-tec GmbH, Produktdatenblatt Abbruchzange Modell CR, <https://www.mtec-gmbh.de/abbruchzangen>, 22.06.2020
- MÜL2018 Müller, A.: Baustoffrecycling: Entstehung – Aufbereitung – Verwertung. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018
- REP2020-1 Reprotex GmbH; Produkte, Mobile Abwasseraufbereitung, [https://www.reprotex.com/mfd\\_200/](https://www.reprotex.com/mfd_200/), 16.11.2020
- REP2020-2 Reprotex GmbH; Referenzen, Bau, Hochhausrückbau, <https://www.reprotex.com/portfolio-items/hochhausruckbau/?portfolioCats=7>, 16.11.2020
- RUH2020 Betontechnik GmbH. Wandsägen: Wandsägearbeiten nach Maß für Bauprojekte jeder Größenordnung, [https://www.ruhl-betontrenntechnik.de/images/wandsaegen/20171006\\_162934.jpg](https://www.ruhl-betontrenntechnik.de/images/wandsaegen/20171006_162934.jpg). Zugegriffen: 6. April 2020
- SCH2004 Schultmann, Frank: Projektplanungsmodelle und -methoden für den Rückbau von Bauwerken, Professur Informatik im Bauwesen. Weimar, 2004
- SCH2015 Schröder, M.; Pocha, A.: Abbrucharbeiten: Grundlagen, Planung, Durchführung, 3. Aufl., Köln, ISBN 978-3-481-03096-4, 2015

- STA2017 Statistisches Bundesamt (Destatis). Abfallbilanz (Abfallaufkommen /-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen.  
[https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile), 19.06.2020
- STA2020 Statistisches Bundesamt (Destatis). Struktur des Wohnungsbaus nach Neubau und Sanierung in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2019.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/202207/umfrage/struktur-des-wohnungsbaus-nach-art-der-bauleistung-in-deutschland/#:~:text=Wohnungsbau%20%2D%20Struktur%20nach%20Art%20oder%20Bauleistung%20in%20Deutschland%20bis%202019&text=Die%20Statistik%20zeigt%20die%20Struktur,Bau%20neuer%20Eigenheime%20und%20Gescho%3%9Fwohnungen.>, 11.01.2021
- STA2021-1 Statistisches Bundesamt (Destatis). Bauhauptgewerbe / Ausbaugewerbe / Bauträger, Lange Reihe der jährlichen Betriebserhebungen 2019.  
[https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Struktur/lange-reihen-betriebserhebung-bau-ausbaugewerbe-pdf-5442001.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Struktur/lange-reihen-betriebserhebung-bau-ausbaugewerbe-pdf-5442001.pdf?__blob=publicationFile), 25.01.2021
- STA2021-2 Statistisches Bundesamt (Destatis). Umsatz der Branche Abbruch-/ vorbereitende Baustellenarbeiten in Deutschland von 2012 bis 2018 und Prognose bis zum Jahr 2024.  
<https://de.statista.com/prognosen/924829/abbruch-vorbereitende-baustellenarbeiten-umsatz-in-deutschland>, 25.01.2021
- STA2021-3 Statistisches Bundesamt (Destatis). Pressemitteilung, Investitionen des Baugewerbes im Jahr 2019 um 6,2 % gestiegen.  
[https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/12/PD20\\_517\\_441.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/12/PD20_517_441.html), 25.01.2021
- TAS2020 T.A.S. Technik.Arbeitsschutz.Service. Diamanttrennscheibe für Winkelschleifer / DT 600 U Supra, <https://www.tas-online.de/Diamanttrennscheiben-fuer-Winkelschleifer/-/DT-600-U-Supra>. Zugriffen: 6. April 2020
- TFC2020 <https://trollfactory.de/produkte/silikon-kautschuk/haertegrad-shore/mittel-shore-a26-45/7050/tfc-troll-factory-silikon-kautschuk-typ-28-abformsilikon-mittelhart-1-1-rtv-nv>, zuletzt geprüft 08.01.2020
- VDI2019 Kaiser, O. S.; Pichlmeier F.: VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 26: Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung, VDI Zentrum für Ressourcenschonung GmbH, Berlin, Mai 2019
- WAC2020 Wacker Neuson SE. Datenblatt Hydraulikhammer NE16,  
<https://www.wackerneuson.at/de/produkte/bagger/anbauwerkzeuge-fuer-bagger/hydraulikhaemmer/produkt/att/ne16/>. Zugriffen: 24. März 2020
- WEI2013 Weimann, K.; Matyschik, J. Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Müller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung; FKZ. 3709 33 317; im Auftrag des Umweltbundesamtes
- WILL2019 Will, F., Anders, E., Voigt, M., Lehmann, F., Strauss, H., Reich, M., Lehr, J., Lienert, A. & Hohmuth, M.: Entwicklung und In-situ-Test eines EIV - Bohrsystems (FKZ 0325788). Abschlussbericht. 2019

---

## Mitwirkende

### Autoren:

Technischen Universität Dresden

Institut für Baubetriebswesen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto

Dipl.-Ing. Lukas Hammel



Technische Universität Dresden

Institut für Mechatronischen Maschinenbau

Stiftungsprofessur für Baumaschinen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Will

Dipl.-Ing. (FH) Franziska Lehmann

Dr.-Ing. Erik Anders

Dipl.-Ing. Matthias Voigt

### Projektpartner:

EBF Innovation GmbH, Dipl.-Ing. Torsten Blum

EUROVIA Verkehrsbau Union GmbH, NL Dresden, Dipl.-Ing. Gunter Krause

Thomas Werner Industrielle Elektronik e. Kfm., Dipl.-Ing. (FH) André Lienert

IAB Weimar gGmbH, Dipl.-Ing. Thomas Roske, Dipl.-Ing. Barbara Leydolph,

Dr.-Ing. Justus Lipowsky

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),

Dipl.-Ing. Werner Grommes

ILEAG e. V., Dipl.-Ing. Marianne Markstein, Dipl.-Ing. Maik Hohmuth

BG-Bau, Dipl.-Ing. (FH) Andre Grimm

Homilius Bohren & Umwelttechnik, Dipl.-Ing. Wolfdietrich Homilius