



Entwicklung einer innovativen Trennmethode für gebrauchte Bentonitsuspensionen zur ökonomisch vorteilhaften, ressourcenschonenden und umweltgerechten Entsorgung.

Abschlussbericht Phase I

**Zeitraum:
Juli 2012 bis Oktober 2013**

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Gebäude: IC 6-127

Universitätsstr. 150

44801 Bochum

Tel.: 0234 3228061

Herrenknecht AG

Schlehenweg 2

77963 Schwanau-Allmannsweiler

Tel.: 07824 3021537

Bearbeitung:

Dr.-Ing. Britta Schöcker

ICCP Silvia Payá Silvestre

**Ruhr-Universität Bochum
Bochum 17.01.2014**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	7
1 Problemstellung und Umwelrelevanz	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Umwelrelevanz des Vorhabens	3
1.3 Projektübersicht	4
2 Zielsetzung des Vorhabens	6
3 Grundlagen und Stand der Technik	8
3.1 Bentonit und Bentonitsuspension	8
3.1.1 Bentonit	8
3.1.2 Bentonitsuspension	9
3.1.3 Bentonitsuspension als kolloidale Suspension	10
3.2 Anwendung von Bentonitsuspensionen im Spezialtiefbau	12
3.3 Stand der Technik: Separation und Entsorgung von gebrauchte Bentonitsuspensionen	13
3.4 Prozesse der Elektrokoagulation	15
3.4.1 Physikalisches Prinzip der Elektrolyse	15
3.4.2 Koagulation von kolloidalen Suspensionen	24
3.4.3 Anwendung der Elektrokoagulation an Abwasseraufbereitung	25
4 Charakterisierung einer Elektrokoagulationszelle (Laborprototyp)	28
4.1 Aufbau	28
4.1.1 Geometrie der Elektroden	29
4.1.2 Elektrodenmaterial	30
4.1.3 Anzahl an Elektroden	32
4.1.4 Bewegung der Elektroden	34
4.2 Betriebsart	34
4.3 Elektrisches Prinzip	36
4.4 TLB-Elektrokoagulationszellenkonstruktion	37
4.4.1 TLB-Zelle A	37
4.4.2 TLB-Zelle B	40
4.4.3 TLB-Zelle C	41
4.4.4 Übersicht der Eigenschaften der TLB-Zelle A, B und C	44

5	Versuchsprogramm und Vorgehensweise	45
5.1	Versuchssystematik	45
5.1.1	Definition der Effektivitätsparameter	47
5.1.2	Absetzversuch	48
5.2	Versuchsprogramm	49
6	Versuchsergebnisse der Elektrokoagulation	54
6.1	Einfluss des Aufbaus der Elektrokoagulationszelle	56
6.1.1	Elektrodenmaterial, Elektrodenabstand und Stromstärke	56
6.1.2	Elektrodenoberfläche	71
6.1.3	Anzahl an Elektroden	74
6.1.4	Zusammenfassung	81
6.2	Einfluss der Betriebsart der Elektrokoagulationszelle	83
6.2.1	Strömungszustand	83
6.2.2	Reinigungssystem der Anode	102
6.2.3	Verweildauer	115
6.2.4	Zusammenfassung	119
6.3	Zwischenergebnisse: Best-Combination-Matrix	120
6.4	Einfluss der Wetterbedingungen	122
6.5	Einfluss der Eigenschaften der Bentonitsuspension	126
6.5.1	Konzentration von Bentonit W	127
6.5.2	Aufladung aus dem Labor	129
6.5.3	Aufladung aus der Tunnelbaustelle in Danzig, Polen	134
6.5.4	Zusammenfassung	141
7	Auswirkungen der Elektrokoagulation	143
7.1	Auswirkung auf die Stabilität der Restsuspension -Absetzversuch-	143
7.1.1	Absetzversuch der Restsuspension aus der Best-Combination	143
7.1.2	Absetzversuch vs. Verweildauer	148
7.2	Bestimmung des Massenverlusts der Anode	150
7.3	Bestimmung der entstehenden Gase	152
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	159
9	Implementierung der Elektrokoagulation in die Verfahrenstechnik der Separation	162
9.1	Evaluation der Einsatzbereiche der Elektrokoagulation	162
9.1.1	Elektrokoagulation im Separationskreislauf integriert	163
9.1.2	EK im ausgeschleusten Bereich, als eigene Phase des Separationssystems	164
9.2	Analyse der Leistungsstufen der EK	168
10	Ausblick	171
11	Anhang	173
	Literaturverzeichnis	180

Abbildungsverzeichnis

1.1	Globaler Kreislauf des Bentonits vom Abbau bis zur Deponierung	4
1.2	Zeitplan der Phase 1	5
3.1	Struktur der Bentonitpartikel	9
3.2	Kartenhausstruktur einer Bentonitsuspension. [Ste03]	9
3.3	Elektrische Doppelschicht	11
3.4	Bilanz zwischen der Wechselwirkung der elektrischen Doppelschichten und der Anziehungskräfte von van der Waals[Olp63]	11
3.5	Hydroshild [Herrenknecht]	13
3.6	Skizze einer Separationsanlage [Lip09]	14
3.7	Skizze des Ohm´schen Gesetzes	18
3.8	Skizze der Elektrolyse	19
3.9	Skizze des Potentials an der Grenzoberfläche Anode-Elektrolyt	19
3.10	Stabile, instabile und aggregierte Partikel. [Hol02]	24
3.11	Industrieprototyp einer Elektrokoagulationsanlage für Abwasser [dEayE]	26
4.1	Elektrodenanordnung	29
4.2	Rauheit der Elektrodenoberfläche. [Wal04]	30
4.3	Links und Mitte: Serien- und Parallelschaltung für Monopolar-Elektroden. Rechts: Bipolar-Elektroden.	32
4.4	Skizze der Serienschaltung für 4 Monopolar-Elektroden.	33
4.5	Elektrische Skizze der Parallelschaltung für 4 Monopolar-Elektroden.	34
4.6	TLB-Elektrokoagulationszelle A	38
4.7	Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle A	39
4.8	TLB-Elektrokoagulationszelle B	40
4.9	Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle B	41
4.10	TLB-Elektrokoagulationszelle C	41
4.11	Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle C, I	42
4.12	Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle C, II	43
4.13	Eigenschaften der Zelle A, B und C	44
5.1	Flussdiagramm der Versuchsdurchführung.	46
5.2	Effektivitätsparameter aus der Fließdiagramm	47
5.3	Skizze des Absetzversuches der Restsuspension	49
6.1	Spannungsverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	58
6.2	Profile der Spannungsverläufe der Elektrokoagulation	59
6.3	Temperaturverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	62
6.4	Tendenz der Temperatur der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	63

6.5	pH-Wert der Restsuspension vs. Elektrodenabstand, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	63
6.6	Leitfähigkeit der Restsuspension vs. Elektrodenabstand, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	64
6.7	Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	65
6.8	Verringerung der Dichte der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	66
6.9	Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B	67
6.10	Anlagerung des Bentonits an der Anodeoberfläche, mit Stahl- und Aluminiumelektroden, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A	67
6.11	Trockenes koagulierte Bentonit, mit Stahl- und Aluminiumelektroden, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A	68
6.12	Oberfläche einer Aluminiumanode nach 30 min Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A	69
6.13	Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B	72
6.14	Verringerung der Dichte der Restsuspension, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B	73
6.15	Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B	74
6.16	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, Serienschaltung	76
6.17	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, Parallelschaltung	76
6.18	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, 1A	78
6.19	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, 2A	78
6.20	Skizze der Elektrokoagulationszelle A unter KTSR, Mischer und Rührer	85
6.21	Skizze zur Position des Rührers in der Zelle A	85
6.22	Spannungsverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A	86
6.23	Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A	87
6.24	Verringerung der Dichte der Restsuspension, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A	87
6.25	Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A	88
6.26	Eigenschaften des koagulierte Bentonits, Versuchsreihe KTSR	90
6.27	Vergleich der Spannungsverläufe der Elektrokoagulation Ruhe-Zustand vs.KTSR	91
6.28	Vergleich der Effektivitätsparameter Ruhe-Zustand vs.KTSR	92
6.29	Anodenoberfläche, Versuchsreihe: KTSP	95
6.30	Bentonitschicht an der Anode, Versuchsreihe: KTSP	95
6.31	Vergleich der Effektivitätsparameter Ruhe-Zustand vs. kontinuierliche Strömung durch den Rührer und die Pumpe.	97
6.32	Exzentrerschneckenpumpe für die laminare Strömung	99
6.33	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C	100
6.34	Bentonitschicht an der Anode, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C	101
6.35	Skizze einer Elektrokoagulationszelle mit einem Reiningunssystem B-R und mit Reinigungs- und Filtrationssystem B-R-BE.	104
6.36	Skizze der Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen B-R-AW.	105
6.37	Skizze der Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen mit einem Filtrationssystem B-R-BE-AW.	105

6.38	Verlauf der Spannung für Versuche mit Reinigung der Anode und Einsammeln des koagulierten Bentonits.	106
6.39	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode alle 5 Minuten	107
6.40	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode und Einsammeln des koagulierten Bentonits	107
6.41	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung und Wechsel der Anode sowie Einsammeln des koagulierten Bentonits	108
6.42	Bentonitschicht an der Anode beim Versuch B-R10-BE.	109
6.43	Strom- und Spannungsverläufe, Versuchsreihe: elektrische Reinigung	111
6.44	Ergebnisse zur Reinigung der Elektroden durch Polaritätsumschaltung	113
6.45	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: elektrische Reinigung	114
6.46	Physikalische Eigenschaften der Suspension, Versuchsreihe: Verweildauer	117
6.47	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Verweildauer	118
6.48	Best-Combination Matrix für den Parameter $B_{kt}\%$	120
6.49	Best-Combination Matrix für den Parameter $\Delta\rho\%$	121
6.50	Best-Combination Matrix für den Parameter $\Delta FW\%$	121
6.51	Spannungsverläufe der Elektrokoagulation für verschiedene System- und Suspensionstemperatur	123
6.52	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: System- und Suspensionstemperatur	125
6.53	Stabilität der Suspension, Versuchsreihe: System- und Suspensionstemperatur	125
6.54	Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Konzentration	128
6.55	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Konzentration	129
6.56	Korngröße der Aufladung (Sand, Schluff und Kaolin)	130
6.57	Aufgeladene Suspension im Labor	131
6.58	Aufladungsmaterial: Sand, Schluff und Kaolin	131
6.59	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Aufladung aus dem Labor	133
6.60	Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Aufladung aus dem Labor	134
6.61	Probenentnahme von gebrauchter Bentonitsuspension aus der Separationsanlage, Danzig	135
6.62	Eigenschaften der gebrauchten Bentonitsuspension aus Danzig	136
6.63	Aufgeladene Suspension aus Danzig, Vorsieb-BS	137
6.64	Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Aufladung aus Danzig	140
6.65	Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Aufladung aus Danzig	141
7.1	Absetzversuch der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Parametern	144
7.2	Absetzkurve der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Parametern	145
7.3	Leitfähigkeit der Restsuspension	146
7.4	Absetzversuch der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Verweildauer.	148

7.5	Ergebnisse des Absetzversuches der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Verweildauer.	149
7.6	pH-Wert und Leitfähigkeit der Restsuspension beim Absetzversuch	149
7.7	links: Auffangen eines Gases mit höherer Dichte als Luft; rechts: Auffangen eines Gases mit geringerer Dichte als Luft [Sei]	154
7.8	Pneumatisches Auffangen eines Gases [Sei]	154
7.9	Deckel für Zelle B - Ansicht von Oben.	155
7.10	Zelle B mit eingebautem Deckel.	155
7.11	Absenken des Wasserspiegels im Inneren des Messzylinders nach 30 min Elektrokoagulation von Bentonitsuspension.	156
7.12	Gesamter Versuchsaufbau zur pneumatischen Messung der freigesetzten Gase bei der Elektrokoagulation.	156
9.1	Fließschema der Spülsaufbereitung mit Separationskreislauf und ausgeschleustem Bereich	163
9.2	Arbeitsbereiche von Bentonitsuspensionen vor oder während dem Betrieb	164
9.3	EK in Unterlaufwannen (Kreislauf 2. Zyklonstufe)	165
9.4	EK in Fahrbecken/ Überlaufbecken	166
9.5	EK im Altsuspensionstank	167
9.6	EK als eigenständiges System	168
9.7	Geotube-Verfahren	168
9.8	EK mit Geotube	169
9.9	EK in Kammerfilterpresse	170
9.10	EK zur Aufbereitung des Waschwassers Siebauswurf	170
10.1	Aufbau des Separationskreislaufs und Einbindung der Elektrokoagulationstechnik.	172
11.1	Effektivitätsparameter EMAS A	173
11.2	Effektivitätsparameter EMAS B	174
11.3	Effektivitätsparameter Monopolar-Elektroden Zelle B	174
11.4	Effektivitätsparameter KTSR-Zelle A	175
11.5	Effektivitätsparameter KTSP-Zelle A	176
11.6	Effektivitätsparameter Laminare Strömung Zelle C	177
11.7	Effektivitätsparameter Mechanische Reinigung der Elektroden	177
11.8	Effektivitätsparameter Verweildauer	177
11.9	Effektivitätsparameter System- und Suspensionstemperatur	178
11.10	Effektivitätsparameter System- und Suspensionstemperatur	178
11.11	Effektivitätsparameter Konzentration der Suspension W	178
11.12	Effektivitätsparameter Aufladung aus dem Labor	178
11.13	Effektivitätsparameter Aufladung aus Danzig	179

Tabellenverzeichnis

1.1	Verbrauchsmengen von Bentonitsuspensionen im Tunnelbau (Projektbeispiele)	2
4.1	Parameter der Elektrokoagulationszelle. [Jia02], [Hol02], [Res06]	30
4.2	Typische Widerstandswerte der Elektrodenmaterialien [Wal04]	31
4.3	Referenzen aus der Literatur zu Elektrodenmaterial	31
4.4	Klassifizierung der Betriebsarten einer Elektrokoagulationszelle	35
5.1	Übersicht des Versuchsprogramms	53
6.1	Übersicht der Versuchsreihe der Elektrokoagulation	55
6.2	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe EMAS-Zelle A	57
6.3	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe EMAS-Zelle B	57
6.4	Parameter der Elektrokoagulationszellen A und B	71
6.5	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Monopolar-Elektroden	75
6.6	Analyse des Energieverbrauchs, Versuchsreihe Monopolar-Elektroden	81
6.7	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A	84
6.8	Beste Ergebnisse, Versuchsreihe turbulente Strömung durch Rührer; Zelle A	91
6.9	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe turbulente Strömung durch die Pumpe; Zelle A	94
6.10	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C	99
6.11	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Mechanische Reinigung der Anode	103
6.12	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe elektrische Reinigung der Anode	111
6.13	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Verweildauer der Elektroko- agulation	116
6.14	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe System- und Suspensionstem- peratur	122
6.15	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Konzentration der Suspension	127
6.16	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Aufladung aus dem Labor	132
6.17	Eigenschaften des Bentonits S-130	135
6.18	Chemische Analyse der Proben aus Danzig	138
6.19	Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Aufladung aus Danzig	139
7.1	Eigenschaften der Restsuspension und des Wassers nach der Elektrokoagulation.	147
7.2	Versuchsreihe für die Bestimmung des Gasvolumens während der Elektrokoagula- tion(EK) für 10 und 30 Minuten Elektrolyse sowie mit und ohne StromEinstellung (E)	157

Kapitel 1

Problemstellung und Umwelrelevanz

1.1 Problemstellung

Bentonite sind aufbereitete Tone aus natürlichen Vorkommen, die in Wasser dispergiert für den Spezialtiefbau von besonderer baupraktischer Bedeutung sind. Bentonitsuspensionen werden als Stütz-, Förder- und Gleitmittel bei Tunnel- und Leitungsvortrieben, als Kühl-, Stütz- und Fördermittel bei geotechnischen und geothermischen Bohrungen sowie als Stützmittel von Schlitz- und Bohrpfahlwänden eingesetzt.

Der Rohstoff Bentonit ist ein quellfähiger, natürlich vorkommender Ton, der sich infolge der Verwitterung von vulkanischen Aschen und Tuffen oder durch Sedimentation in Meeresbecken gebildet hat. Er wurde nach dem Fundort Fort Benton in den USA benannt und besteht zu 60% -80% aus Montmorillonit, einem dreischichtigen Tonmineral. Bentonite haben die Eigenschaft, bei Dispergierung im Wasser aktiv Wassermoleküle in ihre Zwischenschichtlagen aufzunehmen. Dieser Vorgang führt zu besonderen rheologischen Eigenschaften der entstehenden Suspensionen. Die natürlichen Lagerstätten sind auf relativ wenige Regionen der Erde konzentriert, wobei Zypern die größte europäische Lagerstätte für hochwertige Bentonite ist. So werden Bentonite von den staatlichen geologischen Diensten in die Gruppe der „Rohstoffe mit hohem Wert und/oder hoher Wertschöpfung, die an wenigen Stellen in verhältnismäßig geringen Mengen gefördert werden und weite Transportwege (landesweit und Export) vertragen“ eingeteilt [SGD08]. Rohstoffsicherung in der Bundesrepublik Deutschland - Zustandsbericht. Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland).

Ein weiterer Aspekt ist der Bentonitkaufpreis, der laut ca. 180 EUR/t beträgt. Die Tabelle 1.1 stellt die Bentonitkosten von drei Projektbeispiele dar.

Durch die vielseitige Verwendbarkeit entstehen auf diversen Baustellen große Mengen von gebrauchten Bentonitsuspensionen (Tab. 1.1), die durch Aufladung mit Bodenpartikeln ihre bautechnisch relevanten Eigenschaften verlieren und in dieser Form nicht mehr verwendet werden können. Die anschließende Entsorgung der gebrauchten Bentonitsuspensionen erweist sich als schwierig, da diese stabil sind und sich nicht selbstständig entmischen [Ste03].

Um gebrauchte Bentonitsuspensionen fachgerecht zu entsorgen, müssen vorab aufwendige mechanische und/oder chemische Separationsverfahren eingesetzt werden, um die aufgeladenen Bodenpartikel wieder von der Bentonitsuspension zu trennen. Die verschiedenen Feststoffpartikelgrößen des abgebauten Bodenmaterials umfassen dabei einen Bereich von kleiner als 1 μm (0,001 mm) bis zu 160 mm und größer.

Eine vollständige Trennung gebrauchter Bentonitsuspensionen in ihre Bestandteile Bodenpartikel, Bentonit und Wasser ist trotz eines hohen Separationsaufwands bislang nicht möglich,

Projektbeispiele	A	B	C
Schilddurchmesser [m]	6	6,57	13
Vortriebslänge [m]	5,7	5,65	3,46
Bentonitverbrauch [t]	925	516	8.769
Suspension 5%, 50 kg Bentonit / 1 m ³ Wasser			
Volumen Suspension [m ³]	18.500	10.320	175.380
Annahme 180 EUR/t			
Kaufpreis Bentonit [EUR]	166.500,-	92.880,-	1.578.420,-
Annahme 200 EUR/m ³			
Entsorgungskosten [EUR]	3.700.000,-	2.064.000,-	35.076.000,-

Tabelle 1.1: Verbrauchsmengen von Bentonitsuspensionen im Tunnelbau (Projektbeispiele)

so dass die Restsuspension entsorgt werden muss. Dieses kann grundsätzlich auf drei Arten erfolgen:

- über einen Fachentsorgungsbetrieb
- Selbstanlieferung auf einer Bauschuttdeponie bei vorheriger Eindickung mit hydraulischen Bindemittel
- Entsorgung über die Landwirtschaft

In allen drei Fällen geht der Rohstoff Bentonit vollständig verloren, weil er mit der aktuell bestehenden Technik nicht aus der (Rest-)Suspension getrennt werden kann. Die zweite Entsorgungsmethode ist besonders gravierend, da hier sowohl das Bentonit als auch das verwendete Wasser durch hydraulische Zusatzstoffe (Zement oder Kalk) eingedickt und deponiert werden.

Die Entsorgungskosten betragen im üblicherweise 200 Eur/m³. Die Entsorgungskosten von drei Projektbeispiele werden in der Tabelle 1.1.

Die Nachteile der derzeit angewandten Separations- und Entsorgungsverfahren sind die hohen Zeit, Energie und Kostenaufwände, die noch nicht einmal zu einer Ressourcenschonung von Wasser und Bentonit beitragen und somit nicht nachhaltig sind.

Hier setzt die Idee des Forschungsprojekts eines geschlossenen Recyclingprozesses für Bentonitsuspensionen an: Die gebrauchte Bentonitsuspension soll durch ein einfach anzuwendendes Trennverfahren ohne den Einsatz von chemischen Zusatzstoffen auch bei kleineren und mittleren Baumaßnahmen weitestgehend in ihre Bestandteile Wasser, Bentonitpartikel und aufgeladenes Bodenmaterial separiert werden. Das Bodenmaterial kann anschließend fachgerecht entsorgt oder bei entsprechender Eignung für andere Zwecke wieder verwendet werden, das Wasser kann entweder dem Wasserkreislauf zugeführt oder auch erneut eingesetzt werden. Ein Teilziel des Forschungsprojektes ist es, das Bentonit nach der Trennung wieder so aufzubereiten, dass es zum erneuten Anmischen von frischen und qualitativ hochwertigen Bentonitsuspensionen verwendet werden kann.

Globales Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die aktuell bestehenden Separationsverfahren durch ein innovatives, neuartiges Verfahren zu optimieren oder zu ersetzen und in ein neu zu entwickelndes Aufbereitungssystem einzubinden. Synergie-Effekte mit den bestehenden Systemen leisten dabei einen positiven Beitrag zur Entlastung der vorrangigen Kosten und der Umwelt, indem die Ressourcen der Bentonitlagerstätten und Wasservorkommen geschont, Transportwege massiv reduziert werden etc.

Hierzu wird an die Erkenntnisse von bereits realisierten und eigenfinanzierten Voruntersuchungen des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum angeknüpft. In Laborversuchen erwies sich eine Trennmethode unter Verwendung von Gleichstrom als erfolgversprechend, die sich die Ladungsinhomogenität an der Oberfläche der Bentonitpartikel zu Nutze macht. Dabei reagieren die Bentonitminerale der Suspension in einem elektrischen Feld mit kinetischer Bewegung zur Anode und reichern sich dort an. Optisch reines Wasser wird dabei frei.

Diese Trennmethode entwickelt sich im Laborversuch weiter und anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird ein kleinmaßstäblicher Praxisprototyp entwickelt (Phase 1). In einem weiteren Schritt (Phase 2) sollen mithilfe des Praxisprototypen weitreichende Untersuchungen an verschiedensten mit Bodenmaterial aufgeladenen Bentonitsuspensionen durchgeführt werden. Die in den Laboruntersuchungen erlangten Grundkenntnisse und Prinzipien werden in den Bau eines zweiten, großmaßstäblichen Baustellenprototypen überführt (Phase 3) und können im Praxiseinsatz unter realen Einsatzbedingungen im Parallelbetrieb zur herkömmlichen Separationstechnik sowie im Alleinbetrieb untermauert und erweitert werden.

1.2 Umweltrelevanz des Vorhabens

Bentonit ist ein natürlicher Rohstoff, dessen Lagerstätten auf relativ wenige Regionen der Erde begrenzt sind. Er bildet aufgrund seiner besonderen rheologischen Eigenschaften in einer mit Wasser aufgeschlossenen Suspension ein Universalmittel für den Einsatz im Spezialtiefbau, das nicht durch andere natürliche oder industriell gefertigte Stoffe zu ersetzen ist. Mit einer jährlichen Abbaumenge von etwa 400.000 t/a Bentonit [SGD08] im Zeitraum von 2003 bis 2006 machte die deutsche Förderung etwa 4 % der Weltabbaumenge aus, welche mit 10.500.000 t/a angegeben wird [FGH⁺07]. Insgesamt die Hälfte der Weltförderung erfolgt jedoch in Nordamerika. Entsprechend der Tiefenlage des Bentonits wird Über- oder Untertage abgebaut. Beim Bau des „Marina Bay Sands“ Hotels in Singapur wurden wöchentlich etwa 200 t Bentonit hauptsächlich zur Schlitzwandherstellung eingesetzt [SC08]. Verarbeitet zu einer 5%igen Suspension entspricht das einer Masse von etwa 4.000 t bzw. einem Volumen von etwa 3.800 m³, die nach Gebrauch wöchentlich entsorgt werden muss.

Das Beispiel soll die enormen volumetrischen Dimensionen von Bentonitsuspensionen verdeutlichen, die bei Bauvorhaben entstehen. Damit verbunden sind vielschichtige Umweltbelastungen. Schon der Abbau des Bentonits in Tagebauweise greift entscheidend in die Landschaft und Natur ein; aber auch Bergschäden, die beim Abbau Untertage entstehen, sind nicht unmaßgeblich. Ein weiterer umweltbelastender Aspekt ist der Transportweg. Hier wirken sich sowohl der Transport von der Lagerstätte zur Aufbereitung und zum Kunden als auch der Abtransport der gebrauchten Suspension zum Entsorger oder zur Deponie negativ auf die fossilen Energieträger aus.

Aus ökologischer Sicht stellt das Hauptproblem jedoch die Entsorgung der gebrauchten Suspension dar. Da aktuell kein weiterführender Ansatz für das vollständige und nachhaltige Recycling von gebrauchten Bentonitsuspensionen existiert, wird in Deutschland der Großteil des Bentonits und des zu Herstellung verwendeten Wassers durch Zugabe von hydraulischen Bindemitteln, wie z.B. Kalk und Zement, eingedickt und entsprechend der Deponieverordnung deponiert. Damit gehen der Rohstoff Bentonit, das in der Suspension gebundene Wasser und die benötigten Eindickstoffe für den Stoffkreislauf verloren. Zudem werden durch stetig steigende Deponievolumina weitere Umweltprobleme ausgelöst. Ein nicht öffentlich diskutiertes Problem

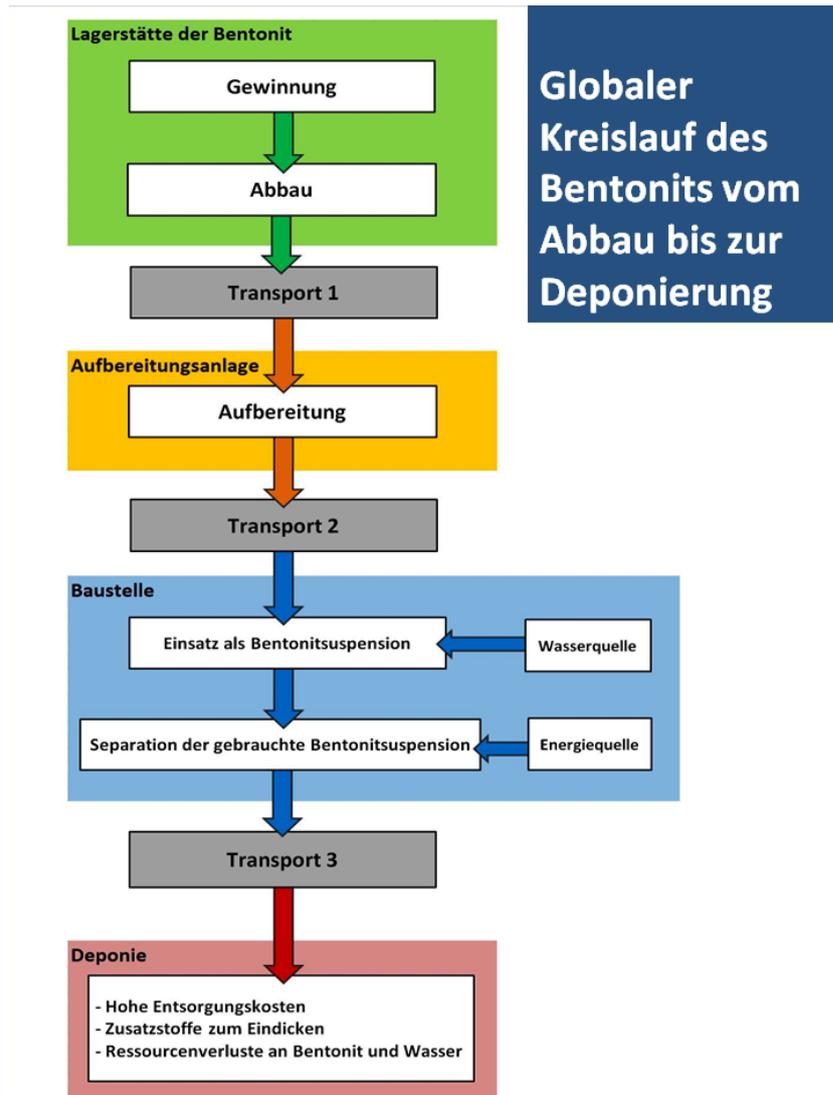


Abbildung 1.1: Globaler Kreislauf des Bentonits vom Abbau bis zur Deponierung

stellen zudem rechtswidrige Entsorgungswege von gebrauchten Suspensionen in der Natur oder der Kanalisation dar. Die Hauptmotivation hierfür liegt in der möglichen Einsparung der hohen Entsorgungskosten.

Bei den weltweiten Bentonitvorkommen werden in naher Zukunft weder eine Engpasssituation hinsichtlich einer zuverlässigen Versorgung infolge fehlender Kapazitäten noch eine totale Erschöpfung der Vorkommen prognostiziert [FGH⁺07]. Die Zielstellung des hier vorgestellten Forschungsprojekts ist jedoch zukunftsweisend auf die Ressourcenschonung der natürlichen Bentonitvorkommen weltweit, die Reduktion von globalen und lokalen Transportvorgängen sowie die Ressourcenschonung der lokalen Wasservorkommen und Deponiekapazitäten ausgerichtet.

1.3 Projektübersicht

Im Folgenden wird das Projektübersicht vorgestellt. Hier ist es zu betonen, dass nur die Phase 1 Ziel des hier liegenden Berichtes ist.

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
AP 1																								
AP 2																								
AP 3																								
AP 4																								
AP 5																								
AP 6																								
AP 7																								
AP 8																								

Abbildung 1.2: Zeitplan der Phase 1

PHASE 1

AP 1 Grundlagen Elektrokoagulation (RUB (Federführung)/ HK) Bestimmung der relevanten Parameter und ihrer Bandbreite für die Anwendung der Elektrokoagulation auf gebrauchte Bentonitsuspensionen mithilfe einer Labor-Elektrolysezelle, wie z.B. Bentonitart, Bentonitkonzentration, pH-Wert und Leitfähigkeit der Suspension, Ursprung und Eigenschaften der aufgeladenen Bodenpartikel, Durchströmungsverhalten u. Durchströmungsgeschwindigkeit der Suspension durch die Elektrolysezelle, Elektrodenmaterial und geometrische Anordnung, Varianz der Stromstärke und Spannung, zunehmende Passivierung der Anode und erforderliche Nachbehandlung der separierten Bentonitpartikel etc.

Der Zeitplan wird in der Abbildung 1.2 dargestellt.

AP 2 Design Verfahrenstechnik (HK (Federführung)/ RUB) Analyse des Verfahrensablaufs, Untersuchung möglicher Verfahrensvarianten auf ihre Eignung, wie z.B. statisch oder durchströmt, Evaluation der Verfahrenstechnik zur Integration des Trennsystems in bestehende Verfahrensabläufe oder zum autarken Betrieb

PHASE 2

AP 3 Konstruktion kleinmaßstäblicher Praxisprototyp Entwicklung, Konstruktion und Bau des Labor-Prototypen

AP 4 Testphase kleinmaßstäblicher Praxisprototyp Durchführung umfangreicher Testreihen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Prototypen unter variierenden Randbedingungen, Evaluierung des Optimierungspotentials des Trennverfahrens für den Einsatz auf der Baustelle

PHASE 3

AP 5 Konstruktion großmaßstäblicher Baustellenprototyp Entwicklung, Konstruktion und Bau des Baustellenprototyps auf der Grundlage der Ergebnisse der Testreihen des kleinmaßstäblichen Praxisprototypen

AP 6 Praxistest großmaßstäblicher Baustellenprototyp im Parallelbetrieb

AP 7 Praxistest großmaßstäblicher Baustellenprototyp im Alleinbetrieb

AP 8 Wissenschaftliche Analyse der Ergebnisse aus den Praxistests

Kapitel 2

Zielsetzung des Vorhabens

Aktuell existiert kein weiterführender, über die bestehenden Separationsstufen hinausgehender Ansatz für das Recycling von gebrauchten Bentonitsuspensionen. Bis zu einem bestimmten Maß kann die Suspension wiederverwendet werden, letztlich muss sie fachgerecht entsorgt werden.

Festzustellen ist, dass die Bentonitpartikel durch den Einsatz in der Suspension ihre besonderen Eigenschaften nicht verlieren, d.h. sie könnten theoretisch immer wieder verwendet werden. Da es aber aktuell kein Trennsystem gibt, welches nur die Tonpartikel und nicht die Bentonitpartikel aus der Suspension entnimmt, wird hier überflüssigerweise ein Grundstoff in hohen Mengen verbraucht.

An diesem Punkt setzt die Idee des Forschungsprojekts eines geschlossenen Recyclingprozesses an: Die gebrauchte Bentonitsuspension soll durch ein einfach anzuwendendes Trennverfahren ohne den Einsatz von chemischen Zusatzstoffen weitestgehend in ihre Bestandteile Wasser, Bentonitpartikel und aufgeladenes Bodenmaterial separiert werden. Das Bodenmaterial kann bei entsprechender Eignung für andere Zwecke wieder verwendet werden, das Wasser kann entweder dem Wasserkreislauf zugeführt oder erneut eingesetzt werden.

Diese Idee entstand durch die in Eigenforschung an der RUB gewonnenen Erkenntnisse zur Trennung von Bentonitsuspensionen [Bie10]. Hierbei wurden systematisch völlig neue Ansätze aus den Bereichen mechanischer, physikalischer und chemischer Verfahren, wie z.B. Kochen, Einfrieren, chemische Zusätze (Kalziumhydroxid und Natriumchlorid) und das Prinzip der Elektrolyse, auf deren Eignung untersucht und hinsichtlich ihrer Effektivität, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit bewertet. Dabei erwies sich die Trennmethode unter Verwendung von Gleichstrom (Elektrolyse), die sich die Ladungsinhomogenität auf der Oberfläche der Bentonitpartikel zu Nutze macht, als besonders geeignet.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden weiterführende, eigenfinanzierte Laborversuche an der RUB vorangetrieben. Hierbei wurde systematisch der Einfluss verschiedener Parameter, wie z.B. der Aufbau der Elektrolysezelle, Abstand der Elektroden, Stromstärke und -dauer, pH-Wert der Suspension, Konzentration des Bentonits, etc. untersucht. Anhand dieser Versuche konnte die grundsätzliche Eignung des Elektrokoagulationsverfahrens für die Trennung von Bentonitsuspensionen nachgewiesen werden.

Das Prinzip der Elektrolyse basiert auf einer elektrochemischen Reaktion. Bei diesem Prozess wird durch einen elektrischen Strom eine Reaktion im Medium erzwungen. Eine Gleichspannungsquelle sorgt für die elektrische Energie und treibt die Reaktionen voran. Hierbei laufen sogenannte Redox-Reaktionen ab, bei denen Elektronen übertragen werden. Die Oxidationsprozesse finden am Pluspol (Anode) statt, die Reduktionsprozesse am Minuspol (Kathode), d.h. die einzelnen Prozesse sind räumlich teilweise voneinander getrennt. Mithilfe dieses Prin-

zips können feinste suspendierte (Bentonit) oder kolloidale Fremdbestandteile (Bodenpartikel) des Wassers koagulierte werden, d.h. sie ballen sich zusammen und können durch Sedimentation oder Filtration abgeschieden und entfernt werden [wik]. Dieses Verfahren wird auch als Elektrokoagulation bezeichnet.

Der Eignung dieser Methode zur Trennung von Bentonitsuspensionen wird durch die besondere Ladungsverteilung auf den Kanten und Flächen eines Bentonitpartikels ermöglicht. Wird die Ladung innerhalb der Schichtstruktur durch den Eintrag von Elektronen über den Gleichstrom verändert oder reduziert, so kommt es zu einer Neutralisierung der Ladung an der Partikeloberfläche. Nun werden van-der-Waals-Kräfte aktiv, die die Koagulation, d.h. das Zusammenballen der einzelnen Partikel zu größeren Klumpen, unterstützen. Je mehr Partikel sich direkt zusammen lagern, umso größer wird deren Dichte und umso leichter sinken diese Pakete innerhalb der Suspension ab. Dies ist ein Effekt, der niemals selbsttätig in einer stabilen Bentonitsuspension auftreten würde. Im Zuge der Redoxreaktion werden von der Anode Ionen abgegeben, so dass diese nach einer gewissen Zeit ersetzt werden muss (Opfer- Anode).

Die Entwicklung dieser Elektrokoagulationstechnologie reicht über 100 Jahre zurück und wird zur Abwasserreinigung in der Industrie, wie z.B. bei der Lebensmittel- und Papierherstellung, eingesetzt. Ziel der Elektrokoagulation ist die Reinigung des Wassers von verschiedenen Störstoffen ohne den Einsatz von Chemikalien, organischen Polymeren oder anorganischen Salzen. Die Anwendungstechnik variiert dabei in Abhängigkeit von Ursprung und Zusammensetzung des Abwassers sowie des jeweiligen Industriezweiges.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Prinzip der Elektrokoagulation durch Forschungsarbeiten beschrieben wurde und Applikationen im Bereich der Abwasserbehandlung erfolgreich eingesetzt werden. Allerdings existiert aktuell weder national noch international ein Ansatz, dieses Prinzip für die Trennung von gebrauchten, mit Bodenmaterial aufgeladenen Bentonitsuspensionen im Spezialtiefbau einzusetzen.

Das neue Entwicklungsziel des vorliegenden Forschungsprojektes konzentriert sich auf die Anwendung der Elektrokoagulationstechnik zur Trennung von Bentonitsuspensionen, die mit Bodenpartikeln bis an die Grenze der Tragfähigkeit aufgeladen sind. Dabei sind insbesondere die Auswirkungen der besonderen rheologischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf den Elektrolyse- bzw. Elektrokoagulationsprozess ebenso dezidiert zu untersuchen, wie der Einfluss der sich im Zuge des Koagulationsprozesse verändernden Leitfähigkeit der Suspension und der an den Elektroden durch die Anlagerung der Bentonitpartikel auftretenden Passivierung. Hierbei werden völlig neue Anforderungen an die innovative Trenntechnik gestellt, da die Schwebstoffe, die in der kommunalen oder industriellen Abwasserreinigung zu separieren sind, in weitaus geringeren Konzentrationen anfallen und mit den Inhaltsstoffen von aufgeladenen Bentonitsuspensionen nicht vergleichbar sind.

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Trenntechnik macht das Recycling von gebrauchten Bentonitsuspensionen vorrangig für kleine und mittlere Unternehmen attraktiv. Durch ein einfach anzuwendendes, technisch robustes und kostengünstiges Separationsverfahren kann die Akzeptanz für eine fachgerechte und umweltfreundliche Entsorgung gesteigert werden. Aber auch große Bauunternehmen können von den neuen Trenntechniken profitieren, da sie die größten Volumina an gebrauchter Suspension erzeugen und ihre mehrstufigen Separationsanlagen sehr kosten- und energieintensiv arbeiten.

Kapitel 3

Grundlagen und Stand der Technik

Bentonitsuspension ist eine Mischung von Wasser und dem Tonmineral Bentonit, die als eine kolloidale Suspension bezeichnet werden kann. Bentonitsuspensionen werden in großen Mengen im Spezialtiefbau verwendet. Nach der Anwendung besteht die gebrauchte Bentonitsuspension aus dem gleichen Material sowie zusätzlich aus Sand- und Tonpartikeln. Die gebrauchten Bentonitsuspensionen werden zur einer Separationsanlage geführt, wo sie teilweise regeneriert werden können. In der Regel wird die gebrauchte, teilweise regenerierte Bentonitsuspension als Abfallprodukt entsorgt. Diese Entsorgung ist, wie später noch erläutert wird, sehr aufwändig und kostenintensiv.

Die Idee des Projektes ist die Optimierung des aktuellen Trennverfahrens von Bentonitsuspensionen durch ein mit Gleichstrom arbeitendes elektrochemisches Verfahren: der Elektrokoagulation. Dieses Verfahren basiert auf der Elektrolyse und ermöglicht die Koagulation der Partikel. Bei der Elektrokoagulation von Bentonitsuspensionen wird die Koagulationstheorie von kolloidalen Suspensionen angewendet.

Die Elektrokoagulationstechnik wird bereits seit Jahren zur Entfernung von Schwermetallen, kolloidalen Partikeln und Ölemulsionen angewendet [Hol06].

3.1 Bentonit und Bentonitsuspension

3.1.1 Bentonit

Bentonit ist ein natürliches Mineral, das aus Montmorillonit besteht. Dies ist ein blattförmiges silikatartiges Tonmineral und gehört zur Gruppe der Dreischichtminerale-Smektite. Montmorillonit besteht aus Schichten von Si-Tetraeder und Mg- oder Al-Oktaeder. Die Bentonitpartikel bestehen aus sechs bis zwölf miteinander verknüpften Montmorillonit-Schichten, die insgesamt eine Dicke von wenigen Mikrometern betragen. Bentonite bestehen außerdem aus Feldspat und Glimmer. Die Bentonitpartikel sind dünne Blättchen, daher ihre hohe spezifische Oberfläche. [Jas93], [Ben99]

Die mineralische Struktur des Montmorillonits kommt von der Struktur anderer Dreischichtminerale her, wobei einige Ionen durch andere Ionen mit ungleichnamiger Ladung ersetzt werden. Aufgrund dieses Ionenaustausches zeigen die Montmorillonitteilchen ein Übermaß an negativer Ladung. Dieses Phänomen führt zu einer unregelmäßigen Ladungsverteilung an den Flächen und Kanten. [Jas93]. Die Flächen verfügen über eine negative Ladung und die Kanten über eine positive [Olp63], (Abb.3.1). Um die negative Ladung der Montmorillonitteilchen auszugleichen, lagern sich Kationen in der Zwischenschicht ein. Diese Kationen kompensieren



Abbildung 3.1: Struktur der Bentonitpartikel

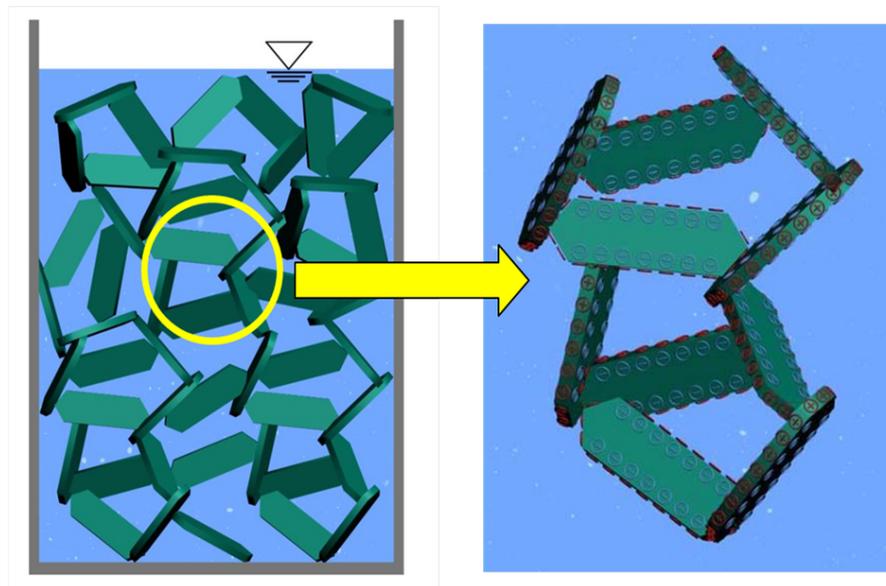


Abbildung 3.2: Kartenhausstruktur einer Bentonitsuspension. [Ste03]

die inhomogenen Ladungen und halten die Schichten zusammen. Üblicherweise können sich Flüssigkeiten in der Zwischenschicht einlagern, das nennt sich Hydratation der Montmorillonitpartikel. Dies beschreibt die Einlagerung von Wassermolekülen in die Zwischenschicht und die entsprechende Bildung von Suspensionen. [Jas93]

3.1.2 Bentonitsuspension

Bei der Herstellung einer Bentonitsuspension werden Bentonitpartikel in Wasser dispergiert. Diesen Prozess nennt man die Dispersion des Bentonits. Insbesondere kombinieren sich die Bentonitpartikel mit ein bis vier Wasserschichten und stellen die hoch stabile sogenannte „Kartenhausstruktur“ her. [Jas93]. Die Kartenhausstruktur (Abb. 3.2) beschreibt eine Anordnung, in der sich die Bentonitpartikel Fläche-Kante-Kontakte bilden und sich die Wassermoleküle in den Hohlräumen zwischen den Bentonitpartikeln befinden. Aufgrund der Kartenhausstruktur sind Bentonitsuspensionen hoch stabil: die zwei Phasen Wasser und Bentonit bleiben in Form einer Suspension und trennen sich durch Sedimentation nicht voneinander.

Der Anteil an Montmorillonit von Bentonite ist für die folgenden Eigenschaften verantwortlich: Quellfähigkeit, Thixotropie, Viskosität und Fließgrenze der Mischung Bentonit und

Wasser, welches rheologische Eigenschaften sind. [Ste03]. Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Stoffen unter die Wirkung von inneren und äußeren Kräfte.[Olp63]. Neben dem oben genannten Wasseraufnahmevermögen ist das Fließverhalten der Bentonitsuspensionen ein relevanter Parameter für die Verwendung von Bentonit im Bauwesen. Wie oben erwähnt wird, ist die Stabilität einer Bentonitsuspension ein zusätzlicher Parameter.

Sowohl die Stabilität als auch die besonderen Eigenschaften der Bentonitsuspensionen lassen sich mittels der Theorie der Kolloidchemie erklären.

3.1.3 Bentonitsuspension als kolloidale Suspension

Ein Kolloid ist ein Partikel, das sich in feinsten Verteilung in einem homogenen Dispersionsmedium befindet. Das Kolloid ist dann die disperse Phase. Bei einer kolloidalen Dispersion ist die Kontaktfläche zwischen der dispersen Phase und dem Dispersionsmedium relativ groß und die Verbindung zwischen ihnen in hohem Maße stabil. [Hun87], [Bir09]

Der meisten Kolloide sind zwischen 1 nm und 1 μm groß. Manche Stoffe, z.B. manche Mineralien, verhalten sich wie Kolloide, obwohl sie die obere Grenze von 1 μm überschreiten. [Hun87]

Die Theorie der Kolloidchemie ist zur Charakterisierung der Bentonitsuspensionen sowie der nachfolgenden Trennung unbedingt erforderlich. Eine wichtige Frage zur Kolloidchemie ist, warum die kolloidalen Dispersionen stabil sind. Um die Stabilität der Dispersionen zu beschreiben, sind Konzepte wie die elektrische Ladung der kolloidalen Partikel und die Wechselwirkung aller Kräfte in einer Dispersion zu berücksichtigen.

Die kolloidalen Partikel verfügen über eine positive oder negative elektrische Ladung, d.h. sie sind keineswegs elektrisch neutral. Wenn alle Partikel über die gleiche Ladung verfügen, werden sie sich gegenseitig abstoßen. Die elektrische Ladung an der Oberfläche der Bentonitpartikel verursacht ein elektrisches Feld und die nachfolgende Speicherung von so genannten Gegenionen an der Grenzfläche zwischen disperser Phase und Dispersionsmedium. Gegenionen (Englisch counter-ions) sind Ionen mit entgegengesetzter elektrischer Ladung bzgl. der Oberflächenladung, die sich im Dispersionsmedium befinden. Elektrolyt nennt sich das Ionen-enthaltende Dispersionsmedium. [Olp63].

Die Ladungsverteilung an der Oberfläche der Partikel und die Lagerung von Gegenionen an der Grenzoberfläche zwischen disperser Phase und Dispersionsmedium nennt sich elektrische Doppelschicht (deutsche Abkürzung EDS) (Abb. 3.3). Je nach Elektrolytkonzentration ist die EDS dicker oder dünner. Die EDS verursacht das elektrische Potential an der Grenzoberfläche, das abhängig vom Abstand von Partikeloberfläche ist. Das sogenannte Parameter Zeta-Potential beschreibt das elektrische Potential der EDS und kann mittels Zeta-Potential-Messgeräte gemessen werden. [Hun87], [Olp63]

Die van der Waals-Kräfte stellen die Wechselwirkung der Dipole, Atome und Moleküle dar. In einer kolloidalen Dispersion ergeben diese Kräfte ein elektromagnetisches Feld zwischen zwei kolloidalen Partikeln, mit dessen Hilfe die Partikel voneinander angezogen werden. Die Intensität dieser Kräfte sind vom Abstand zwischen Partikeln abhängig. [Bir09]

Die Stabilität einer kolloidalen Dispersion entspricht der Bilanz zwischen der Wechselwirkung der elektrischen Doppelschichten und der Anziehungskräfte von van der Waals. Die Abbildung 3.4 zeigt die Bilanz -diskontinuierliche Kurve- zwischen V_R -elektrostatische Abstoßung zwischen zwei elektrischen Doppelschichten- und V_A -van der Waals Anziehungskräfte-. Je nach Elektrolytkonzentration und Abstand von der Oberfläche ergibt die Kräftebilanz eine be-

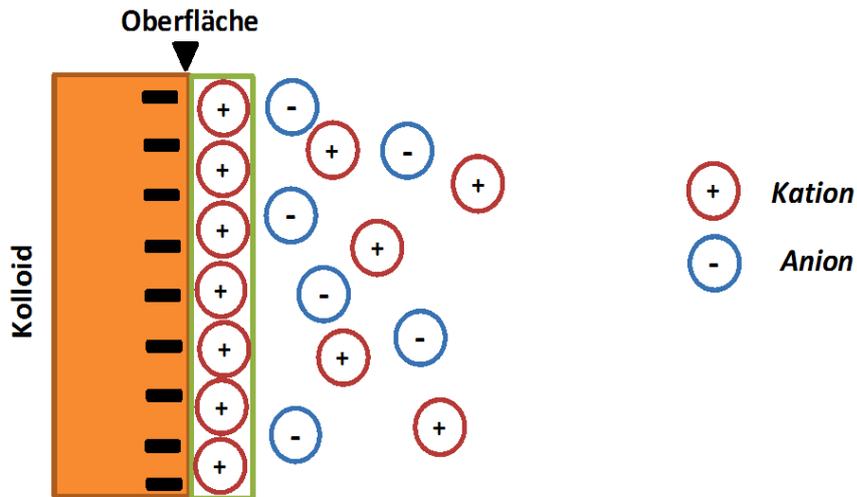


Abbildung 3.3: Elektrische Doppelschicht

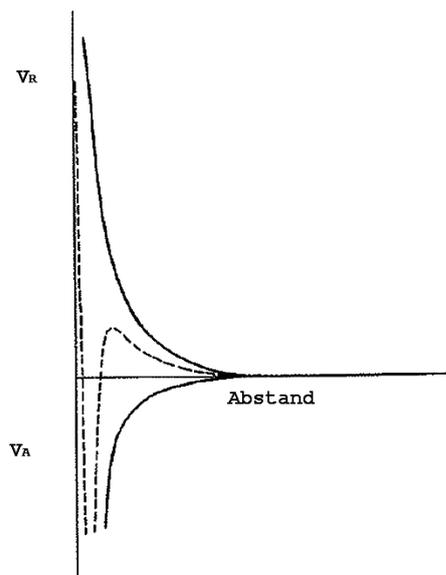


Abbildung 3.4: Bilanz zwischen der Wechselwirkung der elektrischen Doppelschichten und der Anziehungskräfte von van der Waals [Olp63]

stimmte Konfiguration. Es gibt zwei Konfigurationen der Wechselwirkung: bei vorherrschenden repulsiven Kräften ist die Dispersion stabil, bei vorherrschender Anziehungskraft ist sie instabil. Eine instabile Dispersion ist nicht mehr homogen, d.h. die kolloidalen Partikel sind nicht mehr fein verteilt. Den Schritt vom stabilen zu instabilen Zustand nennt man Destabilisierung. Die Destabilisierung der kolloidalen Dispersion ist die vorherige Phase zur Zusammenballen der kolloidalen Partikel. [Olp63]

Die Anwendung der Theorie der Kolloidchemie bei Bentonitsuspensionen begründet die Stabilität einer Bentonitsuspension und ist gleichzeitig der theoretische Ansatz des vorliegenden

Forschungsprojektes. Sie findet unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte statt:

- 1 Ein Bentonitpartikel besteht aus mehreren Silikatschichten, die insgesamt zwar ein paar μm dick sind, aber sie verhalten sich von der Stabilität her wie ein Kolloid. Bentonitpartikel fallen in den Bereich der kolloidalen Dimensionen.
- 2 Die blattförmige Struktur von Bentonit ergibt eine große spezifische Oberfläche des Tonminerals und eine dementsprechend große Kontaktfläche zwischen Teilchen und dispersem Medium.
- 3 Sie verfügen über negative Ladung und ein elektrisches Potential an der Oberfläche.
- 4 Das Wasser dient als Elektrolyt, in dem die Bentonitpartikel dispergiert werden.
- 5 Die Stabilität einer Bentonitsuspension hängt von der Bentonit- und Elektrolytkonzentration ab. Die Suspension ist stabil, wenn die repulsiven Kräfte größer als die Anziehungskräfte sind. In diesem Fall bleibt die Suspension stabil, ohne sich zusammenzuballen.

3.2 Anwendung von Bentonitsuspensionen im Spezialtiefbau

Die mineralische Zusammensetzung von Bentonit und ihr Wasseraufnahmevermögen geben die Möglichkeit, Bentonit zur Bodenverbesserung im Landwirtschaft und als Abdichtung in Bauwesen anzuwenden. Ihre Thixotropie, ihr Fließverhalten und ihre Tragfähigkeit ermöglichen aber die größte Anwendung im Bauwesen. Bentonitsuspensionen dienen als Gleit- und Schmiermittel im Tunnel- und Leitungsbau mittels Rohrvortriebsmaschinen, beim Bau von Schlitzwänden und in horizontalen und vertikalen Bohrungen. [Gmb98] Vielfältige Funktionen hat die Bentonitsuspension im Tunnelbau beim Hydroschild: als Stützmittel der Ortsbrust, als Fördermittel des abgebauten Materials und als Dichtungsmembran an der Ortsbrust bei Stillständen der Maschine.

Das Verfahren eines Hydroschildes, d.h. eines flüssigkeitsgestützten Schildvortriebes, kommt bei Tunnelprojekten mit Sand- und Kiesböden und wechselnder Geologie zum Einsatz. Die Ortsbrust muss dann vollflächig mit einem Wasser-Ton-Gemisch (Bentonitsuspension) gestützt werden, während die Maschine gefahren wird. Die Suspension steht unter Druck in der Abbaukammer und hat die Funktion, den Erd- und Wasserdruck auszugleichen. (Abb.3.5)

Die Suspension wird in der Mischanlage hergestellt und zur Förderleitung in die Abbaukammer geführt. Dort kommt sie mit der Ortsbrust in Kontakt. Bis zu einer bestimmten Tiefe an der Ortsbrust dringt die Suspension ein und bildet einen sogenannten Filterkuchen. Dieser dient als eine Membran, worauf der Druck angewendet und die Ortsbrust gestützt wird.

Die Suspension dient ebenfalls als Fördermittel. Das abgebaute Material an der Ortsbrust wird von der Suspension aufgenommen. Eigenschaften der Suspension wie Thixotropie und Gel-Stärke geben die Möglichkeit, die Partikel vom aufgebauten Boden in die Suspension zu tragen und sich nicht absetzen zu lassen. Die sogenannte aufgeladene Suspension (Suspension und abgebauten Boden) wird zu einer Separationsanlage geführt.

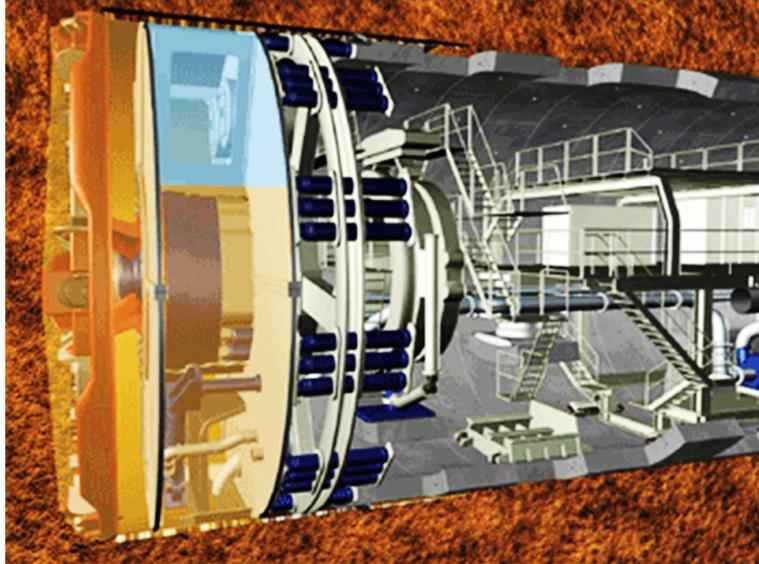


Abbildung 3.5: Hydroshild [Herrenknecht]

3.3 Stand der Technik: Separation und Entsorgung von gebrauchte Bentonitsuspensionen

Eine Separationsanlage hat in erster Linie die Aufgabe, die Trennung von abgebauten Bodenteilchen und gebrauchten Bentonitsuspensionen sicherzustellen. Durch die Separation wird die Suspension regeneriert und zurück in den Suspensionskreislauf geführt, wo sie wieder als Stütz- und Fördermittel verwendet werden kann. Außerdem werden diese Feststoffe, wie Kiese und Sande, deponierbar. Nach mehreren Zyklen von Stützung und Förderung kann die Suspension nicht mehr ihre Funktionen erfüllen und muss einem bestimmten Bereich der Separationsanlage -Feintrennbereich- zugeführt werden. Ziel dieses Feintrennbereiches ist es, die Abscheidung von Feststoffbestandteilen vom Wasser zu gewährleisten.

Heutzutage werden aufwendige mechanische und/oder chemische Verfahren zur Separation von gebrauchten Bentonitsuspensionen, vor allem im Feintrennbereich, eingesetzt. Im Feintrennbereich werden sehr häufig Polymere als Flockungsmittel eingesetzt, um den Trennprozess zu unterstützen.[Ste03]

Die heutige Separation der Bentonitsuspension bedeutet nur die teilweise Trennung der Aufladung von der Bentonitsuspension. Im Folgenden werden drei Nachteile der heute üblichen Regenerierung der Bentonitsuspension erläutert:

1. Sand- und Tonpartikel werden nur teilweise aus der Bentonitsuspension herausgezogen, d. h. die Bentonitsuspension enthält nach der Regenerierung immer noch Bodenpartikel. [Bie10]
2. Der getrennte Boden enthält noch Bentonitpartikel, was die Wiederverwendung zum Beispiel als Ausgleichsschicht beim Straßenbau verhindert. [Gro02]
3. Beide Aspekte führen zu einem Verlust an Bentonitgehalt der Suspension und gleichzeitig zu einer Zunahme des Feststoffgehaltes der Suspension. Ab $1,25 \text{ g/cm}^3$ ist die Suspension

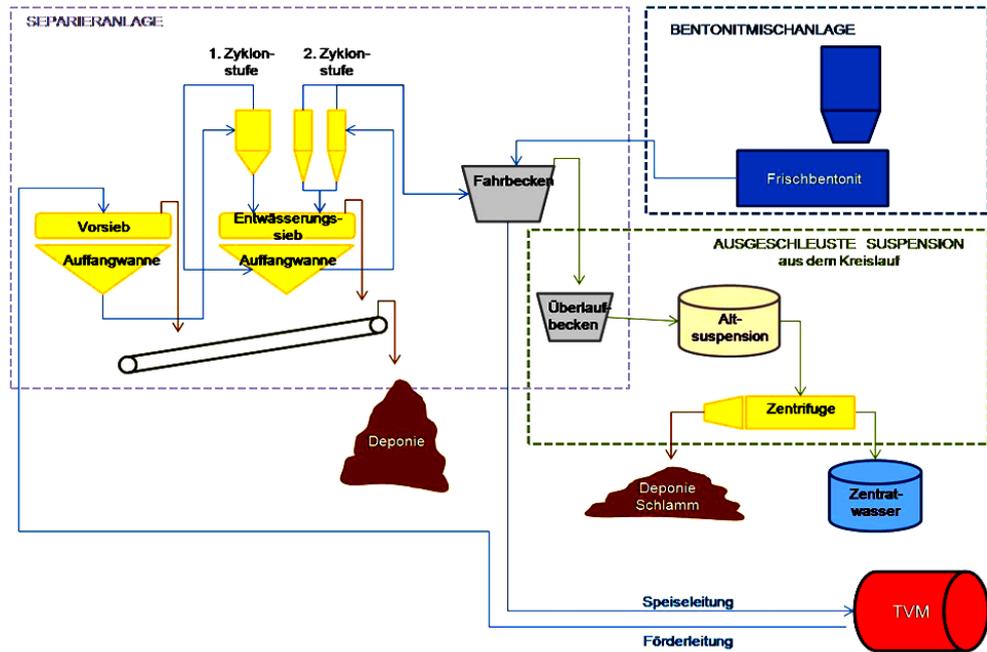


Abbildung 3.6: Skizze einer Separationsanlage [Lip09]

zur Anwendung im Spezialtiefbau nicht mehr geeignet, da die erforderlichen Eigenschaften verloren gegangen sind. [Bie10]

Diese teilweise regenerierte Bentonitsuspension, die ihre Eigenschaften verloren hat, ist nicht mehr im Spezialtiefbau verwendbar und muss ausgetauscht werden. Die Endprodukte nach dem Separationsprozess, Deponieschlamm und Zentratwasser, müssen entweder deponiert oder anderweitig entsorgt werden. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften müssen die Bentonitsuspensionen vor der Deponierung behandelt werden, indem sie eingedickt oder in feste und flüssige Bestandteile getrennt werden. Der Einsatz von Flockungsmitteln kann das Trennverfahren unterstützen, aber er bringt Risiken, wie Überdosierung und der daraus folgenden Kontamination des Wassers und des Bentonits. Flockungsmittel nennt man die Substanz, die die Bentonitteilchen in größere Verbände überführt und durch die das Trennverfahren verbessert werden kann. [Luc04]. Die Trennung mithilfe von Flockungsmittel ist zum Teil sehr zeitaufwendig und nur bedingt wirtschaftlich, so dass es in vielen Fällen kostengünstiger ist, andere Entsorgungs- oder Deponierungsmöglichkeiten auszuwählen. [Ste03] Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die gebrauchten Bentonitsuspensionen für andere alternative Einsätze wiederzubenutzen. Hier sind folgende Einsatzbereiche zu nennen: [Bie10]

1. Das Ausbringen von gebrauchter Suspension kann den Boden in Regionen mit sandigem Ackerland positiv beeinflussen. Eine Analyse auf mögliche Schadstoffe vor dem Ausbringen ist gesetzlich vorgeschrieben. Diese Möglichkeit ist jedoch stark an saisonale und regionale Faktoren gebunden und kann somit nicht überall angewandt werden. In den Niederlanden und im süddeutschen Raum ist dieser Entsorgungsweg grundsätzlich verboten.
2. Eine weitere Option bietet die Entwässerung in Kiesgruben und Entwässerungsmulden. Das Prinzip ist einfach: die gebrauchte Suspension wird in die entsprechende Kiesgrube

geschüttet und unter dem Eigengewicht wird ein Teil der Suspension in den Kiesboden gedrückt und entwässert. Auf der Kontaktfläche zwischen Bentonitsuspension und Kiesboden wird eine Schicht von Bentonitsuspension mit geringem Wasseranteil gebildet. Diese heißt Filterkuchen. Der Filterkuchen wird anschließend abgebaggert und deponiert. Bei den im Bauwesen entstehenden Suspensionsmengen sind mit diesem Verfahren große Flächen und ein hoher Zeitaufwand erforderlich, um diese Volumina verarbeiten zu können.

3. Die dritte Methode ist das Eindicken der Suspension mit Zement bzw. Kalk und anschließender Deponierung nach der heute gültigen Deponieverordnung. Hierbei sind unter anderem folgende Grenzwerte zu beachten: Druckfestigkeit und pH-Wert der Abfälle.

3.4 Prozesse der Elektrokoagulation

Die Basis der Elektrokoagulation liegt in der Elektrolyse. Bei diesem Prozess wird durch einen elektrischen Strom eine Reaktion im Medium erzwungen. Eine Gleichstromquelle sorgt für die elektrische Energie und treibt die Reaktionen voran. Hierbei laufen sogenannte Redox-Reaktionen ab, bei denen die Opferanode aus Metall aufgelöst wird und Metallionen im Medium gelöst werden. Mithilfe der Gesetze der Elektrolyse werden Prozesse wie Massenverlust der Elektroden und Entstehung von Gasen beschrieben.

Die Koagulation von Partikeln, d.h. die Zusammenballung der Partikel zu Flocken erfolgt mittels der Metallionen, die mit den OH-Molekülen (OH^-) entsprechende OH-Spezies bilden. Zum Beispiel $Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$, Aluminiumhydroxid ist eine OH-Spezies. Also dienen diese OH-Spezies als Flockungsmittel. Die Koagulation wird durch die Koagulationstheorie von kolloidalen Partikeln erklärt.

Die Elektrokoagulation ist, im Vergleich zur chemischen Koagulation, umweltfreundlich und erfordert nur eine Reihe von einfachen Arbeitsschritte, die sich unter anderen auch in den Energiekosten niederschlagen. [Hol06]

Die Elektrokoagulation wird bereits seit einigen Jahren als Trennmethode im Bereich Abwasserbehandlung erfolgreich angewendet. Aktuell existiert weder national noch international ein Ansatz, die Elektrokoagulation bei hochkonzentrierten Bentonitsuspensionen einzusetzen.

3.4.1 Physikalisches Prinzip der Elektrolyse

Das Prinzip der Elektrolyse basiert auf einer elektrochemischen Reaktion. Bei diesem Prozess wird die Zersetzung einer Substanz bzw. eines Materials durch Anlegen eines elektrischen Stroms an ein leitendes Medium erzwungen, dabei wird elektrische Energie in chemische Energie umwandelt. Diese Zersetzung wird in Form einer chemischen Reaktion beschrieben. Die angelegten elektrischen Ladungen werden durch diese erzwungenen chemischen Reaktionen transportiert. Chemische Reaktionen, bei denen Ladungen übertragen und aufgenommen werden, werden als Redox-Reaktionen bezeichnet. [Ham]

Als Elektrolysezelle wird die gesamte Einrichtung bezeichnet, die für eine Elektrolyse durchgeführt wird. Diese besteht aus einer Stromquelle, zwei leitenden Materialien, die sog. Elektroden, und einer Elektrolytlösung. Die Eigenschaften einer Elektrolysezelle werden im Folgenden beschrieben.

Galvanische vs. Potentiostatische Methode

Eine Gleichspannungsquelle sorgt für die elektrische Energie und treibt die Reaktionen voran. Hierbei laufen sogenannte Redoxreaktionen ab, bei denen Elektronen übertragen werden. Die Oxidationsprozesse finden am Pluspol (Anode) statt, die Reduktionsprozesse am Minuspol (Kathode), d.h. die einzelnen Prozesse sind räumlich teilweise voneinander getrennt. Die Anwendung eines elektrochemischen Prozesses kann hauptsächlich durch die Einstellung der Stromstärke und der Spannung in zwei Methoden klassifiziert werden. Die Methode, bei der eine konstante Stromstärke durch die Zelle fließt, wird als galvanostatische Methode bezeichnet. Im Vergleich dazu wird bei der potentiostatischen Methode ein konstantes Potential angelegt. [Bar01]

Leitfähigkeit

Um den angelegten elektrischen Strom durch die Zelle transportieren zu können, müssen die Elektroden gute elektrische Leiter sein und durch ein leitfähiges Medium miteinander verbunden sein. Das leitfähige Medium, das als „Brücke“ zwischen 2 Elektroden dient, wird Elektrolytlösung genannt. Das Material der Elektroden und die Zusammensetzung der Elektrolytlösung spielen eine wichtige Rolle.

Leitende Materialien können in zwei Gruppen klassifiziert werden: elektrische Leiter 1. Art und 2. Art: [Den65]

- Elektrische Leiter 1. Art sind die erste Gruppe. Sie sind hauptsächlich feste oder schmelzende Metalle, die den Strom leiten ohne sich chemisch zu ändern. Der elektrische Strom fließt wegen der vollständigen reinen Elektronenmigration, die die angewendete elektrische Spannung bewirkt. In diesem Fall werden keine Atome von dem Elektrodenstoß abgespalten und der Stoff verändert sich nicht. Hierzu gehören die Elektroden.
- Die zweite Gruppe nennt sich elektrische Leiter 2. Art und besteht aus schmelzendem Salz. Im Vergleich zum elektrischen Leiter 1. Art werden sie chemisch verändert, wenn der Strom durchfließt. In diesem Fall dient der Elektronentransport nicht nur dem Stromfluss sondern auch dem Stofftransport. In Folge dieses Stofftransports kommt es zu chemischen Veränderungen. Zu dieser Gruppe gehört die Elektrolytlösung.

Die Temperaturabhängigkeit von den elektrischen Leitern ist je nach Art unterschiedlich. Elektrische Leiter 1. Art (Elektroden) mit abnehmendem Reinheitsgrad haben aufgrund des un-symmetrischen Gitteraufbaus des Materials eine geringere Leitfähigkeit. Die Reibungskraft der Leitelektroden steigt mit sinkender Leitfähigkeit an. Beim Anlegen einer konstanten Stromstärke ist die Geschwindigkeit der Elektronen im Leiter je nach Reinheitsgrad des Elektrodenmaterials unterschiedlich. Je geringer der Reinheitsgrad ist, desto höher ist die Reibungskraft und desto höher ist die Energie, die zum Ladungstransport durch das Material benötigt wird. Diese aufgewendete Energiemenge wird in Form von Wärme wieder abgegeben, wobei die Elektroden sich mit der Zeit erwärmen. [Sch03]

Im Gegensatz dazu führt die Erwärmung von Leitern 2. Art, in diesem Fall von der Elektrolytlösung, zur Steigerung der Leitfähigkeit. D.h. je höher die Temperatur der Elektrolytlösung ist, desto schneller ist die Wanderung der geladenen Teilchen zu den jeweiligen Elektroden. [Sch03]

Im Folgenden werden einige Beispiele genannt. Allgemein sind alle Metalle gute elektrische Leiter und eignen sich als Elektroden sehr gut. Je nach Art des Metalls können die Eigenschaften der Elektroden unterschiedlich sein, wie z.B. die Zersetzungs-, Wärme-, und Leitfähigkeit. Eine

Elektrolytlösung ist eine leitende wässrige Lösung, Auch die Eigenschaften der Elektrolytlösung können durch Zugabe oder Abnahme von Salzen eingestellt werden.

In der Regel wird die Leitfähigkeit (σ) eines Leiters mithilfe seines spezifischen Widerstands (ρ) festgelegt, die den I R-Spannungsabfall durch einen Leiterschnitt beschreibt. [Den65] Demzufolge ist der Widerstand (R) von dem spezifischen Widerstand, dem Leiterquerschnitt und der Leiterlänge (l) abhängig.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{a} \quad (3.1)$$

- R [Ω]
- ρ [$\Omega \text{ m}$]
- l [m]
- a [m^2].

Gleichartig wird der Widerstand beschrieben.

$$\rho = \frac{R \cdot a}{l} \quad (3.2)$$

Die Leitfähigkeit k eines elektrolytischen Leiters wird im Allgemeinen durch die Einheit, die der reziproke Wert des Widerstandes hat, gezeigt.

$$k = \frac{l}{R \cdot a} \quad (3.3)$$

Die Einheit der Leitfähigkeit k kann [$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$] oder [Sm^{-1}] sowie ihr Vielfaches sein.

Bei elektrochemischen Reaktionen kann die Leitfähigkeit mithilfe des Salzes oder deionisierten Wassers reguliert werden und das beeinflusst nicht den pH-Wert der Lösung. [Koy02] In der Regel wird NaCl benutzt, um den Leitfähigkeitswert festzusetzen. Außerdem ist die Beziehung zwischen Leitfähigkeitswert und Salzgehalt (NaCl) linear.

Die spezifische Leitfähigkeit und damit der spezifische Widerstand sind stark von der Zusammensetzung des verwendeten Materials abhängig, so ist der spezifische Widerstand von reinem Eisen ca. 7 bis 10-fach größer als von reinem Aluminium unter den gleichen Bedingungen. Auch der spezifische Widerstand von Metallegierungen kann je nach Zusammensetzung stark voneinander abweichen.

Je nach Art des verwendeten Materials kann der spezifische Widerstand außerdem durch Temperaturänderungen beeinflusst werden. Bei Leitern 1. Art nimmt der Widerstand aufgrund der Schwingungsweite der Atome des Kristallgitters und damit der Bewegungshemmung der in Leiterrichtung strömenden Elektronen mit steigender Temperatur zu. [Fle09]. Im Gegensatz dazu nimmt der Widerstand von Leitern 2. Art mit steigender Temperatur ab. Die Abhängigkeit eines Widerstandes von der Temperatur ist auch vom Material abhängig. Bei gleicher Temperaturänderung nimmt der spezifische Widerstand zum Beispiel von reinem Eisen schneller als der spezifische Widerstand von reinem Aluminium zu.

Das Ohm'sche Gesetz besagt $U = R \cdot I$, wobei U die Spannung in V, I die Stromstärke in A und R der Widerstand in Ω ist. D.h. dass die Stromstärke I, die durch einen Leiter fließt und der Spannungsabfall U zwischen den zwei Seiten des Leiters direkt proportional sind.

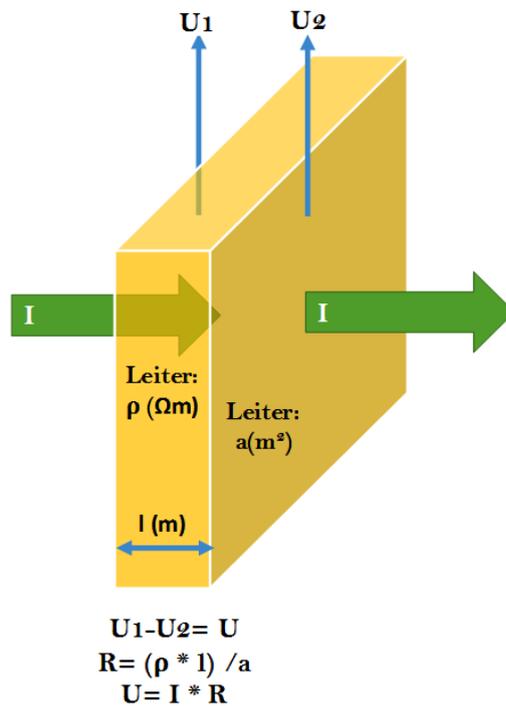


Abbildung 3.7: Skizze des Ohm'schen Gesetzes

(Abb. 3.7) Der Proportionalitätsfaktor ist der Widerstand R, der die Eigenschaft des Leiters besitzt.[Den65]

Elektrodenprozesse: Chemische Reaktionen der Elektrolyse

Beim Anlegen eines elektrischen Stroms werden die angeschlossenen Elektroden durch die Richtung des Ladungstransports polarisiert. Je nach entstehendem Pol, positiv oder negativ, werden die Elektroden als Kathode oder Anode zugeordnet. (Abb.3.8)

Diejenige Elektrode, aus welcher die negative Ladung in die Elektrolytlösung eintritt, oder, wenn positive Ladungen (Kationen) die Elektrolytlösung verlassen, wird als Kathode bezeichnet. In chemischer Hinsicht bedeutet dies, dass an der Oberfläche der Kathode eine Elektronenaufnahme, die sog. Reduktionsreaktion, stattfindet. Da die Kathode als „Elektronenquelle“ in der Elektrolytlösung dient, wird sie als Minuspol definiert.

Minuspol: Reduktionsreaktion an der Kathode eines beliebigen Elements E



Umgekehrtes Verhalten zeigt die zweite vorhandene Elektrode. Hier verlässt negative oder neutrale Ladung die Lösung oder positive Ladung tritt in die Lösung ein. An dieser Elektrode findet eine Elektronenabgabe statt, also eine sogenannte Oxidationsreaktion. Elektroden, in denen Oxidationsreaktionen stattfinden, werden Anoden genannt. In manchen Fällen findet eine Oxidation des Anodenmaterials selbst statt. Es tritt also eine anodische Auflösung auf, die durch die folgende Reaktion beschrieben lässt.[Ham]

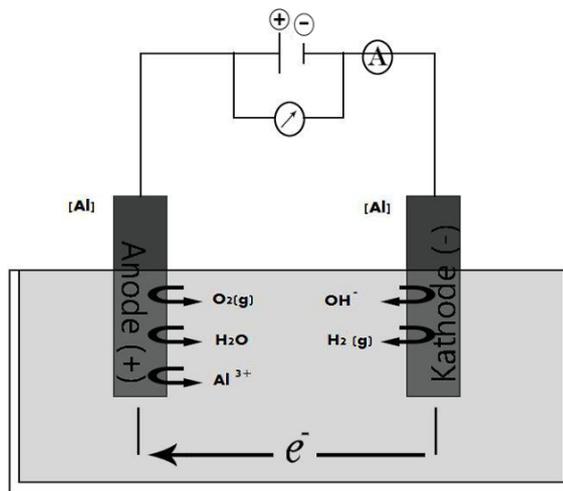


Abbildung 3.8: Skizze der Elektrolyse

Pluspol: Oxidationsreaktion an der Anode eines beliebigen Elements M



Die oben vorgestellten Reaktionen laufen während der Elektrolyse parallel ab. Aus diesem Grund werden sie als elektrochemische Redoxreaktionen bezeichnet. [Ham]

Die entstehenden Potentiale zwischen Anode und Kathode werden anhand einer Galvanischen Zelle und einer Elektrolyse Zelle beschrieben. Eine Galvanische Zelle ist eine Vorrichtung, bei der der umgekehrte Vorgang einer Elektrolyse stattfindet. Dabei läuft die Redoxreaktion freiwillig ab, d.h. ohne Anlegen einer externen Spannung.

Zwischen Elektrodenoberfläche und Elektrolytlösung einer stromlosen Zelle (Galvanische Zelle) wird aufgrund ihrer Ladungen ein elektrisches Potential aufgebaut (siehe Abbildung 3.9).

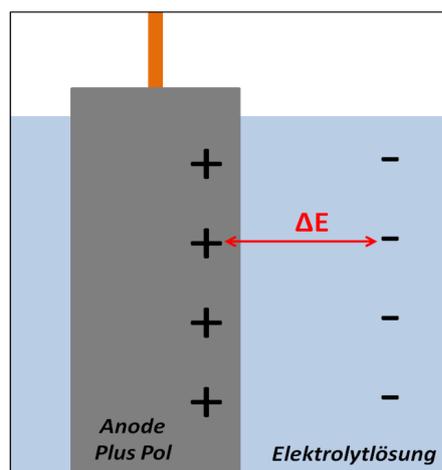


Abbildung 3.9: Skizze des Potentials an der Grenzoberfläche Anode-Elektrolyt

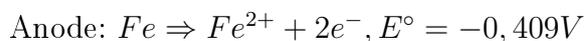
Durch das entstandene Potential wird die weitere Auflösung von Ionen aus der Anode limitiert. Gleichzeitig wird ein weiterer Teil der vorhandenen Ionen in der Lösung zur Kathode

angezogen und zum Teil aufgenommen. Wenn die Anzahl der in Lösung gehenden und die aus der Lösung an das Metall zurückkehrenden Ionen übereinstimmt, hat sich an der Elektrode ein Gleichgewicht eingestellt. Unter diesen Bedingungen besteht zwischen Metallelektrode und Lösung ein definiertes Potential. „Dieses definierte Potential ist ein quantitatives Maß für den Elektronendruck in der Elektrode. Der absolute Wert dieses Potentials kann nicht gemessen werden, da eine zweite Elektrode notwendig ist, deren Potential ebenfalls nicht bekannt ist. Möglich ist es aber, das relative Potential zu einer Referenzelektrode zu messen“. [Mor10]. Als Referenzelektrode dient die Norm-Wasserstoff-Elektrode, die definitionsgemäß ein Potential von $E^\circ = 0,00$ Volt hat. Das elektrische Potential einer Elektrode gegen die Norm-Wasserstoff-Elektrode nennt man Normalpotential. Es wird mit dem Symbol E° bezeichnet. Das Vorzeichen des gemessenen Potentials zeigt an, welche chemische Reaktionen an der Oberfläche der Elektroden ablaufen. Ein positives Vorzeichen bezieht sich auf eine Elektrode, bei der im Vergleich zur Norm-Wasserstoff-Elektrode eine Reduktion freiwillig abläuft. Ein negatives Vorzeichen bezieht sich somit auf eine Elektrode, bei der eine Oxidation freiwillig abläuft. Mit den Normalpotentialen aus der elektrochemischen Spannungsreihe lässt sich der Ablauf von Redoxreaktionen in einer elektrochemischen Zelle voraussagen. Im Falle einer Elektrolyse können Redoxreaktionen, die laut elektrochemischer Spannungsreihe nicht freiwillig ablaufen, erzwungen werden. [Mor10]

Metalle, die in der elektrochemischen Spannungsreihe ein negativeres Potential aufweisen, lassen sich leichter oxidieren, d.h. sie dienen als Reduktionsmittel und gehören somit zu den unedlen Metallen. Edle Metalle weisen ein positiveres Potential auf und lassen sich sehr schwer oder gar nicht oxidieren, im Gegensatz dazu lassen sie sich gut reduzieren und sind gute Oxidationsmittel. wie z. B.: Silber, Gold und Platin. Um feststellen zu können, ob eine Redoxreaktion freiwillig oder erst beim Anlegen einer Spannung abläuft, muss die Elektromotorische Kraft (EMK) ermittelt werden. Die EMK lässt sich aus der Summe der Normalpotentiale einzelner Elektroden bestimmen. [Mor10]

$$EMK = \Delta E^\circ = E^\circ_{(Kathode)} + E^\circ_{(Anode)} \quad (3.6)$$

Für $EMK > 0$ läuft die Redoxreaktion freiwillig ab. Für $EMK < 0$ findet keine Redoxreaktion freiwillig statt, sondern erst beim Anlegen einer Spannung kann die Redoxreaktion zustande kommen, das ist der Fall einer Elektrolyse. Die erforderliche angelegte Spannung muss über dem ermittelte EMK-Wert liegen, da oft eine Überspannung für den Antrieb der Reaktion notwendig ist. Zum Beispiel: Für eine Zelle Y mit reiner Eisenanode und Platinkathode in saurem wässrigem Medium kann folgende Reaktion stattfinden



$$EMK = \Delta E^\circ = E^\circ_{(Kathode)} + E^\circ_{(Anode)} = 1,229 + (-0,409) = 0,820V$$

Die einzelnen Standardpotentiale sind aus der Tabelle der elektrochemischen Spannungsreihe. [Mor10]. Diese Reaktion läuft nach dem EMK-Wert freiwillig ab. Das bedeutet, dass elementares Eisen in Kontakt mit Wasser in einem belüfteten sauren Medium spontan oxidiert werden kann. Dieser Vorgang wird meist als Korrosion bezeichnet.

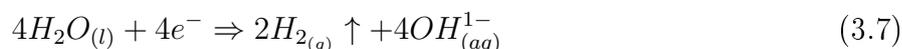
In dem Fall einer Zelle X mit $EMK < 0$ und mit reinem Aluminiumanode und Platinkathode in alkalischer wässriger Elektrolytlösung ohne äußere zugeführte Spannung oder Strom würde eine Redoxreaktion im Gegensatz zu Eisenanode nicht freiwillig ablaufen, weil Aluminium ein negativeres Potential ($E^\circ(\text{Al}) = -1,66$ V) gegenüber Wasser ($E^\circ = +0,401$) unter alkalischen

Bedingungen hat. Damit diese Redoxreaktion ablaufen kann, ist das Anlegen einer Mindestspannung erforderlich, auch als Zersetzungsspannung E_z bekannt. Die Zersetzungsspannung E_z ist von dem Standardpotential E° , dem pH-Wert der Elektrolytlösung, von der Konzentration der Oxidations- und Reduktionsmittel in mol/l, von der Wertigkeit der Ionen n und von der Temperatur T in K abhängig. [Mor10]

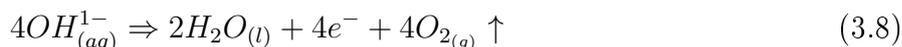
Wenn die Zersetzungsspannung für die Zelle X erreicht wird, sind eine Reduktion an der Kathode und eine Oxidation des Metalls (Material der Anode) an der Anode zu erwarten. Aluminium ist im Gegensatz zu anderen unedlen Metallen sehr gut korrosionsbeständig. An seiner Oberfläche bildet es in Kontakt mit Luftsauerstoff eine schützende Oxidschicht, die eine direkte Oxidation im Wasser zu $Al^{(3+)}$ verhindert. Aus diesem Grunde findet es zur Beginn der Elektrolyse nur die Oxidation des Wassers.

Wir betrachten zunächst die Wasserelektrolyse in einem alkalischen Medium [Mor10]:

Reduktion von Wasser an der Kathode



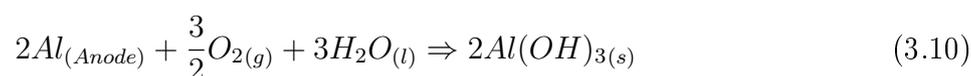
Oxidation von Wasser an der Kathode



Während der Elektrolyse werden Wasserstoff- und Sauerstoffgas freigesetzt. Die Entstehung dieser Gase in einem System, ohne dass sie getrennt werden, könnte zu einer Knallgasreaktion führen. Nach der Zerstörung der schützenden Oxidschicht an der Oberfläche der Aluminiumanode findet ein weiterer Oxidationsprozess statt. Durch höhere Spannung und angelegte Stromstärke wird ein Aluminiumatom durch Kontakt mit dem Elektrolyten aus dem Metallgitter (Anode) herausgelöst, sodass drei Valenzelektronen des Aluminiumatoms im Metallgitter zurückbleiben. Diesen Metall auflösenden Reaktionsschritt (Oxidationsschritt) bezeichnet man als anodische Teilreaktion:



Das im Elektrolyten gelöste Aluminiumatom $Al^{(3+)}$ reagiert unter alkalischen Bedingungen mit dem Hydroxid-Ion OH^- unter Bildung und Abscheidung von schwerlöslichem Aluminiumhydroxid $Al(OH)_3$. Die Geschwindigkeit des Oxidationsprozesses der Aluminiumanode wird im Wesentlichen durch den Zutritt von Sauerstoff bestimmt. Die Bruttoreaktion bei der Oxidation von Aluminium in einem neutralen bis leicht alkalischen, belüfteten, wässrigen Elektrolyten ist dann folgende [Ost07]:



Der Sauerstoffbedarf kann durch die zweite Reaktion (Oxidation des Wassers) an der Anode gedeckt werden. Unter der Annahme, dass alle Sauerstoffmoleküle, die durch die Wasserelektrolyse entstanden sind, mit den Aluminium-Atomen aus der Elektrode reagieren, ist die Berechnung einer abschätzbaren Menge an Aluminiumhydroxid, die gebildet wird, möglich.

Physikalische Grundgesetze der Elektrolyse

Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Strom, Material und Verbrauch der Anode sowie der Elektrokoagulationszeit gelten folgende physikalischen Gesetze:

Faraday'sche Gesetze

Der Zusammenhang zwischen transportierter Masse und Ladung wird durch die beiden Faraday'schen Gesetze beschrieben.

1. Faraday'sches Gesetz:

„Die Masse m des abgeschiedenen Stoffes ist zur transportierten Ladungsmenge $Q = I \cdot t$ proportional. Sie hängt weder von der Geometrie der Elektroden noch von der Konzentration des Elektrolyten ab“ [Nyl].

Für die Bestimmung der transportierten Masse m wird die Stoffmenge n mit der molaren Masse M multipliziert: $m = n \cdot M$. Die Stoffmenge n errechnet sich aus der Division von Molekülanzahl N durch die Avogadro-Konstante N_A :

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (3.11)$$

Die Molekülanzahl N lässt sich auch aus dem Quotienten aus transportierter Ladung Q und Ladung je transportiertem Molekül $z \cdot e$ (e ist die Elementarladung, $e = 1,60217653 \cdot 10^{-19} C$) errechnen:

$$N = \frac{Q}{z \cdot e} = \frac{I \cdot t}{z \cdot e} \quad (3.12)$$

Mit den Gleichungen 3.11 und 3.12 gilt für die Masse in Abhängigkeit der transportierten Ladung:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot N_A \cdot e} \quad (3.13)$$

Die Gleichung 7.1 entspricht dem ersten Faraday'schen Gesetz. Hiermit ist es möglich, die abgeschiedene Masse m für eine bestimmte elektrische Ladung Q zu errechnen.

Wie viel kg eines Stoffes bei einer Stromstärke von 1 A in 1 s abgeschieden werden, kann durch den Quotient aus molarer Masse M und dem Produkt aus $z \cdot N_A \cdot e$ bzw. $z \cdot F$ (F =Faraday-Konstante = $N_A \cdot e = 96485 As/mol$) oder aus dem Quotient zwischen abgeschiedener Masse m und elektrischer Ladung Q bestimmt werden. Dieser Quotient mit der Einheit kg/As wird als elektrochemisches Äquivalent A_q bezeichnet.

2. Faraday'sches Gesetz:

„Die von gleichen Elektrizitätsmengen abgeschiedenen Massen (elektrochemische Äquivalente) verhalten sich wie die Molmassen je Wertigkeit“ [Nyl].

$$A_q = \frac{M}{z \cdot F} = \frac{m}{Q} \quad (3.14)$$

Gemäß der Gleichung 3.14 ist die Masse m proportional zur molaren Masse M , aber umgekehrt proportional zur Wertigkeit z (Anzahl der Elementarladungen).

Berechnung der abgeschiedenen Masse m der Aluminiumanode bei der Elektrokoagulation

Während der Elektrolyse entstehen nicht nur feste, sondern auch gasförmige Substanzen, die vom gesamten Prozess nicht auszuschließen sind und vor allem bei der Elektrolyse von wässrigen Lösungen betrachtet werden müssen.

Wie bereits beschrieben werden Sauerstoff und Wasserstoff während der Elektrolyse wässriger Lösungen freigesetzt. Die Menge an entstehenden Gasen ist in diesem Fall aufgrund des möglichen Auftretens einer Knallreaktion zu bestimmen.

Das Volumen des Gases, das während der Elektrolyse freigesetzt wird, lässt sich mithilfe der Gesetze von Charles und Gay-Lussac, Boyle-Mariotte, Avogadro und des Faraday'schen Gesetzes näherungsweise bestimmen.

Im 16. Jahrhundert stellten der Ire Robert Boyle (1662) und der Franzose Edme Mariotte (1676) fest, dass für ideale Gase bei konstanter Temperatur T und Stoffmenge n das Volumen V umgekehrt proportional zum Druck p ist (Isotherme Zustandsänderung).

$$V_{(T,n)} \approx p \quad (3.15)$$

1787 wurde von Jacques Charles und 1802 von Joseph Louis Gay-Lussac erkannt, dass ein Gas sich bei einer Erwärmung ausdehnt und bei einer Abkühlung zusammenzieht. Dieser Zusammenhang wird durch das erste Gesetz von Charles und Gay-Lussac beschrieben. Dies besagt, dass das Volumen V einer bestimmten Stoffmenge n eines idealen Gases bei konstantem Druck p direkt proportional zur Temperatur T ist (isobare Zustandsänderung).

$$V_{(p,n)} \approx T \quad (3.16)$$

Ein paar Jahren später, 1811, erkannte Amedeo Avogadro den Zusammenhang zwischen Teilchenanzahl, Temperatur, Druck und Volumen. Er sagte aus, dass zwei gleich große Gasvolumina, die unter demselben Druck stehen und die dieselbe Temperatur haben, auch dieselbe Teilchenzahl haben. Aus diesem Zusammenhang ist die universelle Gaskonstante R entstanden. [Sch10]

Mit den oben genannten Gesetzen wird der Zustand eines idealen Gases einer reinen Substanz durch vier Parameter, die sogenannten Zustandsgrößen oder Zustandsvariablen, eindeutig beschrieben [Voi13]:

$$p = n \cdot R \cdot T \quad (3.17)$$

- p = Umgebungsdruck [Pa]
- V = theoretisch erzeugtes Gasvolumen [m^3]
- T = Umgebungstemperatur [K]
- R = universelle Gaskonstante $8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ($1\text{J} = 1\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$)
- n = Stoffmenge [mol]

Mit dem Zweiten Faraday'schen Gesetz und der stoffmengenbezogenen Zustandsgleichung für Gase lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem fließenden Strom und der theoretisch erzeugten Gasmenge des Elektrolyseurs herstellen.

Aus 3.12 folgt:

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad (3.18)$$

Aus 3.18 folgt:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} \quad (3.19)$$

Verbindet man beide Formeln, lässt sich das Gasvolumen wie folgt berechnen:

$$V = \frac{I \cdot t \cdot R \cdot T}{z \cdot F \cdot p} \quad (3.20)$$

3.4.2 Koagulation von kolloidalen Suspensionen

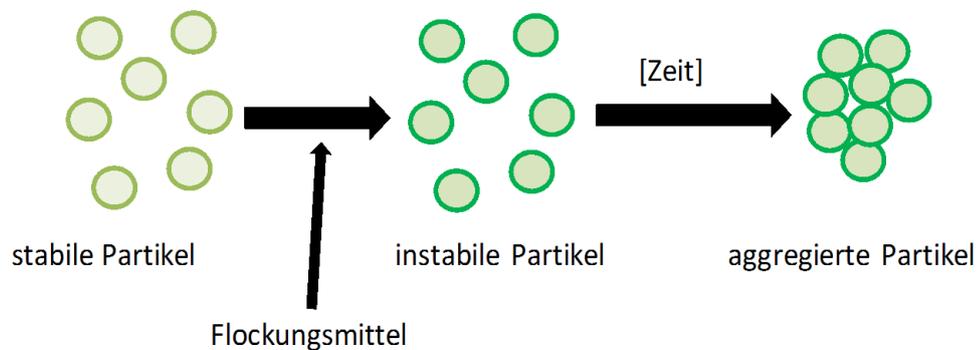


Abbildung 3.10: Stabile, instabile und aggregierte Partikel. [Hol02]

Die Koagulation beschreibt den Mechanismus des Zusammenballens von Partikeln einer Suspension. Mittels Koagulation schließen sich sehr kleine und daher nicht mehr sedimentierbare Feststoffteilchen zu größeren und abtrennbaren Flocken zusammen. [Olp63]. Das Prinzip der Koagulation besteht aus der Destabilisierung einer kolloidalen Dispersion und dem folgenden Zusammenballen der destabilisierten kolloidalen Partikel. (Abb.3.10). Eine Destabilisierung bedeutet eine Wandlung von stabilem zu instabilem Zustand.

Die Koagulationsmechanismen basieren auf der Wechselwirkung des Flockungsmittels mit dem behandelten Medium. Der Prozess der Koagulation ist pH-abhängig [Olp63].

Vielen Experimenten (Ghernaout, 2008)[Ghe08], (Canizares, 2007)[Can07], (Holt, 2006) [Hol06] zur Abwasseraufbereitung mittels Koagulation zufolge werden die Koagulationsmechanismen nach pH-Wert kategorisiert. In diesen Fällen ist das Abwasser die kolloidale Dispersion und die organischen Partikel dienen als kolloidale Partikel. Im Großen und Ganzen können die Koagulationsmechanismen folgendermaßen zusammengefasst werden.

- Bei saurem pH-Wert wird die Koagulation durch die Neutralisierung der oberflächlichen Ladungen der Partikel via Absorption von den monomeren Komponenten durchgeführt.
- Bei alkalischem pH-Wert wird die Koagulation durch die Absorption der OH-Spezies abgewinkelt. Der Begriff OH-Spezies wird später erläutert.

- Bei neutralem pH-Wert werden die oben genannten Mechanismen kombiniert.

Koagulation beschreibt eine Assoziation von Partikeln. Wenn die kolloidalen Partikel blattförmig sind, gibt es zwei verschiedene Arten von Partikelassoziation: „Flokkulation“ und „Koagulation“. [Cae11]. Einerseits bedeutet der Begriff „Flokkulation“ eine lose Vereinigung von blattförmigen Partikeln. Die Suspension verändert sich zur so genannten „Kartenhausstruktur“. Andererseits bedeutet der Begriff „Koagulation“ (oder „Aggregation“) eine Zusammenpressung zwischen elektrischen Doppelschichten, welche ihrerseits Flocken bildet. Der Prozess, durch den ein instabiles kolloidales System aggregiert wird, nennt man auch Koagulation. Koagulation kann mithilfe chemischer Zusatzstoffe durchgeführt werden; man nennt diesen Vorhang chemische Koagulation. Alternativ wird die Koagulation mithilfe des Einsatzes von Gleichstrom durchgeführt (Elektrokoagulation). Der markanteste Unterschied zwischen chemischer und elektrochemischer Koagulation ist die Dosierung des Flockungsmittels. Das Flockungsmittel kann als chemischer Zusatzstoff oder als aufgelöster Zusatzstoff mithilfe der Elektrolyse hinzugefügt werden. [Bea04]

Aus Sicht des Umweltschutzes hat die chemische Koagulation hinsichtlich der Elektrokoagulation mehrere Nachteile. Einerseits erfordert die chemische Koagulation den manuellen Einsatz der chemischen Zusatzstoffe. Hier werden organische Polymere angewendet, die in der Regel umweltschädlich sind [Luc04]. Wegen des manuellen Einsatzes ist die Dosierung der chemischen Zusatzstoffe nicht leicht zu kontrollieren; demzufolge gibt es das Risiko der Überdosierung. Bei entsprechender Akkumulierung der chemischen Stoffe kann dies sogar die Wiederverwendung des Bentonits verhindern. Ein weiteres Risiko besteht darin, dass das getrennte Wasser nicht der öffentlichen Kanalisation zugeführt werden kann. Darüber hinaus produziert die chemische Koagulation größere Mengen von Schlämmen als die Elektrokoagulation, was zu Schwierigkeiten bei der Entsorgung führt. [Bea04], [Vik84]

Ein weiterer Nachteil der chemischen Koagulation ist der erhöhte Zeitbedarf. Das führt dazu, dass der chemische Prozess mit Schwierigkeiten und Risiken verbunden ist.

Im Gegensatz zu der chemischen Koagulation besitzt die Elektrokoagulation mehrere Vorteile. Die Dosierung des Flockungsmittels wird durch die elektrische Reaktion an der Elektrode durchgeführt, wodurch das Risiko von Überdosierung eliminiert wird. Durch Elektrokoagulation wird nicht nur weniger Schlamm erzeugt, sondern der Schlamm ist auch stabiler, was dazu führt, dass die Flocken weniger gebundenen Wasserinhalt haben. Demzufolge wird mithilfe der Elektrokoagulation eine große Menge von Wasser wieder frei verfügbar. [Vik84]

3.4.3 Anwendung der Elektrokoagulation an Abwasseraufbereitung

Die Elektrokoagulationstechnologie wird heutzutage erfolgreich benutzt, um metallische und kolloidale Partikel sowie anorganische Schadstoffe durch den Einsatz von Metallelektroden zu entfernen. Die bekannteste Anwendung dieser Technik liegt bei der Abwasseraufbereitung. [Hol06]. Das Ziel ist die Reinigung des Wassers von verschiedenen Störstoffen ohne den Einsatz von Chemikalien, organischen Polymeren oder anorganischen Salzen. Die Entwicklung dieser Elektrokoagulationstechnologie reicht über 100 Jahre zurück und wird zur Abwasserreinigung in der Industrie sowie zur Trinkwasseraufbereitung eingesetzt. Klärwasseranlagen nach diesem Prinzip wurden ab dem Jahr 1889 in England genutzt. Das Ziel dieser ersten Anlagen war die Wasserdesinfizierung. [Vik84]

Insbesondere in den USA wurde die Entwicklung der Elektrokoagulationstechnologie vorangetrieben. Dabei wurden einige Patente veröffentlicht: das erste US Patent zu diesem Thema

stammt aus dem Jahr 1906 von A. E. Dieterich, „Electric water purifier“. Hier wird ein sogenannter Elektrokoagulations-Reaktor beschrieben. Verschiedene Variationen dieses Systems existieren hinsichtlich der Elektrolysezelle, der Anzahl und der Position der Elektroden, etc. im Hinblick auf eine Prozessoptimierung im spezifischen Anwendungsfall.

Einige U.S. Patente für die Behandlung von wasserförmigen und viskosen Flüssigkeiten und Schlämmen mithilfe der Elektrokoagulation sind:

- U.S. Patent No: 6 719 894, „Process for electrocoagulating waste fluids“, (Tom Gus Gravel et al. -2004)
- U.S. Patent No: 7 087 176, „High pressure process and apparatus for the electrocoagulative treatment of aqueous and viscous fluids“, Tom Gus Gravel et al.-2006 Diese werden von der amerikanischen Firma Ecolotron Inc. gehalten und beziehen sich auf einen Elektrokoagulations-Reaktor names E-Floc. Dazu existieren ein europäisches Patent EP 1 575 875 und eine internationale Publikationsnummer WO 20050613959. Der Einsatzbereich von E-Floc erstreckt sich laut Herstellerangaben auf die kommunale und industrielle Abwasserreinigung in den Bereichen Galvanisierungstechnik, Ethanol-Produktion und Landwirtschaft. In Europa wurden in den letzten Jahrzehnten an einigen Instituten und Universitäten Forschungsarbeiten zum Einsatz der Elektrokoagulation bei der Abwasserbehandlung für verschiedene Industriezweige mit hohem Wasserverbrauch im Produktionsprozess, wie z.B. der Lebensmittelindustrie oder Textilindustrie, durchgeführt.



Abbildung 3.11: Industrieprototyp einer Elektrokoagulationsanlage für Abwasser [dEayE]

In Europa wurden in den letzten Jahrzehnten Forschungsarbeiten zum Einsatz der Elektrokoagulation bei der Abwasserbehandlung durchgeführt. Insbesondere ist der Einsatz dieser Technik für verschiedene Industriezweige mit hohem Wasserverbrauch wünschenswert (Abb. 3.11). Zum Beispiel wurden an der Universität von Alicante (Spanien) Forschungen zum Einsatz der Elektrokoagulation bei der Abwasserbehandlung durchgeführt. Das Ergebnis der Arbeiten mündete in die Entwicklung eines patentierten Elektrokoagulationsreaktors TREAC 1000. Dieses System hat im Einsatz gute Resultate in der Lebensmittelindustrie und bei der Eliminierung von Metallen aus Abwässern erzielt.

Weitere Forschungsarbeiten in Europa sind:

- Bei einer Fischeaufzuchtstation „Fishtankrecirc“ in Alesund (Norwegen) wird das Prinzip der Elektrokoagulation zur Reinigung und Aufbereitung des Brauchwassers in der Aquakultur eingesetzt. So kann das Wasser immer wieder dem Kreislauf zugeführt werden.

(Quelle: <http://www.fishtankrecirc.com/wip4/> vom 22.03.2011)

- Am Imperial College von London (UK) existiert ebenfalls ein Elektrokoagulationsreaktor zur Abwasserbehandlung.

(Quelle: <http://www3.imperial.ac.uk/electrochemicalengineering/research/projects/electrocoagulation/> vom 23.03.2011)

Es muss betont werden, dass bei bestimmten Experimenten zur Elektrokoagulation von Abwasser kein echtes sondern, im Labor hergestelltes Abwasser benutzt wurde. Das simulierte Abwasser wurde mittels der Hinzufügung von Abwassermaterialien hergestellt. Die kolloidalen Partikel und Schwebstoffe im Abwasser wurden mittels Tonpartikeln simuliert. Tone wie Bentonite und Kaolinite wurden ebenfalls verwendet. Die angewendeten Konzentrationen sind deutlich niedriger als jene Bentonitsuspensionen, die im Spezialtiefbau und Tunnelbau zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden zwei Beispiele erläutert.

Das erste Beispiel bezieht sich auf die Forschungsarbeit vom Team Bebeslea et al. 2006 [Beb06]. Sie haben Bentonite benutzt, um Schwebstoffen in Abwasser von Papier- und Zellstoffindustrie zu simulieren. Die angewendete Konzentration lag bei ungefähr 100-400 mg /dm³ bzw. 0,01 %.

Das zweite Beispiel bezieht sich auf ein Projekt vom Team Gheranout et al. 2008 [Ghe08]. Im Experiment wurde synthetisches Abwasser mit Bentonit durch Elektrokoagulation behandelt. In diesem Fall simulierten die Tonminerale die kolloidalen Partikel des synthetischen Abwassers. Die Konzentration lag bei 0,1%.

Die Bentonitsuspensionen, die im Spezialtiefbau als Stütz-, Förder- und Gleitmittel angewendet werden, verfügen über eine höhere Konzentration als die in den vorgenannten Beispielen eingesetzte Werte. Am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr Universität Bochum sowie in verschiedenen Baustellen werden Konzentrationen von 3% bis 10% angewendet [Ibe].

Diese Beispiele zeigen, dass die Konzentrationen beider Anwendungsbereiche nicht miteinander vergleichbar sind. Infolge dieser Tatsache können diese Experimente nur als Richtwerte mit verschiedenen Konzentrationen gesehen werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Prinzip der Elektrokoagulation durch Forschungsarbeiten umfassend beschrieben wurde. Ihre Anwendungen im Bereich der Abwasserbehandlung ist in verschiedenen Industriezweigen erfolgreich eingesetzt worden. Allerdings existiert aktuell weder national noch international ein Ansatz, dieses Prinzip für die Elektrokoagulation von hochkonzentrierten Bentonitsuspensionen im Bauingenieurwesen einzusetzen (s.o.). Dies ist eines der Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass Vorversuche zur Trennung der gebrauchten Bentonitsuspensionen im Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb schon erfolgreich angewendet wurden. [Bie10]

Kapitel 4

Charakterisierung einer Elektrokoagulationszelle (Laborprototyp)

Eine normale Apparatur für Elektrokoagulation nennt sich Elektrokoagulationszelle. Sie besteht aus Metallelektroden, einer äußeren Gleichstromquelle und einem Gefäß zur Aufnahme der wässrigen Lösung. An die Elektroden wird eine Gleichstromquelle angeschlossen. Die beiden Elektroden tauchen in die wässrige Lösung ein. [Hib87]

Relevant für die Elektrokoagulationszelle ist ihr Aufbau, ihre Betriebsart und ihr elektrisches Arbeitsprinzip. [Hol02]

4.1 Aufbau

Die Effektivität des Aufbaus einer Elektrokoagulationszelle hängt maßgeblich von folgenden Aspekten ab: homogene Spannungs- und Stromverteilung in der Zelle, niedrige Kosten und Einfachheit der Zellengeometrie [Wal04]. Theoretisch muss eine Zelle eine homogene elektrische Spannungs- und Stromverteilung sicherstellen, sodass die elektrische Reaktion mit der gleichen Stärke in jedem Punkt der Zelle stattfinden kann.

Ein weiterer relevanter Aspekt, neben der Spannungs- und der Stromverteilung, ist der Spannungsfall, d.h. die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten eines elektrischen Systems. Der Spannungsfall einer Zelle ist die Potentialdifferenz zwischen Plus- und Minuspol. Sehr wichtig ist, den Spannungsfall der Zelle zu verkleinern, um den Energieverbrauch des Prozesses zu minimieren. Beispielweise können eine regelmäßige Geometrie der Zelle und ein konstanter Abstand zwischen Elektroden dabei helfen.

Die Spannungs- und Stromverteilung hängt von der Elektrodengeometrie ab (DIN 1324).

Die Kosten und die Einfachheit der Zellgeometrie spielen eine große Rolle bei der Anwendung der Elektrokoagulation in der Industrie. Die Elektrokoagulationszelle sollte einfach zu bauen sein, sowie ihre Investitionskosten niedrig und konkurrenzfähig sein [Wal04]. Hierzu ist zu berücksichtigen, dass bei der Elektrokoagulation die Anode aufgelöst wird und deshalb regelmäßig ersetzt werden muss. Dies verursacht Betriebskosten.

Die relevanten Parameter des Aufbaus der Zelle sind die Elektrodenparameter.

- Geometrie der Elektrode
 - Anordnung
 - Elektrodenoberfläche

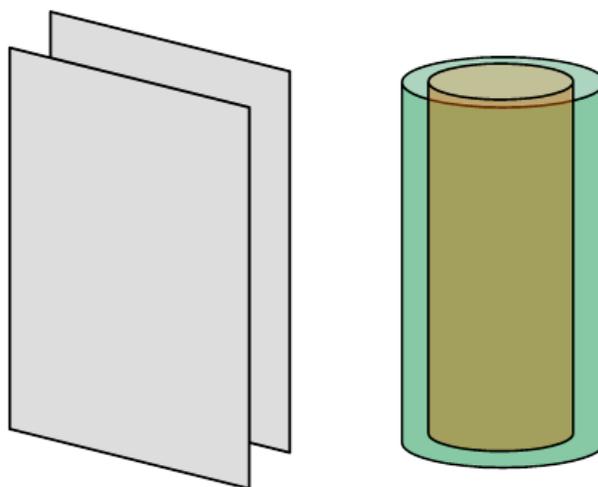


Abbildung 4.1: Elektrodenanordnung

- Rauigkeit
- Elektrodenmaterial
- Anzahl an Elektroden
- Bewegung der Elektroden

4.1.1 Geometrie der Elektroden

Die Geometrie der Elektroden muss eine homogene Strom- und Spannungsverteilung sicherstellen. Die Geometrie der Elektroden wird durch die folgenden Parameter definiert: Anordnung, Elektrodenoberfläche und Rauigkeit.

Eine parallele Anordnung der Elektroden ist für eine regelmäßige Spannungs- und Stromverteilung gut geeignet. Z.B. als plan-parallele Platten oder als konzentrische Zylinder (Abb.4.1). Die plan-parallelen Platten bestehen aus einer Anode und einer Kathode, die als Wandplatte der Zelle fungieren. Also sind die beiden inneren Seiten jeder Elektrode die aktiven Elektrodenoberflächen. Unter einer aktiven Elektrodenoberfläche versteht man die Fläche der Elektroden, die in die zu behandelnde Flüssigkeit eingetaucht sind. Dabei sind sie in die elektrochemische Reaktion involviert. Das zweite Beispiel besteht aus einer zylindrischen Anode und einer zylindrischen Kathode, die als Zellenwand dient. In beiden Fällen ist das elektrische Potenzial einheitlich verteilt. [Wal04]

Ein wichtiger Parameter zur Anordnung der Elektroden ist der Abstand zwischen Anode und Kathode. Um die Bedeutung des Abstands zwischen Anode und Kathode zu erläutern, ist es notwendig, auf den Begriffe Leitfähigkeit und Widerstand zurückzugreifen. Leitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes oder einer Flüssigkeit, Strom zu leiten. Der Widerstand wird als der inverse Parameter von der Leitfähigkeit definiert.

Bei der Elektrolyse stellt die behandelte Flüssigkeit den Leiter dar. Der Leiterquerschnitt a und die Leiterlänge l entsprechen der aktiven Elektrodenfläche bzw. dem Abstand zwischen

Autoren	Holt	Jiang	Restrepo
Stromdichte [A/m^2]	10-150	3-25	50-110
Aktive Elektrodenoberfläche/Volumen [m^2/m^3]	6,9-43		

Tabelle 4.1: Parameter der Elektrokoagulationszelle. [Jia02], [Hol02], [Res06]

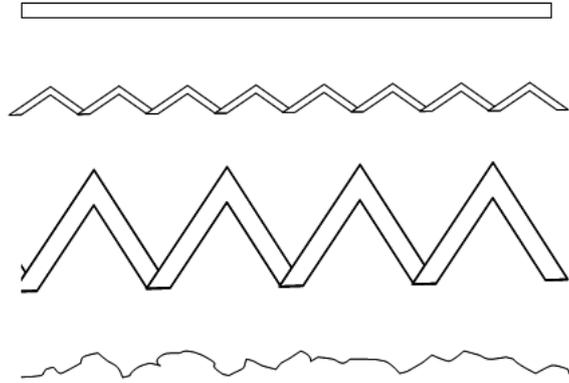


Abbildung 4.2: Rauheit der Elektrodenoberfläche. [Wal04]

Anode und Kathode. Hier ist es zu bemerken, dass, je größer der Abstand zwischen Kathode und Anode ist, desto größer wird der Widerstand und der Spannungsfall des Systems.

Im Bezug zu der aktiven Elektrodenoberfläche können die folgenden zwei Parameter definiert werden.

- Stromdichte, J , [A/m^2]
- Verhältnis Aktive Elektrodenoberfläche zum Volumen der Zelle AF/V , [m^2/m^3]

Der Parameter Stromdichte J bestimmt das Verhältnis zwischen der Stromstärke [A] und den aktiven Elektrodenoberflächen [m^2]. Das Verhältnis aktive Elektrodenoberfläche/Volumen der Zelle AF/V stellt eine Messung zur Verteilung des Koagulans dar. [Hol02] Als Vorbild können beide Parameter helfen, um die richtigen aktiven Elektrodenoberflächen und die geeignete Geometrie der Zelle auszuwählen. Die Tabelle 4.1 stellt die ausgewiesenen Werte beider Parameter in der Literatur dar.

Ein anderer Parameter der Elektrodengeometrie ist die Oberflächenrauheit der Elektroden. Es gibt Mikroprofile, Makroprofile und unregelmäßige Profile (Abb.4.2). Die Makroprofile an der Oberfläche tendieren zu einer regelmäßigen Stromverteilung. Im Gegensatz dazu tendieren die anderen zwei Möglichkeiten zu einer unregelmäßigen Stromverteilung.[Wal04]

4.1.2 Elektrodenmaterial

Das Elektrode hat eine Doppelfunktion: als Leiter des Stroms und als Flockungsmittel.

Die Elektrode soll bei der Elektrokoagulation als Elektronenleiter dienen, d.h. diese muss aus einem hochleitfähige Material sein. Hochleitfähige Materialien sind beispielsweise Silber, Kohlenstoff, Kupfer, Aluminium, Zink und Eisen. Mithilfe des spezifischen Widerstandswerts

Material	Widerstandwert
Aluminium	$8,5 \cdot 10^{-6} [\Omega \cdot cm]$
Kupfer	$1,5 \cdot 10^{-6} [\Omega \cdot cm]$
Eisen	$2,0 \cdot 10^{-6} [\Omega \cdot cm]$

Tabelle 4.2: Typische Widerstandswerte der Elektrodenmaterialien [Wal04]

Material	Referenzen
Aluminium	(Chen, 2000), (Holt, 2002), (Holt, 2006), (Donini, 2009), (Jiang, 2002), (Vik, 1983), (Szynkarczuk, 1994), (Bebeselea, 2006), (Arango, 2007), (Restrepo, 2006)
Eisen	(Holt, 2006), (Arango, 2007), (Restrepo, 2006)
Stahl	(Gheraout, 2008)

Tabelle 4.3: Referenzen aus der Literatur zu Elektrodenmaterial

werden die Materialien klassifiziert. Die Materialien mit einem spezifischen Widerstandswert von 10^{-6} bis $10^{-4} \Omega \cdot cm$ können problemlos als Elektroden angewendet werden. [Wal04] Als Beispiel werden die spezifischen Widerstandswerte von Aluminium, Kupfer und Eisen in der Tabelle 4.2 dargestellt. Alle gehören zu der Bandbreite $1,5 \cdot 10^{-6}$ bis $8,5 \cdot 10^{-6} \Omega m$

Bei der Elektrokoagulation müssen die Elektroden chemisch aktiv sein, d.h. nicht aus einem inerten Material. Eine aktiv chemische Anode wird bei der Elektrokoagulation aufgelöst, d.h. die Anode dient als Ionenversorger. Da die Ionen die Koagulation ermöglichen, spielt das Elektrodenmaterial als Parameter der Elektrokoagulation eine große Rolle.

In der Literatur zur Elektrokoagulation im Bereich der Abwasserreinigung werden folgende Metalle als Elektrodenmaterial angewendet: Aluminium, Eisen und Stahl (Tab. 4.3). Hier ist es zu bemerken, dass die Referenzen zu Eisenelektroden, die in der Literatur stehen, eigentlich Stahlelektroden sind. Grund dafür ist, dass reines Eisen zu kompliziert herzustellen ist, demzufolge ist Stahl das benutzte Material. Auf der Tabelle 4.3 werden Referenzen in der Literatur gezeigt.

Der Unterschied zwischen der Anwendung von Aluminium- und Stahlelektroden zur Elektrokoagulation von Abwasser wurde bereits recherchiert. Eine Studie zur Trennung der Schadstoffe von Restaurantabwasser bei Elektrokoagulation hat zwei Elektrodenmaterialien (Aluminium und Stahl) getestet. Die Studie ergab, dass beide Materialien im Allgemeinen gleichwertig effektiv sind. Bei Aluminiumelektroden wird der Überstand klarer und stabiler. Im Gegensatz dazu ist der Überstand bei Stahlelektroden trüb und grünlich-gelblich. Die Eisenspezies (Fe II) und (Fe III), die aus den Elektroden aufgelöst werden, geben dem Überstand diese ungewöhnliche Farbe. Darüber hinaus werden die Stahlelektroden bei der Elektrokoagulation von Restaurantabwasser korrodiert. Zum Schluss dieser Studie wird Aluminium als Elektrodenmaterial bevorzugt. [Che00b]

Eine andere Studie zur Reinigung von Abwasser der Textilindustrie durch Elektrokoagu-

lation mit Eisen- und Aluminiumelektroden hat die Effektivität des Prozesses bei den beiden Materialien verglichen. Die Studie ergab, dass die Effektivität der Reaktion von dem pH-Wert abhängt. Einerseits kommt die Reaktion beim sauren Medium zu guten Ergebnissen, wenn die Aluminiumelektroden eingesetzt werden. Andererseits ist die Reaktion beim neutralen und basischen Medium effizienter, wenn die Elektroden aus Stahl sind. [Koy02]

Zur Elektrokoagulation der Tonsuspensionen wird von Olphen vorgeschlagen, Aluminiumionen zur Koagulation anzuwenden. Die Aluminiumionen spielen bei der Zusammenballung der Tonpartikeln eine große Rolle. Zum Beispiel dienen diese Al-Ionen als Ionen zur Ladungskompensation sowie als Absorptionsionen. [Olp63]

Zum Schluss ist das Elektrodenmaterial relevant, da durch sie maßgeblich die Betriebskosten beeinflusst werden. Die Elektrokoagulation mit chemisch aktiven Elektroden verwickelt die elektrolytische Auflösung der Anode, die regelmäßig ersetzt werden muss. Von der Verfahrenstechnik her sollen die Materialien dazu verfügbar und kostengünstig sein. [Wal04]

4.1.3 Anzahl an Elektroden

In der Regel besteht das Elektrodenystem aus einer Kathode und einer Anode. Dieses Elektrodenystem nennt sich Standard. Nachteil der Standard-Elektroden ist, dass sich die aktive Elektrodenoberfläche nur auf eine Anodenplatte beschränkt.

Die Forschungsarbeiten zur Elektrokoagulation im Bereich der Abwasserreinigung ergeben, dass Standard-Elektroden für eine effektive Elektrokoagulation des schmutzigen Abwassers nicht ausreichen. D. h. Elektrokoagulation mit nur einem Elektrodenpaar führt zu unzureichender Effizienz. In der Literatur wird vorgeschlagen, mehr als ein Elektrodenpaar an der Zelle einzusetzen. [Bea04], [Res06]

Eine Zelle mit mehr als einem Elektrodenpaar hat entweder Monopolar- oder Bipolar-Elektroden. Ein wichtiger Faktor bei den Monopolar- oder Bipolar-Elektroden ist die elektrische Schaltung.

Monopolar-Elektroden sind einfache Metallplatten, die entweder als Anode oder als Kathode dienen. Die Monopolar-Elektroden sind in der Reihenfolge Anode neben Kathode in die Zelle gestellt. Wenn n die Anzahl an Elektroden ist, sind $n - 1$ so genannte Unterzelleräume vorhanden. Unter dem Begriff Unterzelle versteht man den Raum zwischen Anode und Kathode. Da $n - 2$ Elektroden beide Seiten als aktiven Flächen haben, ist der Vorteil genau eine Erhöhung der aktiven Elektrodenoberfläche.

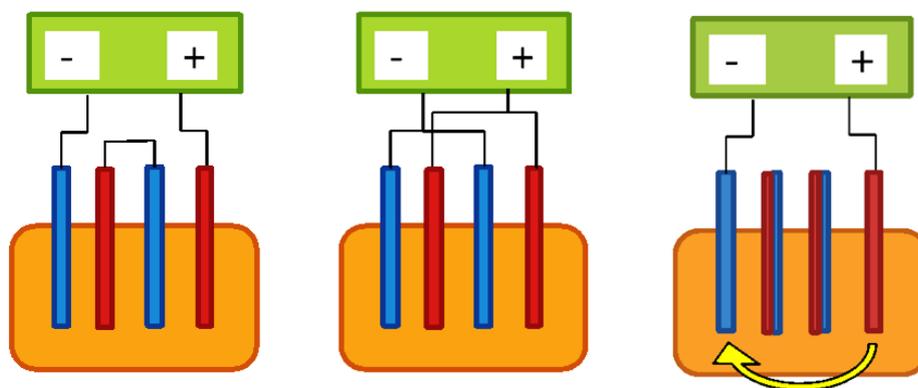


Abbildung 4.3: Links und Mitte: Serien- und Parallelschaltung für Monopolar-Elektroden. Rechts: Bipolar-Elektroden.

Monopolar-Elektroden können elektrisch unterschiedlich miteinander und mit einer Stromquelle zusammengeschlossen sein. Der Zusammenschluss von elektrischen Komponenten nennt sich elektrische Schaltung. In diesem Fall sind die elektrischen Komponenten Anode, Kathode und Netzgerät. Es gibt zwei mögliche elektrische Schaltungen, die Serienschaltung und die Parallelschaltung. In dieser Versuchsreihe wurde ebenfalls der Einfluss der elektrischen Schaltung auf die Effektivität der Elektrokoagulation untersucht.

Die Abbildung 4.3 (Links und Mitte) zeigt die unterschiedlichen elektrischen Schaltungen einer elektrochemischen Zelle mit 4 Monopolar-Elektroden, d.h. 2 Elektrodenpaaren. In beiden Fällen werden sowohl Anoden und Kathoden am Netzgerät und miteinander verbunden. Je nach elektrischer Schaltung variieren die elektrischen Eigenschaften des Systems, d.h. die Stromstärke und die Spannung. Wie sich die Spannung und die Stromstärke abhängig von der elektrischen Schaltung verteilen, stellen die Abbildungen 4.4 und 4.5 dar. In diesen Abbildungen stellt I die Stromstärke des Netzgeräts und V die Spannung des Netzgeräts. Die Parameter I_1 , I_2 , V_1 und V_2 stellen die Stromstärke und die Spannung von den jeweiligen Elektrodenpaaren 1 und 2 dar.

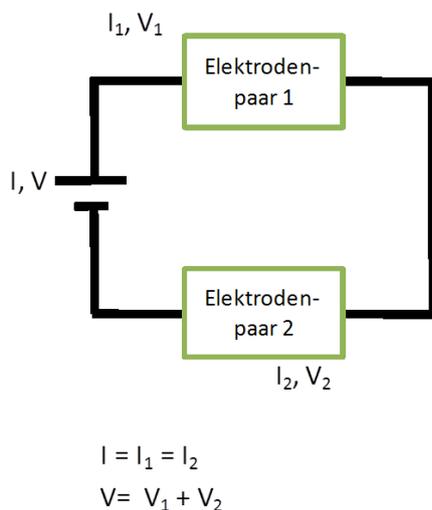
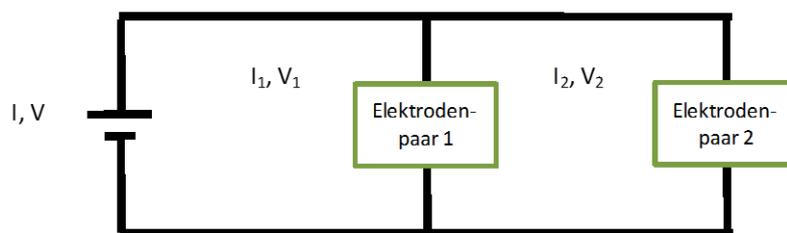


Abbildung 4.4: Skizze der Serienschaltung für 4 Monopolar-Elektroden.

- Bei der Serienschaltung (Abbildung 4.4) fließt die vom Netzgerät gegebene Stromstärke durch beide Elektrodenpaare. Die Spannung verteilt sich auf die einzelnen Elektrodenpaare. Die von Netzgerät abgegebene Spannung V ist die Summe der Teilspannungen (V_1 und V_2).
- Bei der Parallelschaltung (Abbildung 4.5) verteilt sich die Stromstärke auf die einzelnen Elektrodenpaare. Die Summe der Teilstromstärke (I_1 und I_2) ist die von Netzgerät abgegebene Stromstärke I . Die Spannung jedes Elektrodenpaares ist genau die vom Netzgerät gegebene Spannung.

Bei den Bipolar-Elektroden dienen $n - 2$ Elektroden gleichzeitig sowohl als Anode als auch Kathode. In diesem Fall werden nur eine Anode und eine Kathode am Netzgerät eingeschaltet.



$$I = I_1 + I_2$$

$$V = V_1 = V_2$$

Abbildung 4.5: Elektrische Skizze der Parallelschaltung für 4 Monopolar-Elektroden.

Der Rest der Elektroden sind so genannten bipolare Elektroden: ihre Gegenseiten haben Gegenpolarität. Das bedeutet, dass eine Seite als Anode und die andere Seite als Kathode dient. Diese Schaltungsart ist vorteilhaft, weil sie wenige elektrische Verbindungen braucht. Demzufolge der ist der Spannungsfall auch niedriger. Von der Energie her sind Bipolar-Elektroden effizienter als Monopolar-Elektroden. Die Bipolar-Elektroden haben aber den Nachteil, dass sie normalerweise aus zwei verschiedenen Materialien sind. Bipolare Elektroden haben ein weiteres Defizit: die hohe Spannung zwischen den am Netzgerät geschalteten Anoden und Kathoden verursacht ein so genanntes „By-Pass“. Das Phänomen By-Pass besteht in eine Stromablenkung durch die Unterzellen [Wal04]. Auf der Abbildung 4.3 (Rechts) wird die Skizze einer Zelle mit bipolaren Elektroden sowie das By-Pass Phänomen dargestellt.

4.1.4 Bewegung der Elektroden

Die kontinuierliche Bewegung der Elektroden bietet eine interessante Möglichkeit, um die Konzentration des Elektrolyts konstant zu erhalten und den Stofftransport zu verbessern. Trotzdem trägt diese technische Möglichkeit zu einem hohem Energieverbrauch sowie hohen Betriebskosten bei. [Wal04]

4.2 Betriebsart

Unter dem Begriff Betriebsart wird der Strömungszustand, das Strömungssystem und das Fließverhalten der behandelten Flüssigkeit in der Zelle verstanden. Diese Flüssigkeit kann ein oder mehrere Male durch die Zelle fließen, d. h. dann Strömungszustand ohne bzw. mit Kreislauf.

Abhängig vom Strömungszustand und Strömungssystem kann die Betriebsart einer Elektrokoagulationszelle klassifiziert werden. Der Strömungszustand kann als Ruhezustand oder kontinuierlichen Strömungszustand sortiert werden. Die Strömung kann entweder turbulent oder laminar sein; die Strömungssysteme einer Zelle unter kontinuierlichen Strömungszustand sind Rührer oder Pumpen. Hier ist ebenfalls anzunehmen, dass die kontinuierliche turbulente Strömung zur Verstärkung des Stofftransports und zur Verringerung der Passivierungsschicht führen kann. [Don09] Beispielsweise kann eine turbulente Strömung durch Rührer oder Pumpe und eine laminare Strömung nur durch Pumpe erreicht werden.

Die oben genannten Variationen an Strömungszuständen und -systemen werden miteinander kombiniert, um die folgenden Betriebsarten zu erhalten. In der Tabelle 4.2 wird die Klassifizierung der Betriebsarten Elektrokoagulationszelle mit einer Skizze verdeutlicht.

- Ruhe-Zustand
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Rühren
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Pumpe (mit Kreislauf)
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Pumpe (ohne Kreislauf)
- kontinuierlicher laminarer Strömungszustand durch Pumpe (ohne Kreislauf)
- kontinuierlicher laminarer Strömungszustand durch Pumpe (mit Kreislauf)

Außerdem können mehrere Elektrokoagulationszellen nebeneinander gestellt werden, um eine Kaskadenschaltung zu erhalten.

Anschließend werden die verschiedenen Betriebsarten vorgestellt. Es muss betont werden, dass sie theoretische Modelle darstellen und sich die in der Praxis angewendeten Zellen von dem theoretischen Verhalten leicht unterscheiden können. [Wal04]

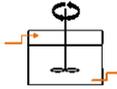
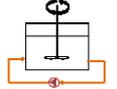
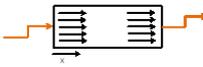
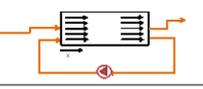
Skizze	Strömungszustand	Strömungssystem	Kreislauf?
	Ruhe-Zustand	-	Nein
	Kontinuierlicher Strömungszustand	Rührer	Nein
	Kontinuierlicher Strömungszustand	Rührer + Pumpe	Nein
	Kontinuierlicher Strömungszustand	Rührer + Pumpe	Ja
	Kolben-Kontinuierlicher Strömungszustand	Pumpe	Nein
	Kolben-Kontinuierlicher Strömungszustand	Pumpe	Ja

Tabelle 4.4: Klassifizierung der Betriebsarten einer Elektrokoagulationszelle

- **Ruhe-Zustand** Eine Zelle arbeitet im Ruhe-Zustand, wenn sie eine diskontinuierliche Ein- und Ausspeisung zeigt. Die Zeit zwischen Ein- und Ausspeisung nennt man Verweilzeit. Die Reaktionszeit und die Verweilzeit sind genau gleich. In diesem Fall wird eine bestimmte Menge Elektrolyt diskontinuierlich hinzugefügt und diese bestimmte Menge Elektrolyt bleibt während der Verweilzeit in der Zelle. Während der Elektrokoagulation

beim Ruhe-Zustand wird die Reaktion sehr intensiv durchgeführt und die Konzentration vom Endprodukt ändert sich fortschreitend in Laufe der Verweilzeit. Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt von Parametern wie Elektrolytvolumen oder der Geometrie der Elektroden ab. [Wal04]

- **Kontinuierlicher Strömungszustand durch Rührer (ohne Kreislauf)** Die elektrochemische Reaktion an einer Zelle wird hauptsächlich zwischen den Elektroden durchgeführt. Von der Reaktionseffektivität her wird es empfohlen, die an der Zelle herrschenden Bedingungen immer heterogen zu halten. [Wal04] Bei einer Zelle, die unter kontinuierlichem Strömungszustand durch Rührer arbeitet, handelt es sich um eine Ruhe-Zustand Zelle, wobei das Elektrolyt ständig gerührt wird. Kräftiges Rühren erzeugt eine perfekte Vermischung des Elektrolyts. Demzufolge sind die in der Zelle herrschenden Bedingungen uniform. Die Zelle sowohl unter Ruhe-Zustand als auch unter kontinuierlichem Strömungszustand durch Rührer sind bevorzugt, um im Labor zu arbeiten. Beide Betriebsarten bieten die Möglichkeit, eine große Bandbreite von Parametern isoliert zu analysieren. Dadurch wird es einfacher, den Einfluss jedes einzelnen Parameters auf die Reaktionseffektivität zu untersuchen. [Hol02]
- **Kontinuierlicher Strömungszustand durch Pumpe ohne Kreislauf** Die Zelle unter kontinuierlichem Strömungszustand durch Pumpe ohne Kreislauf ist ähnlich der Zelle unter kontinuierlichem Strömungszustand durch Rührer, mit Ausnahme des Ein- und Ausspeisungssystems. Im Unterschied zu den vorherigen Zellen bietet diese Zelle eine kontinuierliche Ein- und Ausspeisung der Elektrolytlösung. Es muss betont werden, dass die Lösung an dieser Zelle auch ständig durch die Strömung der Pumpe gerührt wird.
- **Kontinuierlicher Strömungszustand durch Pumpe mit Kreislauf** Die Zelle unter kontinuierlichem Strömungszustand durch Pumpe mit Kreislauf ist ähnlich der vorherigen Zelle ohne Kreislauf. In diesem Fall fließt das Produkt, das durch die Ausspeisung ausfließt, wieder in die Zelle ein.
- **Kontinuierlicher laminarer Strömungszustand durch Pumpe ohne Kreislauf** Bei diesen Betriebsarten fließt das Elektrolyt einheitlich durch die Zelle. Die Strömung ist laminar, d.h. das Elektrolyt strömt in Schichten, die sich nicht miteinander vermischen. Die Konzentration des Endproduktes ist vom Abstand zwischen Ein- und Ausspeisung abhängig. [Wal04] Die Durchflussgeschwindigkeit an einer Kolben-Zelle ist ein relevanter Parameter, der von der Verweilzeit abhängt. Je höher die Durchflussgeschwindigkeit ist, desto kürzer wird die Verweilzeit. Demzufolge wird die Reaktionseffektivität niedriger. Die Zelle unter Kolben-Kontinuierlichem Strömungszustand durch Pumpe kann auch mit Kreislauf arbeiten.

4.3 Elektrisches Prinzip

Die Anwendung eines elektrochemischen Prozesses kann hauptsächlich wegen der Aufstellung der Stromstärke und der Spannung in zwei Arbeitsprinzipien klassifiziert werden. Die Arbeitsprinzipien bestehen in der Aufstellung einer konstanten Spannung oder einer konstanten Stromstärke. Eine elektrochemische Zelle kann unter galvanischem Prinzip mit konstanter Stromstärke oder unter potentiostatischem Prinzip mit konstanter Spannung arbeiten. [Bar01]

Bei der galvanischen Methode fließt eine konstante Stromstärke durch die Zelle. Wie vorher erklärt kann die Geschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion erst bei einer konstanten Stromdichte kontrolliert werden. Infolgedessen werden Prozesse mit ständigem Strom vorgeschlagen, um die Elektrokoagulation durchzuführen. Dadurch bleibt die Stromstärke während der Reaktion gleich und die Dosierung von Koagulans und die Reaktionsgeschwindigkeit kann genau kontrolliert werden.

Im Vergleich zum galvanischen Prinzip wird bei dem potentionsischen Prinzip ein ständiges Potenzial an der Zelle angewandt. Wenn eine bestimmte konstante Spannung aufgestellt wird, variiert die Stromstärke. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Kontrollierung der Dosierung des Koagulans sowie der Reaktionsgeschwindigkeit [Che00a]. Wegen dieser Nachteile wird diese Methode nicht weiter verfolgt.

4.4 TLB-Elektrokoagulationszellenkonstruktion

Drei Elektrokoagulationszellen wurden am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungs- und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum gebaut. Die Zellen sind so konzipiert und konstruiert, dass die grundlegenden elektrochemischen Parameter im Labor untersucht werden können. Um die genannten Parameter genau zu isolieren und präzise zu testen, soll die Elektrokoagulationszelle klein und funktionell sein.

Jede Zelle bietet unterschiedliche Variationen an aktiven Elektrodenoberflächen, bei der Anzahl an Elektroden und beim Elektrodenabstand.

Die drei Zellen A, B und C sind würfelförmig aus Plexiglass gebaut und alle drei haben eine Kapazität von 2 Liter Suspension.

Die Elektroden bestehen aus Metallplatten, die maximal 0,5 cm dick sein können. Es werden Metallplatten von 0,3-0,4 mm Stärke angewendet. Im Bezug auf das Elektrodenmaterial werden sowohl Al-Elektroden, als auch Stahl-Elektroden untersucht. Die Oberflächenrauheit der Elektroden ist ein Parameter, der nicht im Rahmen der Versuchsreihe untersucht wird, d.h. die Oberflächenrauheit variiert nicht. Da während der Elektrokoagulation die Oberfläche der Anode gestört wird, müssen die Anodenplatten nach jedem Versuch poliert werden. Damit wird der Parameter „Oberflächenrauheit der Anode“ konstant erhalten. Die Möglichkeit kontinuierlicher Bewegung der Elektroden wird nicht berücksichtigt.

Die drei Zellen sind zweiseitig, d.h. sie können sowohl im Ruhe-Zustand als auch unter kontinuierlicher Strömung sein. Jede Zelle bietet aber unterschiedlichen Betriebsarten.

Alle Elektrokoagulationsversuche in allen drei Zellen werden unter galvanischem Prinzip durchgeführt. Die Stromstärke wird entweder auf 1 oder 2 Ampere eingestellt. Da die Stromstärke konstant bleibt, ändert sich im Laufe der Reaktion die Spannung.

Um die Sicherheit im Labor zu gewährleisten, wird ein Netzgerät mit einem Spannungsgrenzwert von 65 V eingesetzt. Wenn die erforderliche Überspannung am Anfang der Reaktion 65 V überschreiten würde, würde das Netzgerät maximal 65 V mit einer eventuellen Verringerung der Stromstärke angeben.

Im Folgenden werden die drei Elektrokoagulationszellen individuell beschrieben.

4.4.1 TLB-Zelle A

Zelle A wird durch die folgende Zellengeometrie und dementsprechende aktive Elektrodenoberfläche charakterisiert.

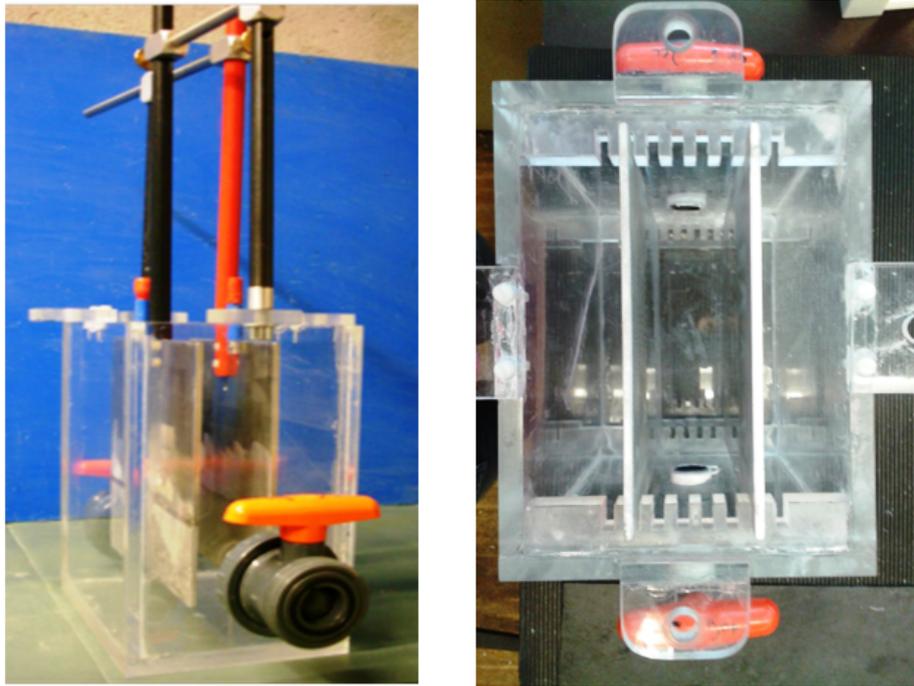


Abbildung 4.6: TLB-Elektrokoagulationszelle A

- Größe: 18 x 13 x 25 [cm^3]
- aktive Elektrodenoberfläche: 124,0 [cm^2]

In der Zelle A werden Schlitz für die Elektroden gebaut, sodass ihr Abstand eingestellt werden kann (Abb. 4.6). Der Abstand zwischen Elektroden und die Anzahl sind variierende Parameter.

Die Zelle A bietet die folgenden Möglichkeiten an Abstand zwischen Anoden und Kathoden an: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5 und 6,5 cm. Sie ermöglichen ebenfalls die Anwendung an 1, 2 und 3 Elektrodenpaaren. Die Kombinationsmöglichkeiten sind die folgenden:

- 1 Anode und 1 Kathode. Abstand: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5 und 6,5.
- 2 Anoden und 2 Kathoden. Abstand: 0,5 und 1,5 cm
- 3 Anoden und 3 Kathoden. Abstand: 0,5 cm
- 4 Anoden und 4 Kathoden. Abstand: 0,5 cm

Zelle A ist zweiseitig, d.h. sie kann sowohl im Ruhe-Zustand als auch unter kontinuierlicher Strömung sein. Im Folgenden werden die Betriebsarten vorgestellt, die Zelle A bietet.

- Ruhe-Zustand
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Rühren
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Pumpe (mit/ohne Kreislauf)

4.4.2 TLB-Zelle B

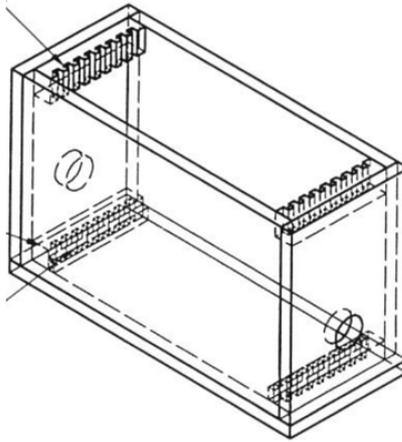


Abbildung 4.8: TLB-Elektrokoagulationszelle B

Zelle B ist ebenfalls würfelförmig aus Plexiglas gebaut (Abb. 4.8). Sie unterscheidet sich von Zelle A durch die Geometrie der Zelle und die entsprechende aktive Elektrodenoberfläche.

- Größe: $23,5 \times 15 \times 8,5$ [cm^3]
- aktive Elektrodenoberfläche: $212,0$ [cm^2]

In ähnlicher Weise werden bei der Zelle B Schlitze für die Elektroden gebaut und sie bietet die gleichen Möglichkeiten an Abstand zwischen Anoden und Kathoden an sowie Anzahl an Elektroden wie Zelle A. (Abb. 4.8)

Hinsichtlich der Betriebsart bietet die Zelle B die gleichen Möglichkeiten wie die Zelle A. Die Details des Designs der Zelle B werden in der Abbildung 4.9 dargestellt.

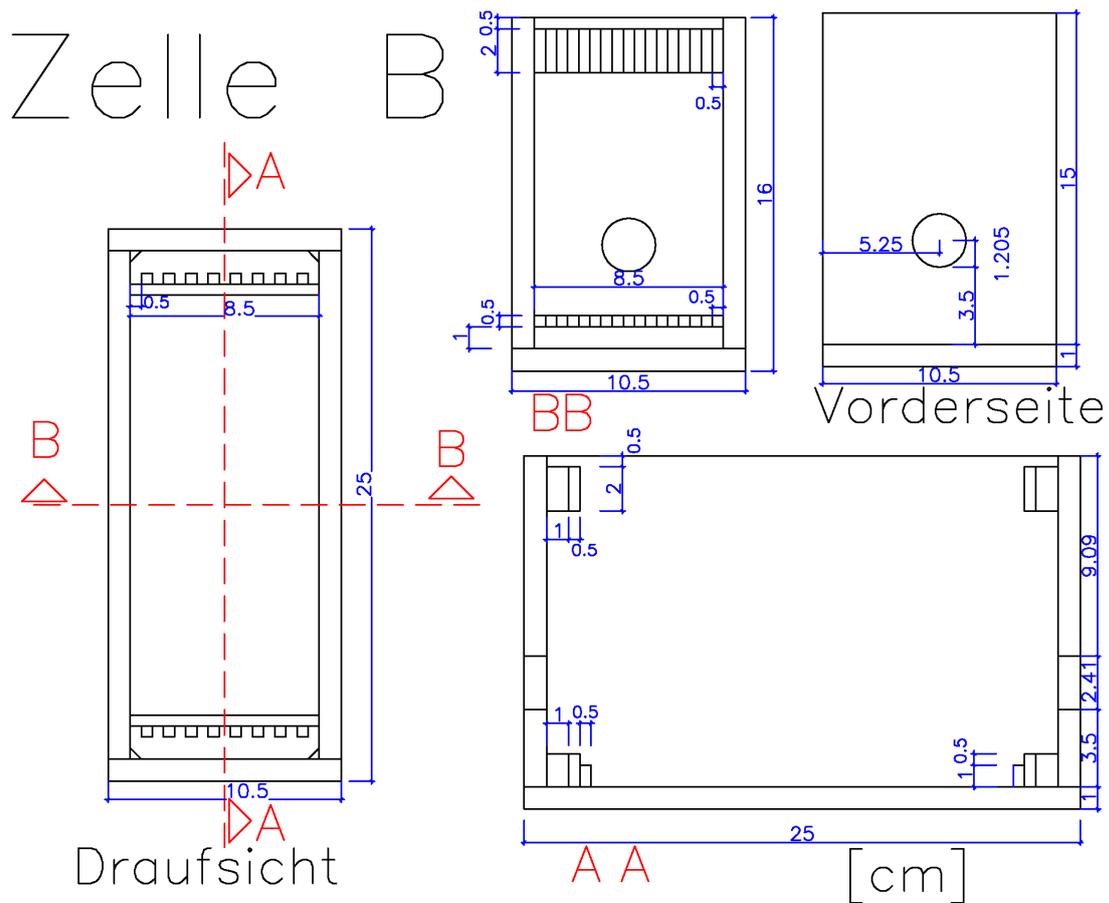


Abbildung 4.9: Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle B

4.4.3 TLB-Zelle C



Abbildung 4.10: TLB-Elektrokoagulationszelle C

Zelle C ist ebenfalls würfelförmig. Sie ist schmaler und länger als Zelle A und B konzipiert. Ihre Größe beträgt $43,0 \times 6,5 \times 7,5$ [cm³] und ihre aktive Elektrodenoberfläche $277,0$ [cm²]. Sie bietet die Anwendung von einer Anode und einer Kathode an, mit einem Elektrodenabstand

von 6,5 cm. (Abb. 4.10)

Zelle C ist so konzipiert, um unter laminarer oder turbulenter Strömung arbeiten zu können. Außerdem kann sie im Ruhe-Zustand betrieben werden. Im Folgenden werden die möglichen Betriebsarten dargestellt, die die Zelle C anbietet.

- Ruhe-Zustand
- Kontinuierlicher turbulenter Strömungszustand durch Pumpe (mit/ohne Kreislauf)
- kontinuierlicher laminarer Strömungszustand durch Pumpe (mit/ohne Kreislauf)

Die Details des Designs der Zelle C wird in den Abbildungen 4.11 und 4.12 dargestellt.

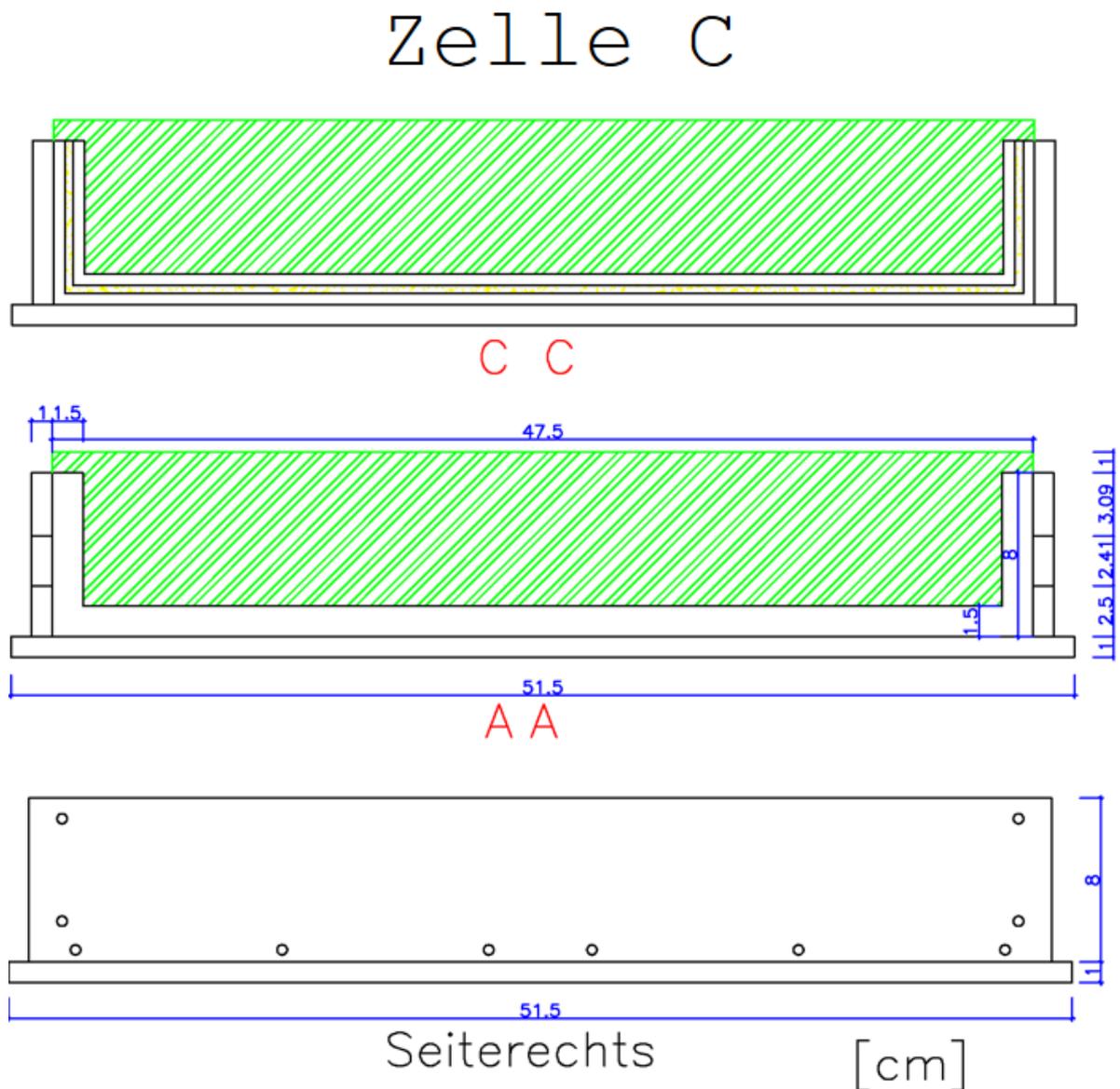


Abbildung 4.11: Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle C, I

Zelle C

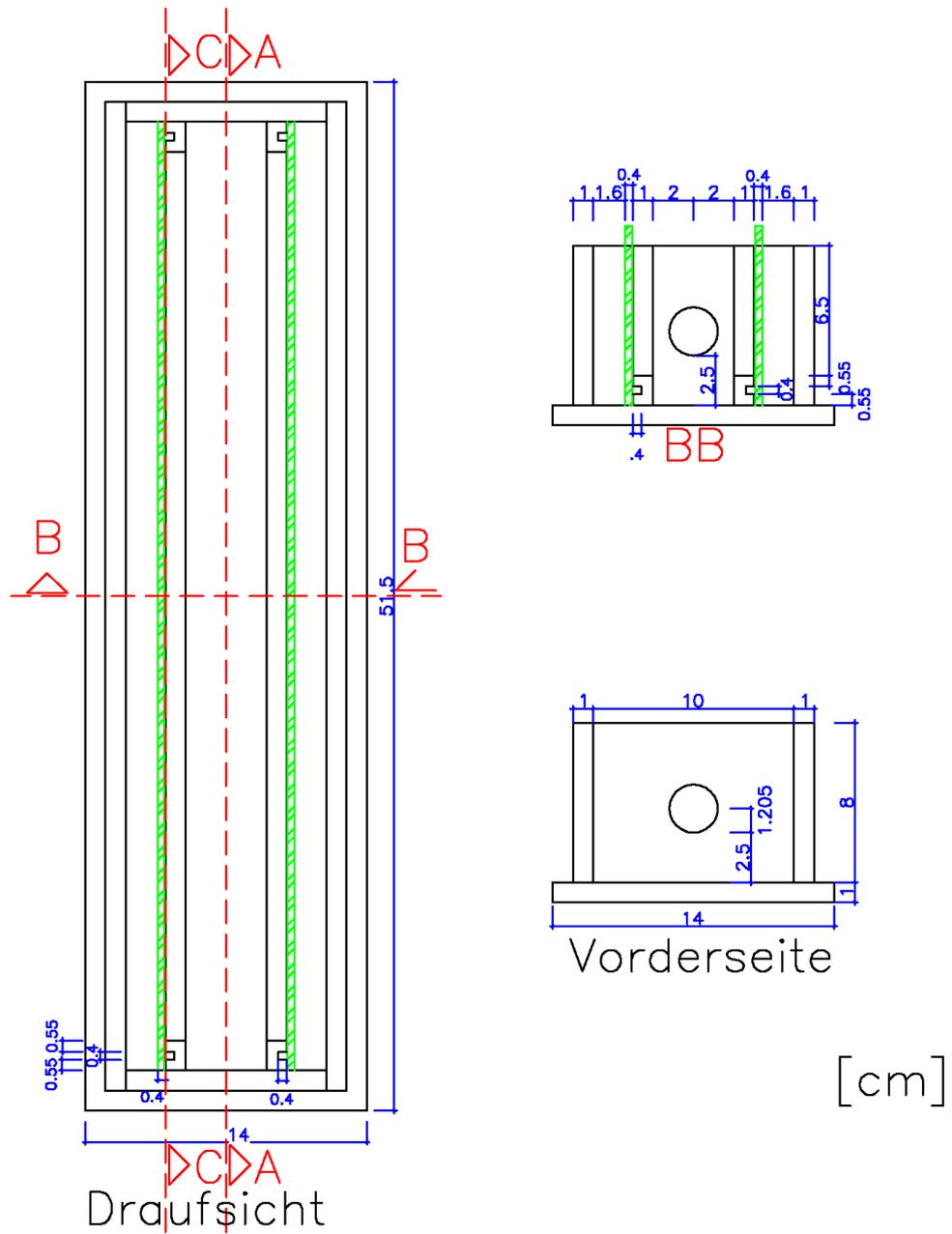


Abbildung 4.12: Skizze der TLB-Elektrokoagulationszelle C, II

4.4.4 Übersicht der Eigenschaften der TLB-Zelle A, B und C

Zelle A		
Aufbau	Betriebsart	elektrisches Prinzip
<u>Geometrie</u> 18 cm x 13 cm x 25 cm parallele Anordnung der Elektroden Elektrodenabstand: 0,5 bis 6,5 cm aktive Elektrodenoberfläche: 124,0 cm ² Oberflächenrauigkeit: poliert	<u>Strömungszustand</u> Ruhe-Zustand kont. turbulente Strömung	galvanisches Prinzip
<u>Elektrodenmaterial</u> Aluminium Stahl	<u>Strömungssystem</u> Rührer Pumpe	
<u>Anzahl an Elektroden</u> 2	<u>Kreislauf</u> mit ohne	
Zelle B		
Aufbau	Betriebsart	elektrisches Prinzip
<u>Geometrie</u> 23,5 cm x 15 cm x 8,5 cm parallele Anordnung der Elektroden Elektrodenabstand: 0,5 bis 6,5 cm aktive Elektrodenoberfläche: 212,0 cm ² Oberflächenrauigkeit: poliert	<u>Strömungszustand</u> Ruhe-Zustand	galvanisches Prinzip
<u>Elektrodenmaterial</u> Aluminium Stahl	<u>Strömungssystem</u> -	
<u>Anzahl an Elektroden</u> 2 und 4	<u>Kreislauf</u> ohne	
Zelle C		
Aufbau	Betriebsart	elektrisches Prinzip
<u>Geometrie</u> 43,0 cm x 6,5 cm x 7,5 cm parallele Anordnung der Elektroden Elektrodenabstand: 6,5 cm aktive Elektrodenoberfläche: 277,0 cm ² Oberflächenrauigkeit: poliert	<u>Strömungszustand</u> Ruhe-Zustand kont. laminare Strömung	galvanisches Prinzip
<u>Elektrodenmaterial</u> Aluminium	<u>Strömungssystem</u> Pumpe	
<u>Anzahl an Elektroden</u> 2	<u>Kreislauf</u> mit ohne	

Abbildung 4.13: Eigenschaften der Zelle A, B und C

Kapitel 5

Versuchsprogramm und Vorgehensweise

5.1 Versuchssystematik

Ein Versuchskonzept zum Testen der Elektrokoagulation wurde entwickelt. Das Flussdiagramm (Abbildung 5.1) stellt die Versuchsdurchführung der Elektrokoagulation dar. Drei Hauptprozesse sind vorhanden: Mischung, Trennung und Trocknen.

1. **Mischen.** Das Bentonit wird nach DIN 4127 im Wasser durch ein Rührgerät mit einer Drehzahl von 2.000 bis 3.500 min^{-1} dispergiert. Die Dispergierzeit beträgt 10 min. Die Bentonitsuspension muss quellen gelassen werden. Laut DIN 4127 ist die Suspension aufgequollen, wenn sich ihre Fließgrenze innerhalb von 6 h nicht um mehr als 10 % ändert. Im Labor wird die Suspension ca. 24 Stunden quellen gelassen.
2. **Trennung.** Der Elektrokoagulationsversuch stellt die Trennung dar. Eine bestimmte Menge Bentonitsuspension wird in die Elektrokoagulationszelle gegeben. Während einer bestimmten Zeit läuft die Elektrokoagulation in der Bentonitsuspension. Die Bentonitsuspension wird getrennt. Die Trennung ergibt zwei Endprodukte: koaguliertes Bentonit (B_k) und Restsuspension S_R). Diese werden anschließend gewogen.
3. **Trocknen.** Die Proben von koaguliertem Bentonit und Restsuspension werden im Ofen getrocknet und erneut gewogen. Am Ende des Prozesses wird dann Massenbilanz gezogen.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise eines Elektrokoagulationsversuchs vorgestellt.

1. Messungen vor der Trennung

- Festlegung der Elektrokoagulationsparameter
- Mischung und Messungen an der Bentonitsuspension
 - Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 - pH-Wert
 - Leitfähigkeit [$\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$]
 - Dichte (ρ_0) [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
 - Stabilität durch Filterpresse
 - Filtratwasserabgabe: (FW_0), [g] und [ml]
 - Dicke des Filterkuchens: (FK_0), [mm]

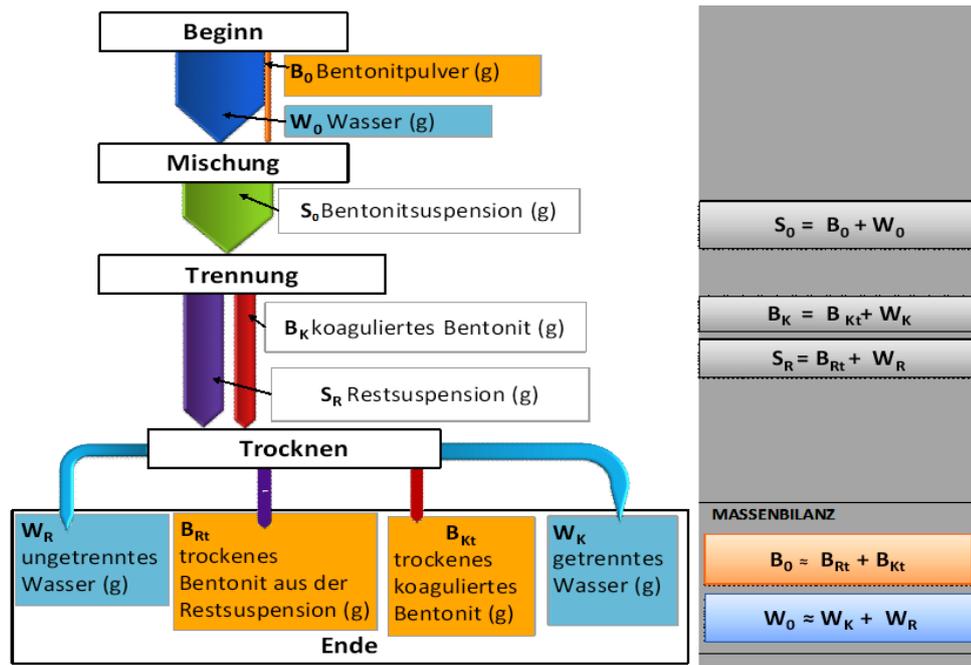


Abbildung 5.1: Flussdiagramm der Versuchsdurchführung.

- Stabilität durch Absetzversuch (eventuell)
- Festlegung der Elektrkoagulationsparameter

2. Messungen während der Trennung

- pH, Temperatur und Leitfähigkeit der Suspension
- Stromstärke und Spannung
- Volumen der Gase (eventuell)

3. Messungen nach der Trennung

- pH, Temperatur und Leitfähigkeit der Restsuspension
- Masse des Koagulierten Bentonits, (B_K), [g]
- Masse der Restsuspension, (S_R), [g]
- Dichte der Restsuspension, (ρ_R), [$\frac{kg}{m^3}$]
- Stabilität der Restsuspension (Filterpresse)
 - Filtratwasserabgabe: (FW_R), [g] und [ml]
 - Dicke des Filterkuchens: (FK_R), [mm]
- Stabilität der Restsuspension durch Absetzversuch (eventuell)
- Massenverlust der Anode [g] (eventuell)

4. Messungen nach dem Trocken

- Masse des koagulierten Bentonits, B_{Kt} , [g]
- Masse des Bentonits aus der Restsuspension, (B_{Rt}), [g]

- Berechnung der Massenbilanz
 - B_K koaguliertes Bentonit = $B_{Kt} + W_K$
 - S_R Restsuspension = $B_{Rt} + W_R$

5.1.1 Definition der Effektivitätsparameter

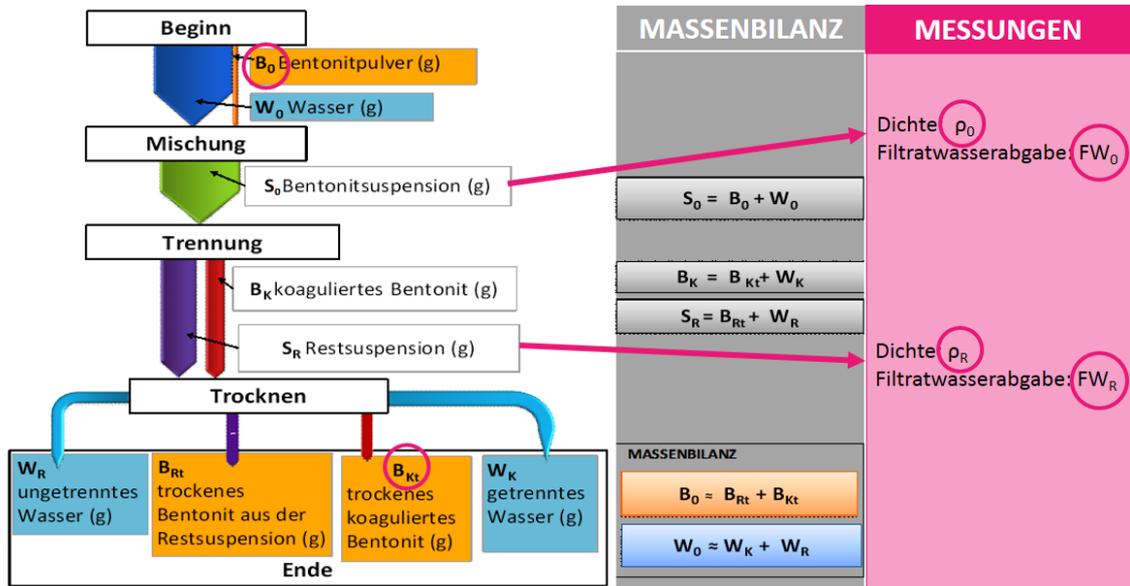


Abbildung 5.2: Effektivitätsparameter aus der Fließdiagramm

Der Begriff „Effektivitätsparameter“ wurde eingeführt, um die Leistungsfähigkeit der Elektrokoagulation bzw. Effektivität zu definieren. Effektivität wird mit den Einwirkungen der Elektrokoagulation auf die Suspension verknüpft.

- Trennung des Bentonits
- Restsuspension muss zum klaren Wasser tendieren
- Die Suspension wird destabilisiert

Die Elektrokoagulation ergibt die Trennung des Bentonits von der Restsuspension. Die Masse des getrennten Bentonits wird nicht nur absolut, sondern auch in Prozent bestimmt. Der **prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit** ($B_{kt}\%$) beträgt das koagulierte Bentonit B_{kt} in Bezug auf das Bentonit B_0 am Anfang. Dieser Parameter stellt den Anteil an Bentonit dar, das sowohl an der Oberfläche der Anode als auch als Flocken in der Suspension koaguliert.

$$B_{kt}\% = (B_{Kt}/B_0) * 100, [\%]$$

Die Trennung des Bentonit von der Suspension hat zu Folge, dass die Restsuspension dünner wird. D.h. die Suspension enthält zwar den gleichen Wasseranteil, aber der Feststoffanteil in der

Suspension wurde durch die Elektrokoagulation reduziert. Demzufolge wird die Dichte der Suspension vor und nach der Elektrokoagulation gemessen. Darüber hinaus ist das Ziel der Elektrokoagulation der Suspension, einerseits das Bentonit zu trennen, andererseits eine Restsuspension zu erhalten, die zu klarem Wasser tendiert. In Bezug auf das zweite Ziel wurde der Parameter **Verringerung der Dichte der Restsuspension** ($\Delta\rho\%$) definiert. Dieser stellt dar, wie nah die Dichte der Restsuspension (ρ_R) bei der Dichte von Wasser ($1,00\text{ g/cm}^3$) liegt. Beträgt die Verringerung der Dichte 100%, hat die Restsuspension eine Dichte von $\rho_{Wasser} = 1,00\text{g/cm}^3$.

$$\Delta\rho\% = ((\rho_R - \rho_0)/(\rho_{Wasser} - \rho_0) * 100) [\%]$$

Bei der Elektrokoagulation wird die Suspension ebenfalls destabilisiert, daher wird die Stabilität der Suspension kann mittels der **Filterpresse** (DIN 4127) bestimmt. Die Stabilität der Suspension wird vor und nach der Elektrokoagulation bestimmt. Der Parameter **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** ($\Delta FW\%$) stellt dar, um wie viel die Stabilität der Suspension nach der Elektrokoagulation reduziert wird. Dieser Parameter wird als Zunahme der Masse der Filtratwasserabgabe der Suspension nach Elektrokoagulation. Verdoppelt die Filtratwasserabgabe der Restsuspension FW_R die von der Suspension vor der Elektrokoagulation FW_0 , beträgt die ΔFW 100%. Hier ist es zu betonen, dass der Parameter ΔFW größer als 100% sein kann.

$$\Delta FW\% = ((FW_0 - FW_R)/(FW_0) * 100) [\%]$$

5.1.2 Absetzversuch

Die Stabilität der Restsuspension wird zusätzlich durch Absetzversuche bestimmt. Der Absetzversuch basiert auf der Trennung mittels Sedimentation von den 2 Phasen eines dispersen Systems. Sedimentation bezieht sich auf eine Trennung der 2 Phasen unter Wirkung von Gravitationskräften. Der Sedimentationsprozess ist von der Feststoffkonzentration und der Stabilität der Suspension abhängig [Luc04]. Die Stabilität der Suspension wird von chemischer Koagulation oder Elektrokoagulation beeinflusst. Ziel des Absetzversuchs ist, die Stabilität der Restsuspension nach chemischer Koagulation oder Elektrokoagulation zu bestimmen. Der Absetzversuch, um die Stabilität der Restsuspension nach chemischer Koagulation zu bestimmen, wird auch Jar-Test genannt.

Beim Absetzversuch ist sowohl eine hohe Menge an befreiter Flüssigkeit als auch das Erreichen einer hohen Konzentration der eingedickten Suspension zu erwarten. Je mehr getrennte Flüssigkeit, je höher die Konzentration der eingedickten Suspension ist, desto instabiler ist die Suspension. Der Absetzversuch wurde in 1000 ml-Messzylindern durchgeführt, Restsuspension wurde gebraucht (siehe Abbildung 5.3). Nach dem Verschließen jedes Messzylinders mit Parafolien wurden sie abgestellt. Im Laufe der Zeit findet die Sedimentation statt: die Partikel von Bentonit setzen sich am Boden des Messzylinders ab und das getrennte Wasser bleibt im oberen Teil des Messzylinders. Der Absetzversuch gibt die Zeit an, in der eine bestimmte Menge an Wasser befreit wird. Die folgenden Messungen werden durchgeführt:

- Mittels des Messzylinders und einer Skala wird das Volumen des befreiten Wassers im Laufe der Zeit bestimmt. Die Dicke der Wasserschicht ist im Messzylinder abzulesen

Absetzversuch mit Meßzylindern

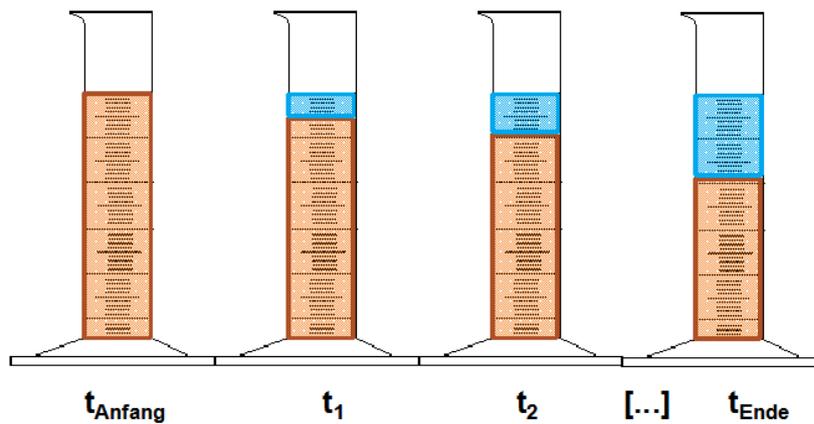


Abbildung 5.3: Skizze des Absetzversuches der Restsuspension

und nachträglich in Volumen umzuwandeln. Nach einer bestimmten Absetzdauer ist der Versuche zu Ende. Hier wurde als gesamte Absetzdauer eine Woche genommen. Die Volumenwerte und die entsprechende Zeit werden mithilfe einer sogenannten Absetzkurve dargestellt.

- Nach 24 Stunden ist die Probe im zweiten Messzylinder zu untersuchen. Wasser und abgesetztes Bentonit werden untersucht. Einerseits werden die physikalischen Eigenschaften des getrennten Wassers, d.h. pH-Wert und Leitfähigkeit, bestimmt. Andererseits werden die folgenden Eigenschaften des abgesetzten Bentonits gemessen: Dichte und Stabilität durch Filterpresse.

5.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm besteht aus Elektrokoagulationstests von Bentonitsuspensionen, wobei die den Elektrolyseprozess beeinflussenden Parameter untersucht werden. Zwei Typen grundlegender Parameter sind vorhanden: die Parameter bezüglich der Elektrokoagulationszelle und die Parameter bezüglich der Bentonitsuspension. Die grundlegenden Parameter der Elektrokoagulationszelle werden in drei Gruppen kategorisiert:

- Aufbau der Elektrokoagulationszelle
- Betriebsart der Elektrokoagulationszelle
- Elektrisches Arbeitsprinzip

Der Aufbau der Zelle bezieht sich auf ihre Geometrie sowie die Elektrodenparameter: Material, Abstand, Oberfläche etc. Mithilfe verschiedener Elektrokoagulationszellen A, B und C wird die Geometrie der Zelle und die aktive Elektrodenoberfläche untersucht. Die Anordnung der Elektroden als parallele Platte vereinfacht die Untersuchung von unterschiedlichen Elektrodenmaterialien. Die Einrichtung der Elektrokoatulationszelle ermöglicht die Untersuchung von Elektrodenabständen und den Einsatz einer verschiedenen Anzahl von Elektroden.

In der zweiten Kategorie handelt es sich um die Betriebsart der Zelle. Ein zusätzlicher Parameter zur Betriebsart der Elektrokoagulationszelle ist die Verweildauer, d.h. die Zeitdauer der Behandlung der Bentonitsuspension durch Elektrokoagulation.

Die elektrischen Prinzipien stellen die Bedingungen dar, unter denen eine Elektrokoagulationszelle arbeiten kann. Im Rahmen dieses Projekt wird nur das galvanische Prinzip angewendet, wobei die die Elektrokoagulation unter einer konstanten Stromstärke durchgeführt wird.

Die Parameter der Bentonitsuspension basieren auf dem Bentonittyp und der Suspensionskonzentration. Bentonit W vom Hersteller Phrikolat in Konzentration 2,5% wurde in der Regel angewendet. Bei den Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Suspensionskonzentration auf die Effektivität wird die Konzentration variiert. Nach der Anwendung im Spezialtiefbau besteht die gebrauchte Bentonitsuspension aus der Bentonitsuspension selbst sowie aus abgebautem Boden. Diese Bodenpartikel nennt man Aufladung, sie gehören zu den Parametern der Bentonitsuspension. Zwei Typen aufgeladener Bentonitsuspension werden untersucht: im Labor aufgeladene Bentonitsuspension und gebrauchte Bentonitsuspension auf der Tunnelbaustelle in Danzig (Polen).

Die Parameter der Bentonitsuspension lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bentonittyp
- Suspensionskonzentration
- Aufladung

Die Ergebnisse der Untersuchung der oben genannten Parameter haben einen direkten Einfluss auf das Design der zu entwickelnden Verfahrenstechnik für den Elektrokoagulationsprozess. Hierzu werden weitere Untersuchungen im Rahmen der Verfahrenstechnik durchgeführt. Eine Herausforderung stellt die Verringerung der Leistung der Elektrokoagulation durch die vermehrte Anlagerung von Bentonitpartikeln an der Anodenoberfläche im Zuge der Reaktion dar. Mechanismen gegen diese Anlagerung, wie die mechanische und die elektrische Reinigung der Anode werden untersucht. Die mechanische Reinigung wird durch das manuelle Abkratzen der Anode und die elektrische durch eine Polaritätsumschaltung zwischen Anode und Kathode realisiert.

Bei der ersten Phase des Projektes ist die Integration der Elektrokoagulation in bestehende Separationsabläufe ebenso zu sondieren. Diese verbindet den Kreislauf der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit den weiteren Separationsstufen. Dafür wird die Wirkung der Elektrokoagulation auf die Stabilität der Restsuspension bestimmt.

Im Folgenden werden die Parameter und ihre Untersuchungsbereiche vorgestellt. Die Tabelle fasst 5.1 das Versuchsprogramm zusammen. In dieser werden die unterschiedlichen Versuchsreihen der Elektrokoagulation und die entsprechenden Zellen sowie die variierenden Parameter und die Anzahl an Tests dargestellt.

Zu untersuchenden Parameter

1. Aufbau

(a) Geometrie der Zelle:

- i. Zelle A: $18 * 13 * 25 \text{ [cm}^3\text{]}$
- ii. Zelle B: $23,5 * 15 * 8,5 \text{ [cm}^3\text{]}$
- iii. Zelle C: $43,0 * 6,5 * 7,5 \text{ [cm}^3\text{]}$

(b) Elektroden

- i. Elektrodenoberfläche
 - A. Zelle A: $124,2 \text{ [cm}^2\text{]}$
 - B. Zelle B: $212,0 \text{ [cm}^2\text{]}$
 - C. Zelle C: $277,0 \text{ [cm}^2\text{]}$
- ii. Elektrodenmaterial
 - Stahl: Zelle A und B
 - Aluminium: Zelle A, B und C
- iii. Elektrodenabstand
 - 0,5 bis 5,5 [cm]: Zelle A und B
 - 6,5 [cm]: Zelle A, B und C
- iv. Anzahl an Elektroden
 - 2 Elektroden: Zelle A, B und C
 - 4 Elektroden: Zelle B
 - Elektrische Schaltung: Parallel, Serie

2. Einfluss der **Betriebsart** der Elektrokoagulationszelle

(a) Strömungszustand

- i. Ruhe-Zustand: Zelle A, B und C.
- ii. Turbulente kontinuierliche Strömung: Zelle A
 - durch Rührer
 - durch Pumpe
- iii. Laminare kontinuierliche Strömung: Zelle C
 - durch Pumpe: 2 bis 6 [l/min]

(b) Verweildauer: 1 bis 90 [min], Zelle B

(c) Reinigungssystem der Anode: Zelle B

- Mechanische Reinigung der Anode, Zeitintervall 5, 10 [min]
 - Einfache Reinigung der Anode
 - Reinigung der Anode und Filtrationssystem für die Restsuspension
 - Reinigung der Anode und Kaskadenschaltung
- Elektrische Schaltung: Polaritätsumschaltung, 5 bis 15 [min]

(d) Systemtemperatur: Zelle B, 0-20 [°C]

3. **Elektrisches Prinzip:** galvanostatisches Prinzip

- 1 [A]: Zelle A und B
- 2 [A]: Zelle A, B und C

4. Einfluss der Eigenschaften der **Bentonitsuspension:** Zelle B

- (a) Konzentration des Bentonits W 2,5 %: Zelle A, B und C
- (b) Konzentration des Bentonits W 2 bis 4 %: Zelle B
- (c) Aufladung
 - Labor: Zelle B
 - Baustelle: Zelle B
- (d) Wirkung der Elektrokoagulation auf die Stabilität der Bentonitsuspension (Absetzversuch): : Zelle B

Versuchsreihe Elektrokoagulation	Zelle	Test	Parameter
EMAS	A	22	Elektrodenabstand
			Elektrodenmaterial
			Stromstärke
EMAS	B	28	Elektrodenabstand
			Elektrodenmaterial
			Stromstärke
Anzahl an Elektroden	B	11	Anzahl an Elektroden
			Elektrodenabstand
			Stromstärke
			Elektrische Schaltung
kont. turb. Strömung Rührer	A	33	Elektrodenabstand
			Elektrodenmaterial
			Stromstärke
kont. turb. Strömung Pumpe	A	28	Elektrodenabstand
			Elektrodenmaterial
			Stromstärke
kont. lam. Strömung Pumpe	C	22	Durchfluss
mechanische Reinigung	B	10	Zeitintervall
			Bentonit einsammeln
			Anode wechseln
elektrische Reinigung	B	13	Zeitintervall
Verweildauer	B	9	Verweildauer
Wetterbedingungen	B	6	Temperatur
Konzentration der Susp.	B	6	Konzentration
Aufladung aus dem Labor	B	3	Aufladung
Aufladung aus der Baustelle	B	16	Aufladung
Summe der Tests	A, B und C	207	-

Tabelle 5.1: Übersicht des Versuchsprogramms

Kapitel 6

Versuchsergebnisse der Elektrokoagulation

Durch die Elektrokoagulationsversuche werden die Parameter der Elektrokoagulationszelle (in Bezug auf den Aufbau, der Betriebsart und dem elektrischen Prinzip) untersucht. Parameter der Bentonitsuspension (Bentonittyp, Konzentration der Suspension und deren Aufladung) werden ebenfalls untersucht. Eine Übersicht der Versuchsreihe der Elektrokoagulation wird in Tabelle 6.1 dargestellt. Die Abkürzung EMAS bezieht sich auf die Parameter **E**lektroden**m**aterial, -**a**bstand und **S**trom**s**tärke.

Bei allen Versuchsreihen wird eine 2,5 %-ige Suspension mit Bentonit Typ W-Wyoming von dem Hersteller Phrikolat verwendet. Die Ausnahme bilden die Versuchsreihen, bei denen die Parameter der Bentonitsuspension untersucht werden. Das Bentonit Typ W-Wyoming basiert auf einem natürlichen Natriumbentonit und ist besonders feinkörnig und sehr leicht mischbar. Bedingt durch seinen sehr hohen Montmorillonitanteil ist Bentonit W besonders ergiebig und benötigt nur sehr geringe Quellzeiten. Vom Hersteller werden die folgenden Anwendungskonzentrationen 2,0 bis 4,0 ‰ empfohlen. Die Konzentration einer Suspension ist ein direkter Indikator für den Feststoffgehalt der Suspension vor der Elektrokoagulation (B_0). Im Bezug auf diesen Feststoffgehalt B_0 wird der Parameter „prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit“ bestimmt.

Versuchsreihe	Elektrokoagulation	Zelle	Test	Parameter	Parametertyp
EMAS		A	22	Elektrodenabstand	Aufbau
				Elektrodenmaterial	Aufbau
				Stromstärke	elektrisches Prinzip
EMAS	B	28	Elektrodenabstand	Aufbau	
			Elektrodenmaterial	Aufbau	
			Stromstärke	elektrisches Prinzip	
Anzahl an Elektroden	B	11	Anzahl an Elektroden	Aufbau	
			Elektrodenabstand	Aufbau	
			Stromstärke	elektrisches Prinzip	
			Elektrische Schaltung	Aufbau	
kont. turb. Strömung Rührer	A	33	Elektrodenabstand	Aufbau	
			Elektrodenmaterial	Aufbau	
			Stromstärke	elektrisches Prinzip	
kont. turb. Strömung Pumpe	A	28	Elektrodenabstand	Aufbau	
			Elektrodenmaterial	Aufbau	
			Stromstärke	elektrisches Prinzip	
kont. lam. Strömung Pumpe	C	22	Durchfluss	Betriebsart	
mechanische Reinigung	B	10	Zeitintervall	Betriebsart	
			Bentonit einsammeln Anode wechseln	Betriebsart	
elektrische Reinigung	B	13	Zeitintervall	Betriebsart	
Verweildauer	B	9	Verweildauer	Betriebsart	
Wetterbedingungen	B	6	Temperatur	-	
Konzentration der Susp.	B	6	Konzentration	Suspensionsparameter	
Aufladung aus dem Labor	B	3	Aufladung	Suspensionsparameter	
Aufladung aus der Baustelle	B	16	Aufladung	Suspensionsparameter	
Summe der Tests	A, B und C	207	-		

Tabelle 6.1: Übersicht der Versuchsschritte der Elektrokoagulation

6.1 Einfluss des Aufbaus der Elektrokoagulationszelle

Der Einfluss des Aufbaus der Elektrokoagulationszelle wurde durch unterschiedliche Versuchsreihen bestimmt:

- Die Parameter Elektrodenmaterial, Elektrodenabstand und Stromstärke werden durch die EMAS Versuchsreihe mit Zelle A bzw. mit Zelle B untersucht
- Der Parameter Elektrodenoberfläche wird untersucht, indem die Ergebnisse der Versuchsreihe EMAS-Zelle A und EMAS-Zelle B (beide mit unterschiedlichen Elektrodenoberflächen) verglichen werden.
- Die Anzahl an Elektroden wird durch eine zusätzliche Versuchsreihe mit der Zelle B untersucht.

6.1.1 Elektrodenmaterial, Elektrodenabstand und Stromstärke

Mittels der Zellen A und B werden die Parameter Elektrodenmaterial, -abstand und Stromstärke untersucht. Ziel der Versuchsreihen EMAS ist die Untersuchung des Elektrodenmaterials, -abstandes und der Stromstärke auf die Effektivität der Elektrokoagulation. Im Folgenden werden die Bandbreite der drei Parameter dargestellt:

- Es wurden Elektrodenabstände im Bereich 0,5 bis 6,5 cm untersucht.
- In den Versuchsreihen EMAS mit Zelle A und B wird die Stromstärke (1 und 2 Ampere) unter galvanischem Prinzip untersucht. Das bedeutet, dass die Stromstärke konstant gehalten wird und die Spannung im Laufe der Reaktion variiert.
- Aluminium und Stahl werden als Elektrodenmaterial untersucht.

Die 3 Parameter werden mithilfe der Zelle A und B untersucht. Mit der Zelle A konnte die ganze Bandbreite des Elektrodenabstands nicht untersucht werden. Das Problem liegt darin, dass die Geometrie der Elektroden die Untersuchung der Elektrokoagulation mit 2 Ampere und den Elektrodenabstände von 5,5 und 6,5 cm nicht ermöglicht. Die Elektrokoagulation mit der genannten Kombination von Parametern in der Zelle A führt zu höheren Spannungen, die die Grenzspannung des Netzgerätes überschreitet. Mithilfe der Zelle B kann die gesamte Bandbreite der Parameter untersucht werden. Die Versuchsreihe EMAS-Zelle A und B werden zusammen analysiert und nur die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit der Zelle B werden vorgestellt. Die Tabelle 6.9 und 6.3 stellen die Parameter jeder Versuchsreihe A und B dar.

Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code beschreibt: Stromstärke, Elektrodenmaterial und Elektrodenabstand. Zum Beispiel: der Code 2A-Stahl-1,5cm stellt den Versuch dar, wobei die Stromstärke bei 2 A konstant gehalten wird, die Elektroden aus Stahl und Anode und Kathode 1,5 cm voneinander entfernt sind.

Zuerst werden die Spannungsverläufe der Elektrokoagulation analysiert. Anschließend werden die physikalische Parameter präsentiert. Zum Schluss werden die Ergebnisse zur Effektivität der Reaktion dargestellt. Zusätzlich werden Beobachtungen über das koagulierte Bentonit und die Veränderungen an der Anode kommentiert.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: A		
	Versuchsreihe: EMAS		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	0,5 und 6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm^2]	124,4
	Material	[-]	Al und Stahl
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	1 und 2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.2: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe EMAS-Zelle A

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: EMAS		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	0,5 und 6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm^2]	212
	Material	[-]	Al und Stahl
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	1 und 2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.3: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe EMAS-Zelle B

Spannungsverläufe

Im Folgenden werden die Spannungsverläufe der Elektrokoagulation in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. In den Versuchen wurden sieben verschiedene Abstände zwischen Elektroden verwendet, die jeweils mit unterschiedlicher Stromstärke und Elektrodenmaterialien durchgeführt werden. Die Versuche werden unter galvanischen Prinzip durchgeführt, d.h., die vorgegebene Stromstärke bleibt während der Reaktion konstant. Da die Stromstärke konstant bleibt, variiert nur die Spannung im Laufe der Reaktion.

In der Abbildung 6.1 werden die Spannungsverläufe abgebildet und anschließend beschrieben. Diese Abbildung besteht aus 4 Diagrammen für jede Kombination Stahl oder Aluminium und einer Stromstärke von 1 oder 2 Ampere. Jedes Diagramm zeigt ein Spannungsprofil für jeden Elektrodenabstand. Auf der x-Achse wird die Verweildauer in s, auf der y-Achse wird die Spannung in V angegeben.

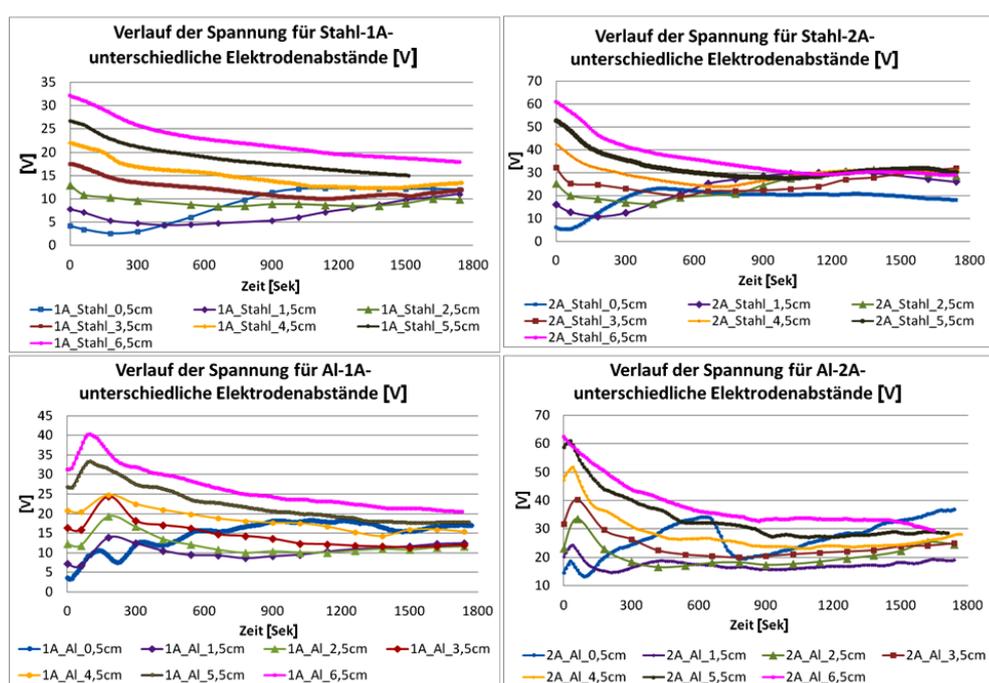


Abbildung 6.1: Spannungsverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

Aus den Diagrammen ergeben sich die folgenden Effekte:

- Auswirkung des Elektrodenabstandes auf die Spannung am Anfang des Versuches
- Variation der Spannung im Laufe der Reaktion
- Endspannungswerte tendieren zu einer bestimmten Spannungsbandbreite
- Spannungsverläufe mit Aluminiumelektroden zeigen Spannungsspitzen am Anfang des Versuches

Die Spannungsverläufe zeigen die **Auswirkung des Elektrodenabstandes auf die Spannung** am Anfang der Reaktion: je größer der Elektrodenabstand ist, desto höher wird die Spannung am Versuchsanfang. Die Spannung und der Widerstand haben eine enge Verbindung bei

den Systemen, die unter galvanischem Prinzip arbeiten. Eine Spannungsänderung ist ein Indikator für eine Widerstandsänderung innerhalb des Systems. Es kann festgestellt werden, dass die Auswirkung des Elektrodenabstandes am Versuchsanfang auf dem Ohm'schen Gesetz basiert: je weiter Anode und Kathode voneinander entfernt sind, desto größer ist der Widerstand des Systems.

Die Spannung der Reaktion bleibt im Laufe der Reaktion nicht konstant, sondern sie variiert. Die Spannungsprofile beschreiben diese **Variation der Spannung**. Diese werden mithilfe von Musterprofilen analysiert, die im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurden. Es lassen sich 3 verschiedene Spannungsprofile definieren: Profil A, B und C (Abb. 6.2).

- Profil A. Die Spannung nimmt exponentiell im Laufe der Verweildauer ab. Sie kann zu einem konstanten Wert tendieren.
- Profil B. Die Spannung schwankt, sie nimmt am Anfang zu, danach nimmt sie ab. Das Profil ist insgesamt unregelmäßig.
- Profil C. Die Spannung sinkt am Anfang und steigt progressiv im Laufe der Reaktion.

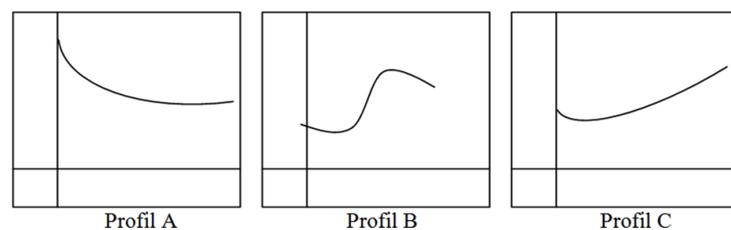


Abbildung 6.2: Profile der Spannungsverläufe der Elektrokoagulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse diesen drei Spannungsprofile zugeordnet:
Das Profil A:

- 1A-Stahl-2,5 bis 6,5 cm
- 1A-Stahl-3,5 bis 6,5 cm
- 1A-Al-1,5 bis 6,5 cm
- 2A-Al-2,5 bis 6,5 cm

Das Profil B:

- 1A-Stahl-0,5 cm
- 2A-Stahl-0,5 und 1,5 cm
- 1A-Al-0,5 cm
- 2A-Al-0,5 und 1,5

Das Profil C:

- 1A-Stahl-1,5 cm

- 2A-Stahl-2,5 cm

Es lassen sich folgende Aspekte definieren:

1. Die Versuche mit den Elektrodenabständen von 3,5 bis 6,5 cm zeigen ein Profil A. Für jedes Diagramm nimmt die Spannung gleichmäßig für jeden Elektrodenabstand ab. Das bedeutet, je größer der Elektrodenabstand ist, desto höher liegen die Spannungsprofile in Diagramm. Beim Versuch Stahl-1A liegt beispielsweise das Profil 6,5 cm über dem Profil 5,5 cm usw. Es kann festgestellt werden, dass die Spannungsprofile ebenfalls das Ohm'sche Gesetz bestätigen.
2. Profile B und C werden von den Versuchen mit niedrigen Elektrodenabständen (0,5 und 1,5 cm) hervorgerufen. Diese Profile bestehen aus Unregelmäßigkeiten, wie Schwankungen der Spannung bzw. Zunahme der Spannung im Laufe der Reaktion. Diese Unregelmäßigkeiten lassen sich wie folgt erklären: Die fortschreitende Anlagerung des Bentonits an der Anodenoberfläche verfüllt in wenigen Minuten die kleinen Elektrodenabstände von 0,5 cm und 1,5 cm. Dies hat zu Folge, dass die elektrische Reaktion blockiert wird. Die elektrische Leitfähigkeit des Mediums zwischen Anode und Kathode hat sich stark verändert bzw. reduziert. Das Medium besteht nicht mehr aus flüssigem Elektrolyt, sondern aus einer festen Bentonitschicht. Daraus resultiert eine Steigung des Widerstandes, bzw. der Spannung.

Alle Versuche zeigen, dass die **Spannungswerte am Versuchsende zu einer bestimmten Spannungsbandbreite tendieren**. Dies hängt von der Stromstärke ab. Im Folgenden werden die Spannungsbandbreite dargestellt, zu denen die Gruppe von Versuche mit Zelle B tendieren. In der Darstellung sind die Ergebnisse von den Versuchen mit 0,5 cm nicht zu berücksichtigen, da die Spannungswerte nicht einheitlich sind und sehr stark variieren.

- Die Spannungswerte am Versuchsende für 1A tendieren zu:

- Al: 11-20 V
- Stahl: 10-18 V
- $Endspannung_{Al} \approx Endspannung_{Stahl}$

- Die Spannungswerte am Ende für 2A tendieren zu:

- Al: 19-25 V
- Stahl: 26-32 V
- $Endspannung_{Al} > Endspannung_{Stahl}$

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse formulieren: Die Spannung bei der Elektrokoagulation mit 2 Ampere ist immer höher als die mit 1 Ampere. Der Einfluss der Stromstärke wird durch das Ohm'sche Gesetz erklärt: Der durch ein System fließende Strom ist proportional zu der angelegten Spannung. Das heißt, dass die Spannung mit steigendem, durch das System fließenden Strom, steigt.

Das Elektrodenmaterial hat keinen deutlichen Einfluss auf die Spannung am Versuchsende.

Aus den Spannungsverläufen der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium geht hervor, dass diese Verläufe eine **Spannungsspitze** zeigen. Diese befinden sich immer im Laufe

der ersten Minuten der Reaktion. Eine Spannungsspitze beschreibt in diesem Zusammenhang ein sofortiges Auf- und Absteigen der Spannung. Die Spitzen ereignen sich bei den Versuchen mit 1 Ampere langsamer und später als bei denen mit 2 Ampere. Eine Ausnahme stellt der Versuch 2A-6,5cm-Al dar, wobei der Spannungsverlauf keine Spitze aufweist. Im Gegensatz dazu zeigen die Verläufe für die Versuche mit Elektroden aus Stahl keine Spannungsspitzen.

Das unterschiedliche Verhalten von Aluminium- und Stahlelektroden lässt sich mithilfe der grundlegenden Eigenschaften von beiden Stoffen erklären. An Luft reagiert elementares Aluminium spontan aufgrund der höheren Oxidierbarkeit unter Bildung einer Oxidschicht. Diese schützt das Aluminium vor Korrosion bzw. Oxidation. Die Beständigkeit der Oxidschicht kann durch Anlegen einer Spannung bzw. einer Stromstärke zerstört werden. [Ost07]. Die erforderliche Spannung für die Zerstörung der Oxidschicht wird als Aktivierungsspannung bezeichnet. Die Aktivierungsspannung ist am Anfang aller Spannungsverläufe mit Aluminiumelektroden durch die Spannungsspitze zu sehen. Sobald die ersten Aluminiumatome oxidieren, sinkt die Spannung mit der Zeit bis zum einem relativ konstanten Wert ab. Die Bildung einer schützenden Oxidschicht findet an der Oberfläche von elementarem Eisen nicht statt, daher stellen die Spannungsprofile von Elektrokoagulation mit Stahlelektroden keine Spannungsspitzen.

Das unterschiedliche Verhalten von Aluminium- und Stahlelektroden lässt sich mithilfe der grundlegenden Eigenschaften von beiden Stoffe erklären. An Luft reagiert elementares Aluminium spontan aufgrund der höheren Oxidierbarkeit mit Sauerstoff unter Bildung einer Oxidschicht. Diese schützt Aluminium vor Korrosion bzw. Oxidation. Die Beständigkeit der Oxidschicht kann durch Anlegen einer Spannung zerstört werden [Ost07]. Die erforderliche Spannung für die Zerstörung der Oxidschicht wird als Aktivierungsspannung bezeichnet. Diese ist am Anfang aller Spannungsverläufe durch die Spannungsspitze zu sehen. In den ersten drei Minuten findet die Zerstörung der Oxidschicht (Al_3O_3) durch die Steigerung der Spannung statt. Sobald die ersten Aluminiumatome oxidieren, sinkt die Spannung mit der Zeit bis zum einem relativ konstanten Wert ab. Die Bildung einer schützenden Oxidschicht findet an der Oberfläche von elementarem Eisen nicht statt. Daher gibt es bei diesen Versuchen keine Spannungsspitzen.

Physikalische Parameter

Die physikalische Parameter variieren während der Elektrokoagulation. Im Folgenden wird die Variation dieser physikalischen Parameter Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit der Restsuspension dargestellt.

Temperatur

Die Abbildung 6.3 stellt die Verläufe der Temperatur der vier Gruppen von Versuche (Al-1A, Al-2A, Stahl-1A und Stahl 2A) für verschiedene Elektrodenabstände dar. Die x-Achse zeigt die Verweildauer in s und die y-Achse die Temperatur der Bentonitsuspension in [°C].

Aus dieser Abbildung lassen sich 2 Aspekte erkennen:

- Temperatur am Versuchsanfang
- Variation der Temperatur im Laufe der Reaktion

Die **Temperatur am Anfang** ist relativ konstant, da von der Raumtemperatur im Labor abhängt. Sie schwankt von 20,8 bis 22,8 °C.

Es kann festgestellt werden, dass in allen Fällen **die Temperatur im Laufe der Reaktion steigt**. Die Endtemperatur variiert je nach Stromstärke, Elektrodenmaterial und Elektrodenabstand. Sie ist am niedrigsten bei den Versuchen mit Elektroden aus Stahl und einer Stromstärke

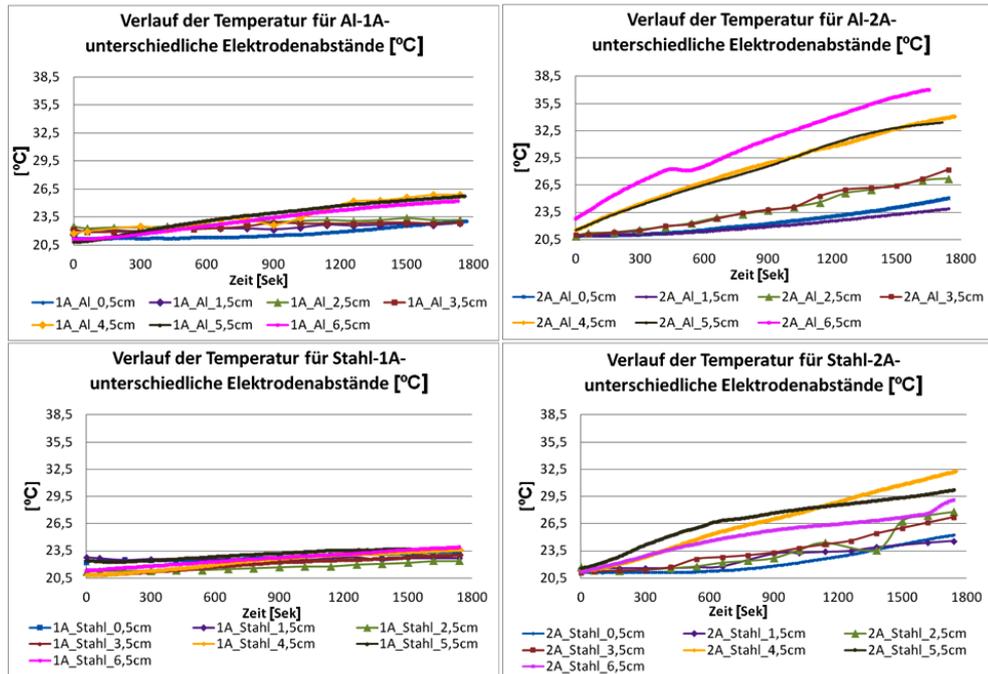


Abbildung 6.3: Temperaturverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

von 1 A. Hierbei liegt die Endtemperatur der Suspension unter 24,5 °C. Sie ist am höchstens bei den Versuchen mit Elektroden aus Aluminium und 2 A. Hierbei liegt die Endtemperatur der Suspension über 32,5 °C.

Die Reaktionen mit einer Stromstärke von 2 Ampere erreicht eine höhere Temperatur als die mit 1 Ampere. Bei den Versuchen mit Aluminiumelektroden nimmt die Temperatur stärker zu als mit Stahlelektroden. Bei der Endtemperatur spielt der Elektrodenabstand ebenfalls eine große Rolle. Es kann festgestellt werden, dass die Versuche mit Elektrodenabständen von 4,5 bis 6,5 cm eine unterschiedliche Tendenz zeigen als jene mit Elektrodenabständen von 0,5 bis 3,5 cm. Im ersten Fall werden höhere Temperaturen am Ende der Reaktion erreicht.

Physikalisch gesehen haben hohe Spannungen ein direktes Verhältnis zu hohen Temperaturen. Bei der Elektrokoagulation führt eine Zunahme der Stromstärke oder des Elektrodenabstands zu einer Zunahme der Spannung. Dabei hat die Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium eine höhere Spannung zur Folge als mit Elektroden aus Stahl.

Grundsätzlich ist die Versuchszeit mit einem Anstieg der Temperatur der Suspension korreliert. (Abb. 6.4)

pH-Wert

Die frische Bentonitsuspension W-2,5% hat einen pH-Wert von ca. 9,00. Anhand der Abbildung 6.5 wird die Variation des pH-Werts erläutert. Die x-Achse zeigt das Elektrodenabstand in cm, die y-Achse zeigt den pH-Wert der Bentonitsuspension nach der Reaktion.

Die Einflüsse des Elektrodenmaterials, Elektrodenabstandes und der Stromstärke werden im Folgenden beschrieben.

Die Elektrokoagulation mit Elektroden aus Stahl ergibt eine Restsuspension mit einem höheren pH-Wert als die mit Aluminiumelektroden. Dieser Einfluss ist von der Stromstärke unabhängig. Die Stromstärke hat nur eine niedrige Wirkung: die Reaktion mit höherer Stromstärke führt zu einem höheren pH-Wert der Restsuspension.

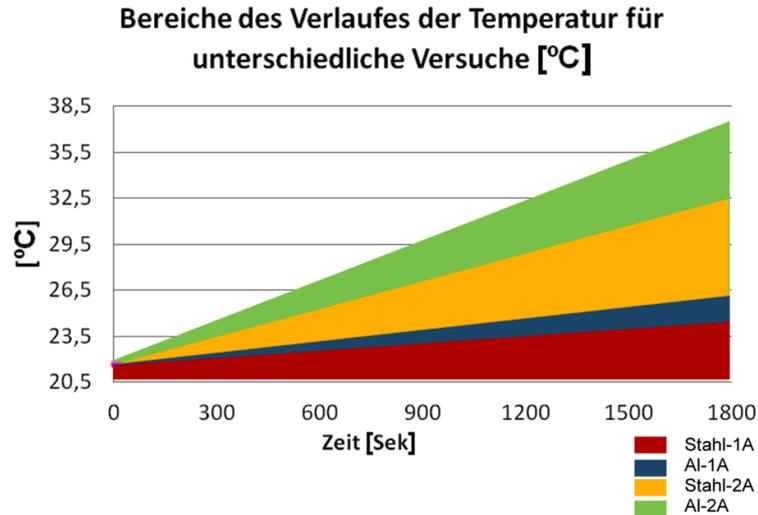


Abbildung 6.4: Tendenz der Temperatur der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

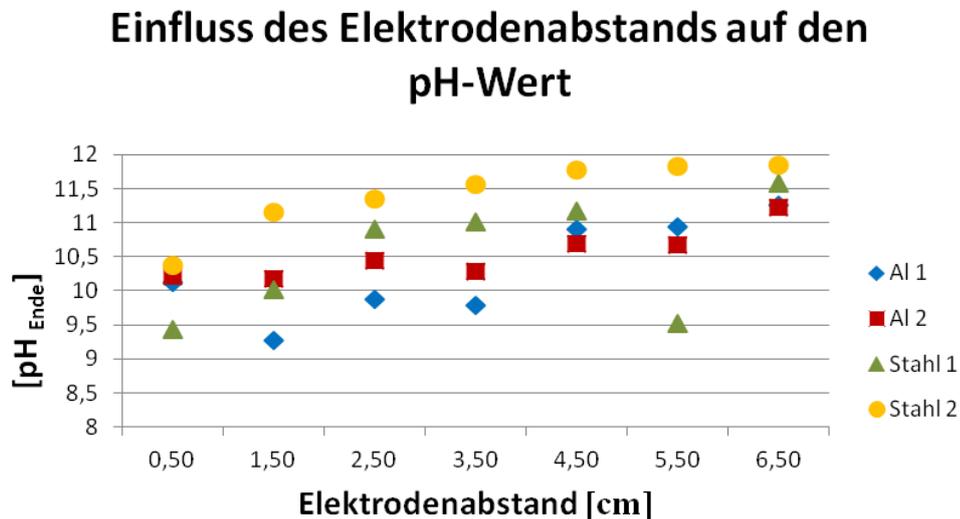


Abbildung 6.5: pH-Wert der Restsuspension vs. Elektrodenabstand, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

Der Einfluss des Elektrodenabstands auf den pH-Wert der Suspension am Ende der Reaktion ist deutlich zu erkennen: je weiter die Elektroden voneinander entfernt sind, desto stärker ist die Zunahme des pH-Werts. Eine Ausnahme stellt der Versuch 2A-Stahl-5,5cm dar.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Stahlelektroden, Elektrodenabstand und Stromstärke einen positiven Einfluss auf der Zunahme des pH-Werts ausüben.

Leitfähigkeit

Die frische Bentonitsuspension W-2,5% hat eine Leitfähigkeit zwischen 900 und 1000 $\mu S/cm$. Die Analyse der Leitfähigkeit der Restsuspension wird mithilfe der Abbildung 6.6 erläutert. Die x-Achse zeigt der Elektrodenabstand in cm und die y-Achse zeigt die Leitfähigkeit der Bentonitsuspension in $\mu S/cm$.

Die Leitfähigkeit steigt im Laufe der Reaktion. Die Versuche 2A-Stahl zeigen die höchsten Werte der Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit am Ende der Reaktion für die Versuche 2A-Stahl

Einfluss des Elektrodenabstands auf die Leitfähigkeit

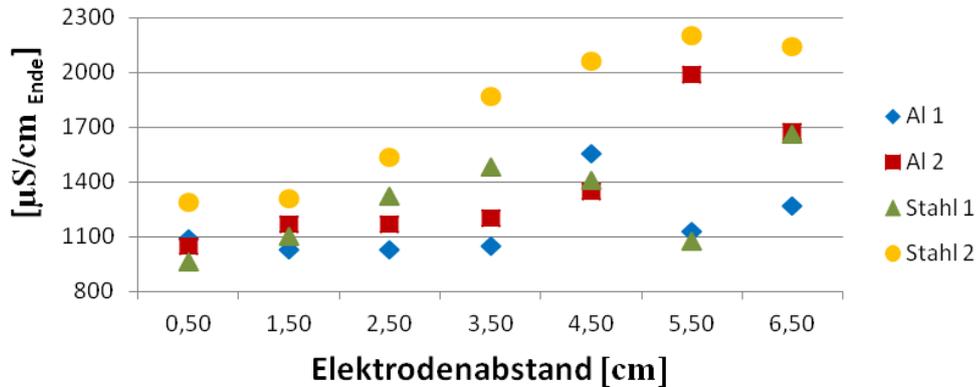


Abbildung 6.6: Leitfähigkeit der Restsuspension vs. Elektrodenabstand, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

3,5 bis 6,5 cm ist höher als $2000 \mu S/cm$. Der Verlauf der Versuche Stahl-1A sowie Al-1A und 2A zeigt bei großen Elektrodenabständen unregelmäßige Werte. So beträgt zum Beispiel die Leitfähigkeit der Versuche Al-1A mit Elektrodenabständen 0,5 bis 3,5 cm unter $1100 \mu S/cm$. Anschließend beträgt diese bei 4,5; 5,5 und 6,5 cm ca. 1550, 1150 bzw. 1250 $\mu S/cm$. Dieser Effekt liegt daran, dass die Leitfähigkeit nicht sofort nach der Elektrokoagulation, sondern einige Minuten später, abgelesen wurde. In diesen Fällen werden sowohl die Zunahmen während der Reaktion als auch die Verringerung der Leitfähigkeit nach der Reaktion berücksichtigt.

Generell kann festgestellt werden, dass die Leitfähigkeit der Suspension während der Elektrokoagulation steigt.

Effektivitätsparameter

Die Effektivität der Elektrokoagulation wird anhand von Diagrammen vorgestellt. Jedes Diagramm bezieht sich auf die Ergebnisse von einem der drei Effektivitätsparameter:

- $B_{kt}\%$: prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit
- $\Delta\rho\%$: Verringerung der Dichte der Restsuspension
- $\Delta FW\%$: Verringerung der Stabilität der Restsuspension

Die Abbildung 6.7 stellt den **prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit** für verschiedene Elektrodenabstände, Elektrodenmaterialien und Stromstärken dar. Die x-Achse zeigt den Elektrodenabstand in *cm*, die y-Achse zeigt den prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit in $\%$.

Wie in der Abbildung ersichtlich ist, hat das Elektrodenmaterial wenig Einfluss auf diesen Parameter. Der Unterschied zwischen Stahl und Aluminium ist zwar minimal, jedoch weist der Stahl einen leichten Vorteil gegenüber dem Aluminium auf.

Dagegen zeigt der Elektrodenabstand einen großen Einfluss auf diesen Parameter. Je weiter die Elektroden voneinander stehen, desto höher ist der Parameter $B_{kt}\%$. Bei einer Stromstärke von 2 Ampere ist das Verhältnis des Elektrodenabstand zu $B_{kt}\%$ linear. Im Gegensatz dazu ist

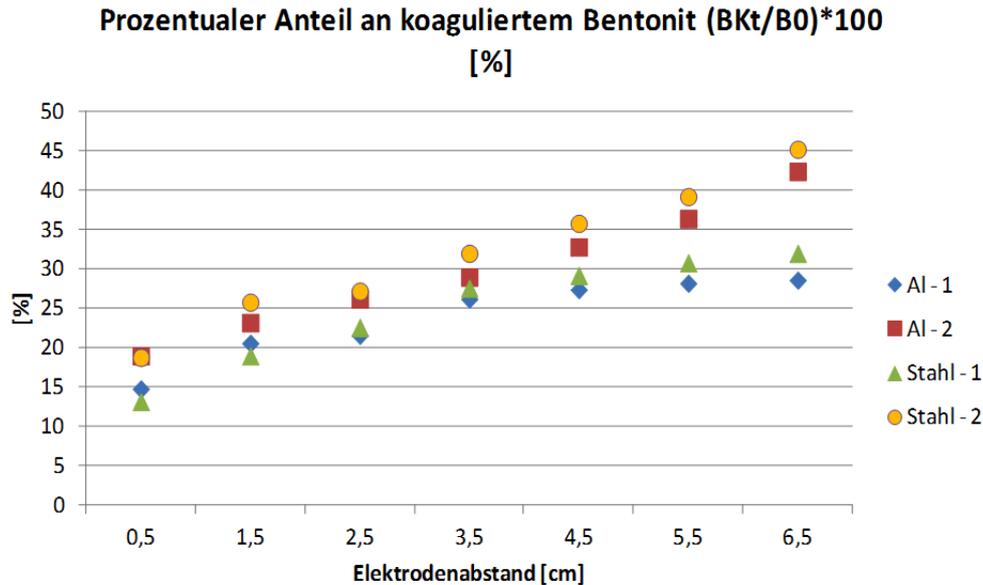


Abbildung 6.7: Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

dieses Verhältnis bei einer Stromstärke von 1 Ampere nur bis zum Elektrodenabstand von 3,5 cm linear. Ab Werten oberhalb von 3,5 cm hat der Abstand keinen Einfluss mehr und der Wert $B_{kt}\%$ stagniert auf ca. 30 %.

Die Auswirkung der Stromstärke auf dem Parameter $B_{kt}\%$ kann in Abbildung 6.7 erkannt werden. Bei kurzen Elektrodenabständen (0,5 bis 2,5 cm) ist der Einfluss gering. Im Gegensatz dazu ist dieser Einfluss bei Elektrodenabständen ab 4,5 cm größer. Hier ist zu betonen, dass der Einfluss der Stromstärke auf die Effektivität bzgl. des Parameters $B_{kt}\%$ nicht linear ist: die Verdoppelung der Stromstärke führt nicht zu einer Verdoppelung des prozentualen Anteils an koagulierte Bentonit.

Die besten Ergebnisse erzielen die Versuche der Elektrokoagulation mit der Stromstärke von 2 Ampere und Elektrodenabstand von 6,5 cm: bei dieser Konstellation beträgt der Parameter $B_{kt}\%$ über 42%.

Die **Verringerung der Dichte der Restsuspension** wird in der Abbildung 6.8 vorgestellt. Die x-Achse zeigt den Elektrodenabstand in cm, die y-Achse zeigt die Verringerung der Dichte der Restsuspension in %. Hier ist zu betonen, dass die Dichte der Suspension W 2,5 % vor der Elektrokoagulation ca. $1,012 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Eine Verringerung der Dichte von 100% bedeutet, dass die Restsuspension die Dichte von Wasser ($1,00 \text{ g/cm}^3$) erreicht.

Das Elektrodenmaterial spielt eine Rolle bei der Effektivität der Reaktion bzgl. die Verringerung der Dichte. Im Allgemeinen zeigen die Versuche mit Elektroden aus Aluminium eine niedrigere Dichte der Restsuspension als die Versuche mit Elektroden aus Stahl.

Der Einfluss des Elektrodenabstands auf die Verringerung der Dichte ist positiv korreliert und linear. Dieser Einfluss ist mit dem vom Parameter $B_{kt}\%$ (Abbildung 6.7) vergleichbar.

Im Gegensatz zur Analyse des Parameters $B_{kt}\%$ ist der Einfluss der Stromstärke auf die Verringerung der Dichte einheitlicher: die Abhängigkeit Stromstärke zu Verringerung der Dichte ist nicht in jedem Fall proportional. Die Versuche mit Elektrodenabständen von 5,5 und 6,5 cm bewegen sich in Richtung Linearität: zum Beispiel zeigen die Versuche Al-1A-6,5cm und Al-2A-6,5cm, eine Verringerung der Dichte von 29,3 bzw. 57,7 %.

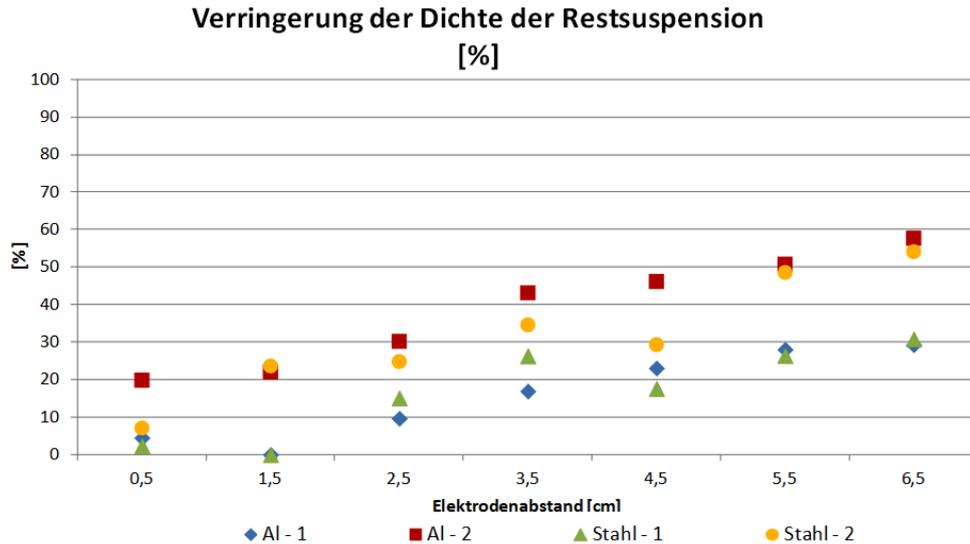


Abbildung 6.8: Verringerung der Dichte der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

Anschließend werden die besten Ergebnisse zur Verringerung der Dichte mit Zelle B nicht nur in %, sondern auch in g/cm^3 dargestellt.

- Al-2A-6,5cm: $\rho_R = 1,0058g/cm^3$, $\Delta\rho = 57,7\%$
- Stahl-2A-6,5cm: $\rho_R = 1,0055g/cm^3$, $\Delta\rho = 54,2\%$

Im Bereich des Parameters „Verringerung der Dichte“ ist auch zu berücksichtigen, dass die Elektrokoagulation mit Zelle A ebenfalls relevante Ergebnisse erzielt. Diese werden anschließend vorgestellt.

- Al-2A-2,5cm: $\rho_R = 1,0047g/cm^3$, $\Delta\rho = 60,9\%$
- Al-2A-3,5cm: $\rho_R = 1,0050g/cm^3$, $\Delta\rho = 57,7\%$

Im Folgenden wird die **Stabilität der Restsuspension** analysiert (Abb. 6.9). Durch die Ergebnisse der Filterpresse wird die Zunahme der Filtratwasserabgabe berechnet. Diese ist ein Indikator der Verringerung der Stabilität der Restsuspension. Auf die x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm, auf die y-Achse wird die Zunahme der Filtratwasserabgabe in % angegeben.

Aus diesen Ergebnisse geht eine Tendenz bzgl. des Elektrodenmaterials hervor: die Versuche mit Aluminiumelektroden zeigen deutlich höhere Werte für die Zunahme der Filtratwasserabgabe. D. h. die Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium kann die Bentonitsuspension besser destabilisieren. Damit qualifiziert sich das Aluminium als bevorzugtes und geeignetes Elektrodenmaterial.

Der Elektrodenabstand spielt ebenfalls eine große Rolle bei der Verringerung der Stabilität der Restsuspension. Das Verhältnis zwischen dem Abstand und diesem Effektivitätsparameter ist fast linear. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse zur Versuchsreihe Stahl-2A. Diese zeigen zwar lineare Verläufe, jedoch mit einem Sprung zwischen 3,5 und 4,5 cm.

Der Einfluss der Stromstärke auf die Verringerung der Stabilität ist ebenfalls von Bedeutung. Dieser ist größer bei der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden als bei der Elektrokoagulation mit Stahlelektroden. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse der Versuchsreihe Stahl-2A ab dem Elektrodenabstand von 4,5 cm.

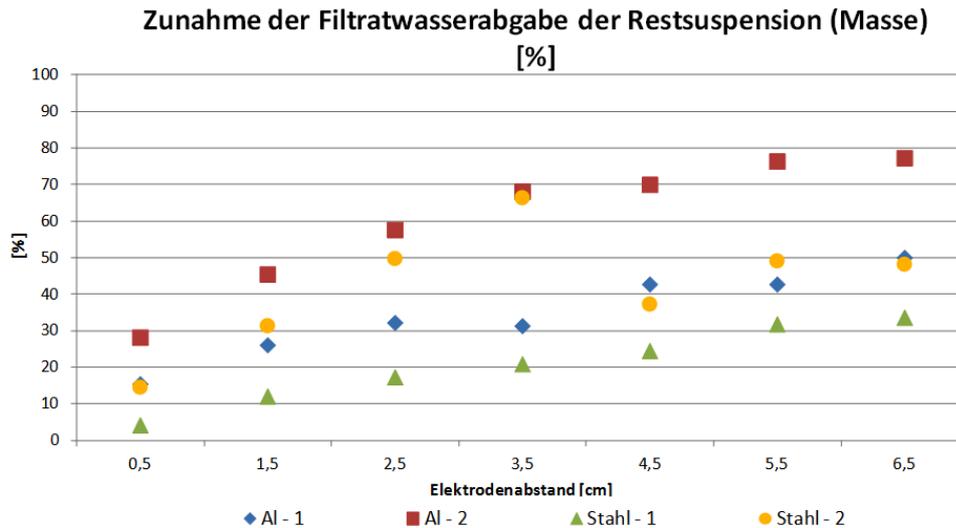


Abbildung 6.9: Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Versuchsreihe: EMAS-Zelle B

Die Versuche Al-2A mit Elektrodenabstand 5,5 und 6,5 cm erzielen die beste Ergebnisse:

- Al-2A-6,5cm: $\Delta FW = 77,3\%$
- Al-2A-5,5cm: $\Delta FW = 76,4\%$

Kommentar über das koagulierte Bentonit

Das Bentonit wird während der Elektrokoagulation an der Anodenoberfläche angelagert. Es sieht in Nass- oder Trockenzustand je nach Elektrodenmaterial anders aus. Die Abbildungen 6.10 und 6.11 stellen das angelagerte Bentonit an der Anodenoberfläche in Nass- und Trockenzustand dar.



Abbildung 6.10: Anlagerung des Bentonits an der Anodeoberfläche, mit Stahl- und Aluminiumelektroden, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A

Die Farbe des koagulierten Bentonits bei der Elektrokoagulation mit **Stahlelektroden** ändert sich im Laufe der Zeit im Minutenbereich. Sofort nach der Reaktion haben die koagulierten

Stahlelektroden



Aluminiumelektroden



Abbildung 6.11: Trockenes koaguliertes Bentonit, mit Stahl- und Aluminiumelektroden, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A

Partikel die Farbe grau-grün. Nach circa 10 Minuten werden sie orange-gelb. Die Probe von koaguliertem Bentonit wird anschließend im Ofen getrocknet. Das trockene Material nach der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Stahl hat die Farbe braun-rot. Diese wechselnde Farbvariation des koagulierten Bentonits lässt sich mithilfe der chemischen Vorgänge erklären.

Die Hydroxid Spezies, die die Elektrokoagulation mit Stahlelektroden ergibt, sind die Spezies OH mit Fe(II) und Fe(III). Der chemische Vorgang $Fe^{2+} + 2OH^{2-}$ ergibt die Verbindung $Fe(OH)^2$, der chemische Vorgang $Fe^{3+} + (OH)^{3-}$ ergibt die Verbindung $Fe(OH)^3$.

Die Verbindung $Fe(OH)^2$ wird grün in sauerstoffreichen Bedingungen. Das Eisen Fe(II) kann zu Fe(III) oxidieren. Der Prozess ergibt die Verbindung $Fe(OH)^3$, die eine dunkle rot-braune Farbe hat. [wik]

Während des Trockenprozesses der Hydroxiden im Ofen verlieren diese ihre Wassermoleküle. Sie werden zu Metalloxide. Aus Fe-Hydroxide werden also Fe-Oxide, die auch eine bräunliche Farbe haben.

Es kann festgestellt werden, dass die chemische Vorgängen während und nach der Elektrokoagulation und während des Trockenprozesses für die Variation der Farbe des Bentonits verantwortlich sind.

Im Gegensatz dazu hat das koagulierte Bentonit bei der Elektrokoagulation mit **Aluminiumelektroden** eine stabile Farbe, d.h. diese ändert sich nicht im Laufe der Zeit. Das Hydroxid-System, das in diesem Fall entsteht, ist $Al(OH)^3$. Da Aluminium nur die Valenz 3 hat, wird nicht weiter oxidiert. Während des Dehydratisierens der Hydroxiden im Ofen entstehen Metalloxide. In dem Fall der Versuche mit Aluminiumelektroden werden aus Al-Hydroxide Al-Oxide. Das Al-Hydroxyd verfügt über eine weißliche Farbe, die das koagulierte, nasse bzw. trockene Bentonit charakterisiert.

Veränderungen an der Anode

Die Elektrokoagulation basiert auf dem Vorgang der Elektrolyse. Bei der Elektrolyse mit chemisch aktiven Elektroden wird die Anode aufgelöst. Das heißt, die Oberfläche der Anode ändert sich im Laufe der Reaktion. Nach der Reaktion ist die Oberfläche der Anode nicht mehr glatt, sondern rau und porös.

Die Abbildung 6.12 zeigt die Oberfläche einer Anode aus Aluminium nach 30 Minuten Reaktion. Es lassen sich 3 verschiedene Areale erkennen. Die obere Seite der Anode (a) gehört

nicht zur aktiven Anodenoberfläche, d.h. sie war nicht im Elektrolyt eingetaucht. Es ist zu bemerken, dass die Oberfläche in diesem Fall glatt ist. Die untere Seite der Anode ist die Seite, die im Elektrolyt eingetaucht war und dementsprechend an der Elektrolyse teilgenommen hat. In diesem Fall ist die Oberfläche rau und hat Unebenheiten. Innerhalb der rauhen Anodenoberfläche kann man zwei verschiedene Areale (b und c) unterscheiden. Beide Areale nehmen an der Elektrolyse teil, sind jedoch unterschiedlich beansprucht worden. Die Areale b sind leichter beansprucht als die Areale c. Dieser Unterschied kann mithilfe der Redox-Reaktionen erklärt werden. Im Laufe der Reaktion entsteht klares Wasser. Da das Wasser eine niedrigere Dichte als die Bentonitsuspension hat, bleibt es an der Oberfläche der Elektrokoagulationszelle. Da Wasser und Suspension unterschiedliche Leitfähigkeitswerte haben, findet die Redox-Reaktion mit verschiedenen Stärken statt. Das bedeutet, dass die Spannungsverteilung an der Anode nicht einheitlich ist. Laut der Theorie der elektrochemischen Zellen muss dieser Effekt vermieden werden.

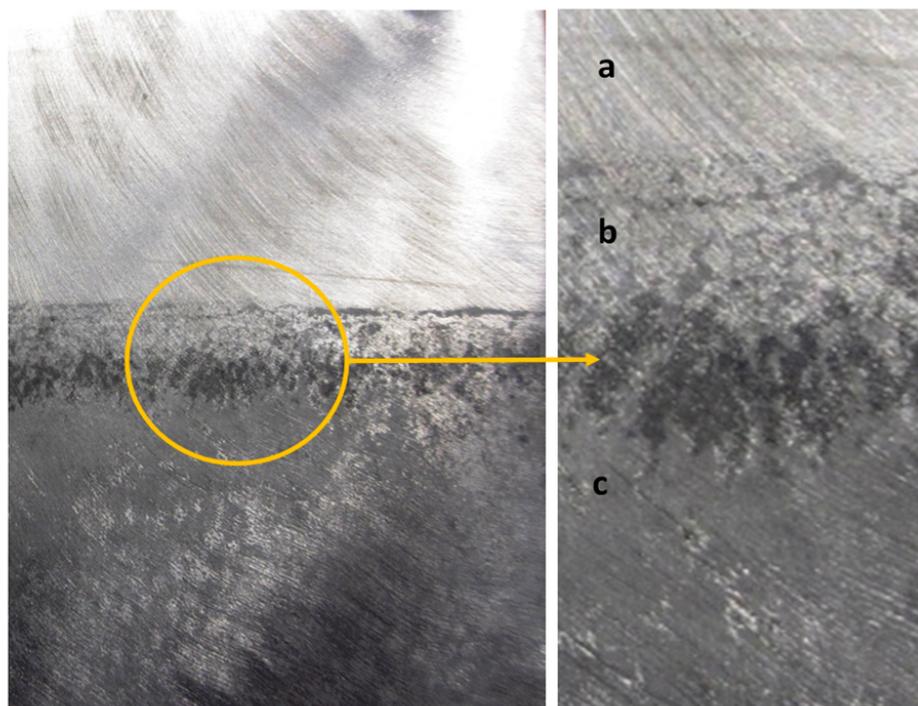


Abbildung 6.12: Oberfläche einer Aluminiumanode nach 30 min Elektrokoagulation, Versuchsreihe: EMAS-Zelle A

Fazit

Die Analyse des Spannungsverlaufs lässt folgende Effekte erkennen:

- Der Elektrodenabstand übt eine positive Auswirkung auf die Spannung am Anfang der Reaktion. D.h. je weiter die Elektroden voneinander entfernt sind, desto höher ist die Spannung, was aus dem Ohm'schen Gesetz bei einer konstanten Stromstärke (galvanisches Prinzip) hervor geht.
- Bei Elektrodenabständen von 3,5 bis 6,5 cm nimmt die Spannung im Laufe der Reaktion gleichmäßig ab. Das bestätigt ebenfalls das Ohm'sche Gesetz: je weiter die Elektroden voneinander entfernt sind, desto größer ist die resultierende Spannung.

- Bei Abständen kleiner 2,5 cm verfüllt sich der Raum zwischen Anode und Kathode mit festem koaguliertem Bentonit. Dies verursacht die Blockierung der elektrochemischen Reaktion. Aus diesem Grund steigt die Spannung.
- Endspannungswerte tendieren je nach Stromstärke zu einer bestimmten Spannungsbandbreite. Die Versuche mit 2A ergeben die höheren Spannungswerte am Ende der Reaktion.
- Die Zerstörung einer Schutzschicht an der Oberfläche der Aluminiumanode findet durch eine Erhöhung der Spannung am Reaktionsanfang statt. Diese Zerstörung wird in Form einer Spannungspitze registriert. Dieses Phänomen ist bei Stahlelektroden nicht zu erkennen, da der Stahl keine Schutzschicht entwickelt.

Als Haupttendenz aus der Analyse der physikalischen Parameter lässt sich erkennen, dass die Temperatur, der pH-Wert und die Leitfähigkeit im Laufe der Elektrokoagulation zunehmen.

Aus den Ergebnissen zur Effektivität der Elektrokoagulation geht hervor, dass die Leistungsfähigkeit der Reaktion (bezüglich der Parameter B_{kt} und $\Delta\rho$) mit zunehmender Stromstärke und zunehmendem Elektrodenabstand anstieg.

Die Analyse der Stabilität der Restsuspension ergibt, dass diese nach der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand deutlich instabiler wird. Diese Ergebnisse deuten auf Aluminium als bevorzugtes Elektrodenmaterial.

Die Beobachtungen des angelagerten koagulierten Bentonits zeigen, dass die Elektrokoagulation mit Stahlelektroden zu einem chemisch instabilen koagulierten Bentonit führt. Dieses Phänomen ist beim koagulierten Bentonit mit Aluminiumelektroden nicht zu erkennen. Daraus resultiert die Bevorzugung von Aluminiumelektroden.

Der Effekt der Wasseransammlung an der oberen Seiten der Zelle verursacht eine nicht einheitliche Reaktionsstärke bzw. Spannungsverteilung. Daher ist dieser Effekt zu vermeiden.

Die besten Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Zelle A und B sind die folgenden:

- $B_{kt}/B_0 > 42\%$, Al-2A-6,5 cm, Zelle B
- $\Delta\rho > 60\%$, Al-2A-2,5 cm, Zelle A
- $\Delta FW > 77\%$, Al-2A-6,5 cm, Zelle B

Diese Ergebnisse zeigen die optimalen Werte für die 3 analysierten Parameter.

- Stromstärke: 2 Ampere
- Elektrodenabstand: 6,5 cm
- Elektrodenmaterial: Aluminium

Sie fließen in die folgende Versuchsreihe als Best-Combination ein. Die Zelle B zeigt im Allgemeinen bessere Effektivität als die Zelle A.

Zelle	A	B
Aktive Elektrodenoberfläche/Volumen [m^2/m^3]	6,22	10,60
Stromdichte (1A) [A/m^2]	80,38	47,17
Stromdichte (2A) [A/m^2]	160,77	94,34

Tabelle 6.4: Parameter der Elektrokoagulationszellen A und B

6.1.2 Elektrodenoberfläche

Die aktive Elektrodenoberfläche ist die Seite der Elektrode, die in den Elektrolyt eingetaucht ist und an der elektrischen Reaktion teilnimmt. Dieser Parameter wird untersucht, indem die Ergebnisse der Versuchsreihen EMAS-Zelle A und B verglichen werden. Zelle A und B haben eine aktive Elektrodenoberflächen von 124,4 bzw. 212,0 cm^2 .

Im Bezug auf die aktiven Elektrodenoberflächen können die folgenden zwei Parameter definiert werden.

- Verhältnis Aktive Elektrodenoberfläche zum Volumen der Zelle AF/V , [m^2/m^3]
- Stromdichte, J , [A/m^2]

Die Stromdichte bezieht sich auf die Dosierung von Metallionen aus der Anode und das Entstehen von Gasen. Diese ist ein Indikator für die Stärke der elektrochemischen Reaktion. Das Verhältnis Aktive Elektrodenoberfläche zum Volumen der Zelle AF/V ist ein Indikator für die Verteilung der Metallionen aus der Anode in der Zelle. Die Tabelle 6.4 stellt die Werte der Parameter AF/V und J für jede Zelle und Stromstärke dar:

Die Auswertung hinsichtlich des Parameters Stromdichte ergeben, dass bei der Zelle A die Reaktion stärker ist als bei der Zelle B. Alle Werte, außer der Stromdichte von Zelle A mit 2 Ampere, liegen im Bereich der Referenz von 10 bis 150 A/m^2 [Hol02].

Der Parameter AF/V aus der Tabelle zeigen, dass bei der Zelle B die Metallionen besser verteilt sind als bei der Zelle A. Beide Werte liegen im Bereich der Referenz von 6,9 bis 43 m^2/m^3 [Hol02]. Trotzdem sind diese Werte der Zellen A und B weit entfernt vom Maximum, welches bei 43 m^2/m^3 liegt. Um das Verhältnis AF/V zu erhöhen, ist offensichtlich eine Vergrößerung der aktiven Elektrodenoberfläche erforderlich.

Im Folgenden werden die Spannungsverläufe und die Effektivitätsparameter beider Versuchsreihe verglichen.

Spannungsverläufe

Elektrokoagulation mit Zelle A und B zeigen die gleichen Tendenzen.

- Die Spannungsprofile der Elektrokoagulation mit Elektrodenabstand von 0,5 cm schwanken im Laufe der Verweildauer und folgen nicht den Bedingungen des Ohm'schen Gesetzes.
- Die Endspannungswerte tendieren zu einer konstanten Spannungsbandbreite je nach Stromstärke und Zelle. Der Unterschied zwischen den Endspannungswerten von Zelle A und Zelle B bezieht sich auf den Unterschied zwischen den aktiven Elektrodenoberflächen der Zelle A und B.

$$\text{Elektrodenoberfläche}_B / \text{Elektrodenoberfläche}_A = 1,7$$

$$\text{Elektrodenoberflaeche}_B = 1,7 \cdot \text{Elektrodenoberflaeche}_A$$

$$\text{Endspannungswert}_A = 1,7 \cdot \text{Endspannungswert}_B$$

- Die Spannungsverläufe der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden zeigen Spannungsspitzen am Anfang der Reaktion.

Effektivitätsparameter

Im Folgenden werden die Effektivitätsparameter von Zelle A und Zelle B anhand von Diagrammen verglichen.

Die Abbildung 6.13 stellt den **Parameter** $B_{kt}\%$ der Zelle A und B im Vergleich dar. Diese Abbildung besteht aus dem Diagramm für Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium (Links) bzw. aus Stahl (Rechts).

Die Ergebnisse des Parameters $B_{kt}\%$ zeigen für Zelle A und B die gleiche Tendenz. Der Unterschied zwischen $B_{ktA}\%$ und $B_{ktB}\%$ sind vernachlässigbar ($< 5\%$). Die Ergebnisse der Zelle B sind geringfügig besser als die mit der Zelle A. Zu diesem Aspekt gibt es 2 Ausnahmen:

1. Bei den Versuchen Stahl-1A-3,5 bis 4,5 cm ist $B_{ktB}\%$ über 5% (aber unter 10%) höher als $B_{ktA}\%$.
2. Beim Versuch Al-2A-2,5 cm ist $B_{ktA}\%$ über 5% (aber unter 10%) höher als $B_{ktB}\%$.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse des Parameters $B_{kt}\%$ geht hervor, dass die untersuchte Bandbreite bzgl. der aktiven Elektrodenoberflächen keinen deutlichen Einfluss auf die Effektivität ausübt. Im Allgemeinen liefert die Zelle B bessere Ergebnisse als Zelle A bzgl. des Parameters $B_{kt}\%$.

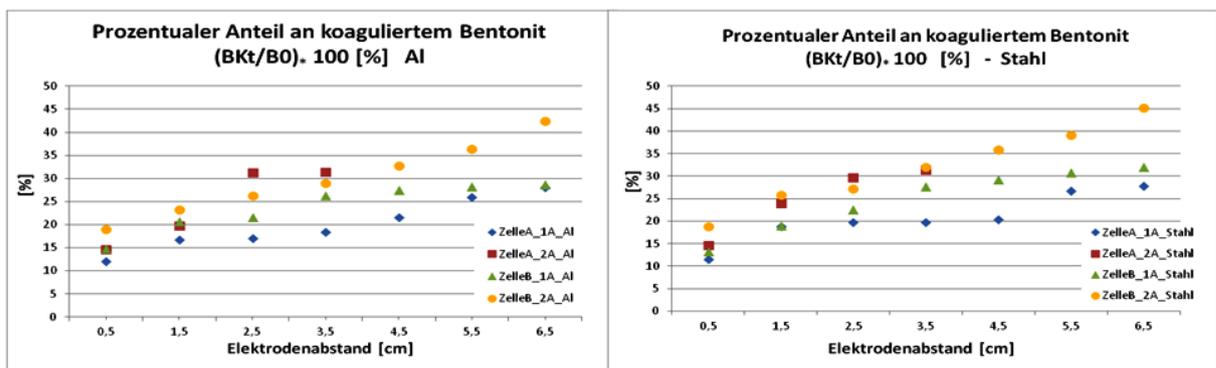


Abbildung 6.13: Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B

Die Abbildung 6.14 stellt die Ergebnisse bzgl. des Parameters **Verringerung der Dichte der Restsuspension** für die Zelle A und B dar. Diese Abbildung besteht aus dem Diagramm für Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium (Links) bzw. aus Stahl (Rechts).

Bezüglich dieses Parameters liegen die Ergebnisse der Zelle A höher als die der Zelle B. Bei den folgenden Beispielen liegt der Unterschied zwischen $\Delta\rho_A\%$ und $\Delta\rho_B\%$ zwischen 10 und 20 %.

- Al-1A-1,5 cm

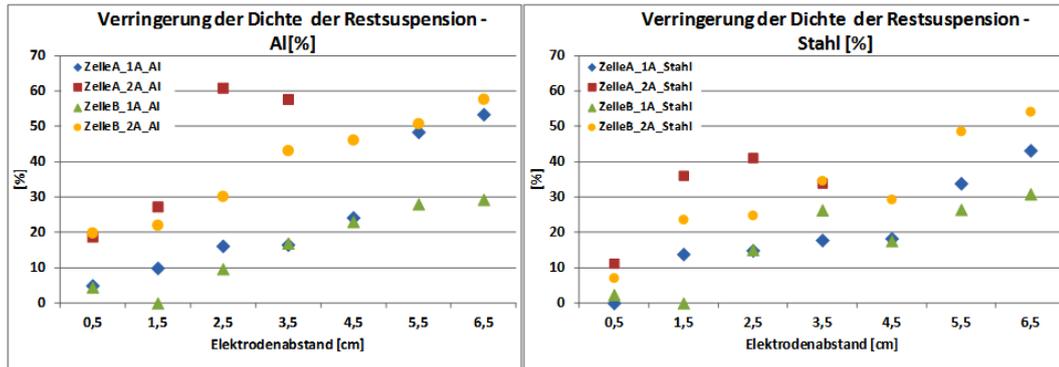


Abbildung 6.14: Verringerung der Dichte der Restsuspension, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B

- Al-2A-3,5 cm
- Stahl-1A-1,5 und 6,5 cm
- Stahl-2A-2,5 und 3,5 cm

Beim Versuch Al-1A-3,5 cm beträgt der Unterschied bis zu 30%. Eine Ausnahme bildet der Versuch Stahl-1A-3,5 cm, wobei Zelle B höhere Werte des Parameters als Zelle A zeigt (der Unterschied beträgt ca. 10%).

Die Abbildung 6.15 stellt die Ergebnisse bzgl. des Parameters **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** der Zelle A und B dar. Diese Abbildung besteht aus dem Diagramm für Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium (Links) bzw. aus Stahl (Rechts).

Bezüglich der Verringerung der Stabilität der Restsuspension liegen die Ergebnisse der Zelle B höher als die der Zelle A. Bei den folgenden Beispielen liegt der Unterschied zwischen $\Delta FW_A\%$ und $\Delta FW_B\%$ zwischen 10 und 20 %.

- Al-1A-0,5 und 5,5 bis 6,5 cm
- Al-2A-1,5 und 3,5 cm
- Stahl-1A-4,5 cm
- Stahl-2A-1,5 bis 2,5 cm

Beim Versuch Stahl-2A-3,5 cm beträgt der Unterschied bis zu 40%. Eine Ausnahme bildet der Versuch Al-1A-4,5 cm, wobei Zelle B höhere Werte des Parameters als Zelle A zeigt (der Unterschied beträgt ca. 10%).

Fazit

Im Allgemeinen sind die Ergebnisse der Zelle B vorteilhafter als die der Zelle A. Eine deutliche Tendenz ist nicht zu erkennen. Je nach Parameter ist eine Zelle gegenüber der Anderen bevorzugt. Laut der Ergebnisse der Parameter $B_{kt}\%$ und $\Delta FW\%$ ist die Zelle B bevorzugt. Im Gegensatz dazu ist die Zelle A laut der Ergebnisse des Parameters $\Delta\rho\%$ bevorzugt.

Bei diesem Vergleich ist zu betonen, dass die Zelle B niedrige Spannung für die Reaktion unter 1 oder 2 Ampere erfordert, da die aktive Elektrodenoberfläche größer ist. Aus diesem Grund wird Zelle B bevorzugt und als Parameter der „Best-Combination“ bezeichnet.

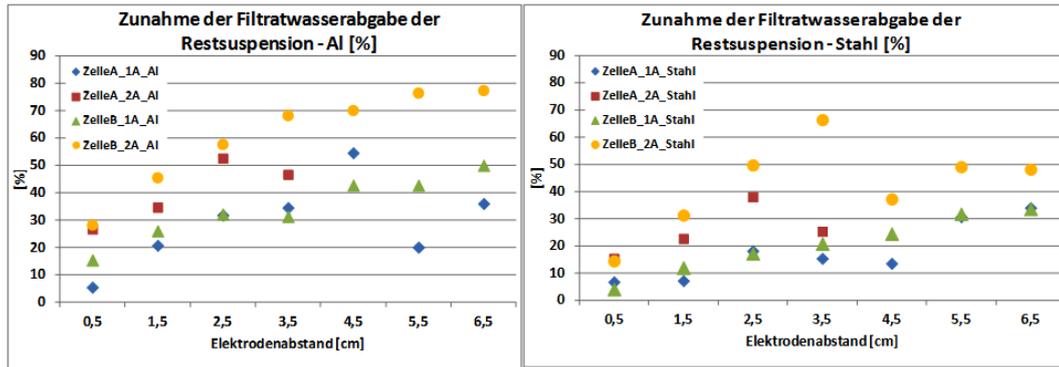


Abbildung 6.15: Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Vergleich der Versuchsreihe: EMAS-Zelle A und B

Dennoch wird die Zelle A in weiteren Versuchsreihen angewendet, zum Beispiel bei den Versuchen mit turbulenter Strömung.

6.1.3 Anzahl an Elektroden

Ziel dieser Versuchsreihe ist die Bestimmung des Einflusses der Größe der aktiven Elektrodenoberfläche auf die Effektivität des Koagulationsprozesses. In dieser Versuchsreihe wird die aktive Elektrodenoberfläche vergrößert, indem die Anzahl an Elektroden in der Zelle erhöht wird. Gleichzeitig wird der Parameter J [$\frac{m^2}{m^3}$], die aktive Elektrodenoberfläche durch Volumen der behandelten Suspension, vergrößert und der Parameter Stromdichte [$\frac{A}{m^2}$], d.h. Stromstärke durch aktive Elektrodenoberfläche, wird durch den Einsatz von mehreren Elektrodenpaaren verkleinert.

Eine elektrochemische Zelle mit einer Anode und einer Kathode wird als Standard-Elektrode bezeichnet. Eine Zelle mit mehr als einem Elektrodenpaar hat Monopolar- oder Bipolar-Elektroden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe werden nur Monopolar-Elektroden eingesetzt. Als elektrische Schaltung zwischen Netzgerät und Elektroden werden die zwei Möglichkeiten untersucht: Serien- und Parallelschaltung.

Im Laufe der Versuchsreihe wurden die folgenden Parameter variiert:

- **Elektrische Schaltung: Serien- oder Parallelschaltung**
- **Abstand der Elektroden: 1,5 und 2,5 cm**
- **Stromstärke: 1 und 2 Ampere**

Die Tabelle 6.5 stellt den Parameter jedes Versuchs dar. Die Zelle B mit Elektroden aus Aluminium wurde eingesetzt.

Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code beschreibt die Aufbau- und Betriebsbedingungen: Zelle, Anzahl an Elektroden oder Elektrodenpaare, Stromstärke, Elektrodenabstand und elektrische Schaltung. Die zwei elektrischen Schaltungen werden wie folgt dargestellt: die Serienschaltung ist mit S und die Parallelschaltung mit P . Zum Beispiel stellt der Code B-2EP-2A-1,5cm-S den Versuch dar, bei dem 2 Elektrodenpaare angewendet werden, die Stromstärke bei 2 A konstant bleibt, Anode und Kathode 1,5 cm voneinander entfernt sind und die Schaltungsart Serienschaltung ist. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden mit

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Monopolar-Elektroden		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	1,5 und 2,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	4
	Schaltung	[-]	Parallel und Serie
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	1 und 2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.5: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Monopolar-Elektroden

jenen von der Versuchsreihe Zelle B mit nur einem Elektrodenpaar (1EP) verglichen. Diese Ergebnisse werden als Referenz berücksichtigt und ebenfalls mittels eines Codes dargestellt. Die Referenzversuche sind die folgenden:

- B-1EP-1A-1,5cm
- B-1EP-1A-2,5cm
- B-1EP-2A-1,5cm
- B-1EP-2A-2,5cm

Im Folgenden wird die Effektivität der Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden vorgestellt und mit der mit Standard-Elektroden verglichen. Zum Schluss wird der Energieverbrauch der unterschiedlichen Untersuchungen analysiert.

Effektivitätsparameter

Die Effektivität der Reaktion wird mithilfe von Diagrammen analysiert. In den Diagrammen werden die unterschiedlichen Tests auf der x-Achse und die Effektivitätsparameter auf die y-Achse in Prozent angegeben. Abschließend werden die folgenden Einflüsse analysiert:

- Einfluss der Monopolar-Elektroden auf die Effektivität der Elektrokoagulation
 - mit Serienschaltung (S)
 - mit Parallelschaltung (P)
 - mit 1 Ampere
 - mit 2 Ampere

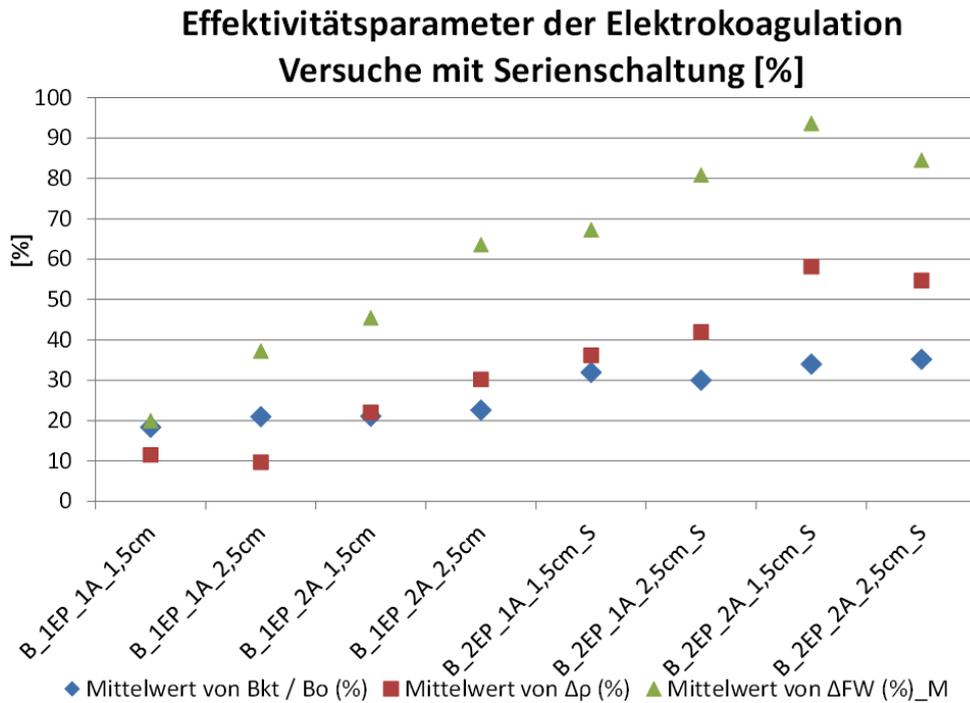


Abbildung 6.16: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, Serienschaltung

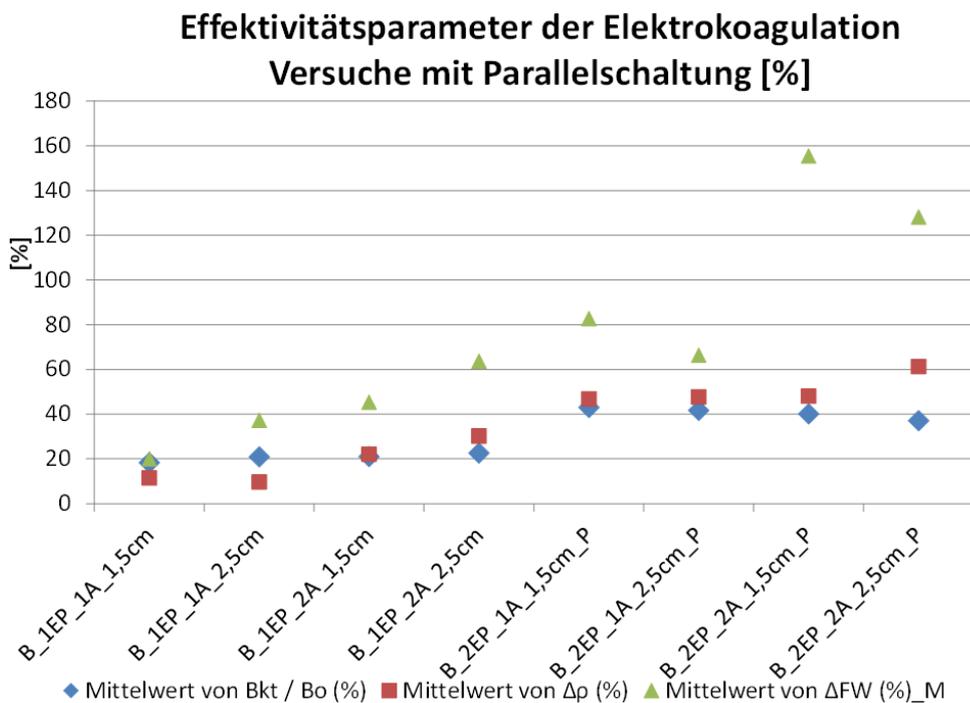


Abbildung 6.17: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, Parallelschaltung

- Einfluss der elektrischen Schaltung der Monopolar-Elektroden auf die Effektivität der Elektrokoagulation

Zuerst wird der **Einfluss der Monopolar-Elektroden auf die Effektivität** der Elektrokoagulation analysiert. Dafür werden die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden (2EP) mit Serienschaltung bzw. mit Parallelschaltung dargestellt (Abbildungen 6.16 und 6.17) Hier werden die Ergebnisse mit 1 Elektrodenpaar mit denen mit 2 Elektrodenpaaren verglichen.

In der Abbildung 6.16 werden auf der x-Achse die 4 Referenzergebnisse und abschließend die 4 Ergebnisse mit 2EP mit Serienschaltung dargestellt. Der Einfluss der Anwendung von 2 Elektrodenpaaren mit Serienschaltung ist deutlich: im Vergleich zu den Ergebnisse mit 1 Elektrodenpaar, stellen die Ergebnisse mit 2 Elektrodenpaaren und einer Serienschaltung eine allgemeine Erhöhung der Effektivitätsparameter dar.

Es kann festgestellt werden, dass das koagulierte Bentonit mit Serienschaltung, unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand, um 10% steigt. Beispielweise zeigt die Untersuchung B-1EP-1A-2,5cm ca. 20% B_{kt} , wobei bei der Anwendung von 2 Elektrodenpaaren der Prozentsatz auf ca. 30% ansteigt.

Der Rest der Parameter, Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension, nimmt um ca. 20% bzw. 40% zu.

In ähnlicher Weise stellt die Abbildung 6.17 die Ergebnisse zur Effektivitätsparameter der Referenzversuche und die mit 2 Elektrodenpaaren mit Parallelschaltung. Die Resultate zeigen ähnliche Tendenzen: im Vergleich zu den Ergebnissen mit 1 Elektrodenpaar, stellen die Ergebnisse mit 2 Elektrodenpaaren und einer Parallelschaltung eine Erhöhung der Effektivitätsparameter dar.

Es kann festgestellt werden, dass das koagulierte Bentonit mit Parallelschaltung unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand um 20% steigt. Zum Beispiel beträgt der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit der Untersuchung mit 2 Ampere und 1,5 cm ca. 20% mit 2 Standard-Elektroden und ca. 40% mit 4 Monopolar-Elektroden und einer Parallelschaltung.

Die Parameter Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension nehmen unterschiedlich zu. Hier ist zu bemerken, dass die Stabilität der Restsuspension bei den Versuchen mit 2 Ampere und einer Parallelschaltung in hohem Masse verringert wird. In diesen Fällen steigt die Verringerung der Stabilität auf 120%.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, sowohl mit Serienschaltung als auch mit Parallelschaltung eine Verbesserung der Effektivität im Vergleich zu der Elektrokoagulation mit Standard-Elektroden darstellt. Die Verbesserung der Effektivität ist unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand gültig.

Anschließend wird der **Einfluss von unterschiedlichen elektrischen Schaltungen auf die Effektivität der Elektrokoagulation** bestimmt. Die Abbildungen 6.18 und 6.19 stellen die nach der Stromstärke sortierten Ergebnisse der Elektrokoagulation dar. Auf der x-Achse werden zuerst die Untersuchungen mit 2 Standard-Elektroden und abschließend die Resultate von der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden mit Parallel- und Serienschaltung dargestellt.

Die Abbildungen 6.18 stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden und 1 Ampere dar. Die Elektrokoagulation mit Parallelschaltung mit 1 Ampere liefert bessere Ergebnisse zum prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit und zur Verringerung der Dichte der Restsuspension. In diesem Fall betragen beide Parameter über 40%. Die Ergebnisse zur Verringerung der Stabilität der Restsuspension, sowohl mit Serienschaltung als auch mit Parallelschaltung, überschreiten 65%. Diese Resultate deuten auf keine bevorzugte elektrische Schaltung.

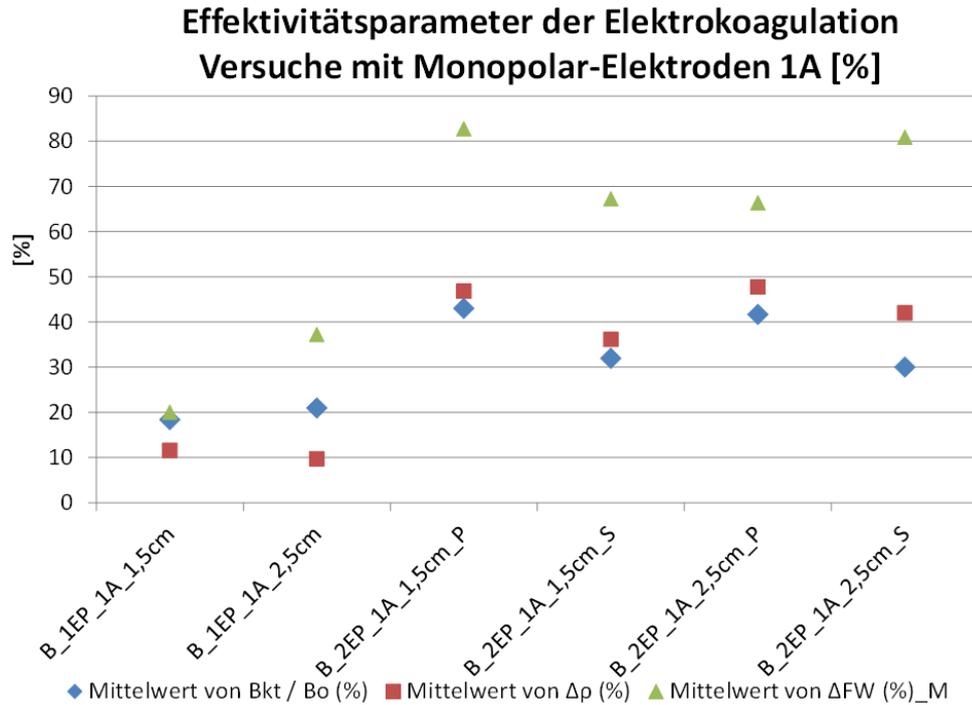


Abbildung 6.18: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, 1A

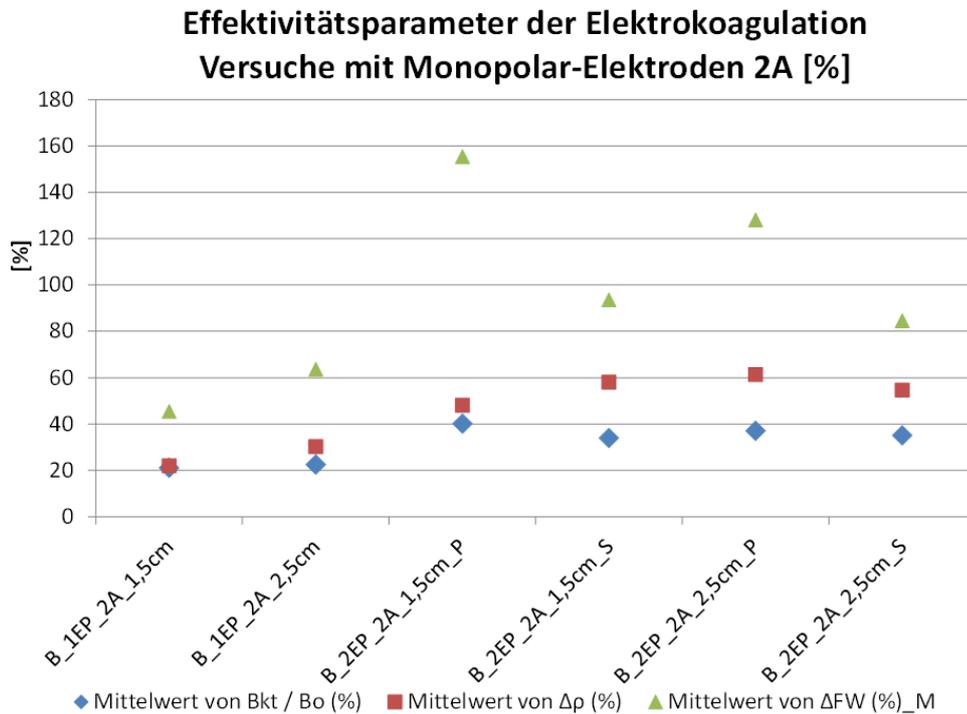


Abbildung 6.19: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden, 2A

Die Abbildung 6.19 stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden und 2 Ampere dar. Die Elektrokoagulation mit 2 Elektrodenpaaren und Parallelschaltung zei-

gen die beste Ergebnisse zum prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit. Der Unterschied zwischen Parallel- und Serienschaltung ist trotzdem sehr gering. In beiden Fällen beträgt dieser Parameter über 35%. Die Ergebnisse zur Verringerung der Dichte der Restsuspension zeigen keine deutliche Tendenz für die eine oder andere elektrische Schaltung. Dennoch beträgt der Versuch 2EP-2A-2,5cm-P den höchsten Wert dieses Parameters (ca. 60%). Im Gegensatz dazu betragen die Ergebnisse zur Verringerung der Stabilität der Restsuspension über 120%. Aus diesen Ergebnissen wird die Parallelschaltung als bevorzugte elektrische Schaltung ausgewählt.

Im Allgemeinen erzielt die Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden und Parallelschaltung die besten Ergebnisse. Es kann festgestellt werden, dass 4 Monopolar-Elektroden mit einer Parallelschaltung gegenüber einer Serienschaltung bevorzugt werden sollten.

Im Folgenden werden die Schlussfolgerungen zu jedem Effektivitätsparameter zusammengefasst.

Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit

- Die Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden erzielt bessere Ergebnisse als die mit einem Standard-Elektrodenpaar. Dieser Effektivitätsparameter erreicht höhere Werte mit der Parallelschaltung als mit der Serienschaltung.
- Die besten Ergebnisse zum prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit stellen die folgenden Versuche mit einem Prozent größer als 40% dar:
 - 2EP-1A-1,5cm-P
 - 2EP-1A-2,5cm-P
 - 2EP-2A-1,5cm-P

Verringerung der Dichte der Restsuspension

- Im Vergleich zur Elektrokoagulation mit 1 Elektrodenpaar ist die mit 2 Elektrodenpaaren effizienter. Mit der Parallelschaltung sind die Ergebnisse besser als mit der Serienschaltung. (Abb. 6.18)
- Die besten Ergebnisse zur Verringerung der Dichte der Restsuspension stellen die folgenden Versuche mit einem Prozent größer als 50% dar:
 - 2EP-2A-2,5cm-P
 - 2EP-2A-1,5cm-P
 - 2EP-2A-2,5cm-S

Verringerung der Stabilität der Restsuspension

- Die Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden führt zu besseren Ergebnissen als die mit Standard-Elektrodenpaar. Mit der Parallelschaltung sind die Ergebnisse besser als mit der Serienschaltung.
- Die besten Ergebnisse zur Verringerung der Stabilität der Restsuspension stellen die Versuche mit einem Prozent größer als 90% dar:

- 2EP-2A-1,5cm-P
- 2EP-2A-2,5cm-P
- 2EP-2A-1,5cm-S

Analyse des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch wird bzgl. der Effektivität der Reaktion analysiert. Zuerst wird ein globaler Effektivitätsparameter definiert. Abschließend wird der Energieverbrauch jedes Versuchs berechnet. Beide Ergebnisse werden zusammen analysiert.

Der globale Effektivitätsparameter [%] wird als ein gewogener Durchschnitt berechnet, indem alle drei Effektivitätsparameter, prozentualer Anteil an koaguliertem Bentonit, Verringerung der Dichte sowie der Stabilität der Restsuspension, genau die gleiche Gewichtung bzw. Bedeutung haben (Gleichung 6.1).

$$\text{globaler Effektivitätsparameter} = \frac{(B_{Kt}) + (\Delta\rho) + (\Delta FW)}{3} \quad (6.1)$$

Der Energieverbrauch E wird mithilfe der elektrischen Leistung P berechnet. Die elektrische Leistung wird mithilfe der Spannung U und der Stromstärke I der elektrochemischen Zelle berechnet. Beide physikalische Größe werden wie folgt definiert.

Die Gleichung 6.2 beinhaltet, dass die elektrische Leistung das Produkt der elektrischen Spannung U und der elektrischen Stromstärke I ist. Die Einheiten jeder Parameter sind die folgenden: P [W]; I[A]; U [V].

$$P = I \cdot U \quad (6.2)$$

Der Energieverbrauch ist das Produkt der elektrischen Leistung P und der Zeit t , (Gleichung 6.3) . Die Einheiten jeder Parameter sind die folgenden: E [W · s]; P [W]; t [s]. Häufig wird E durch die äquivalente Einheit [kW · h] vorgestellt.

$$E = P \cdot t \quad (6.3)$$

In der Tabelle 6.6 wird der globale Effektivitätsparameter in % sowie der Energieverbrauch Wh dargestellt. Die Versuche werden mit aufsteigendem Energieverbrauch sortiert.

Aus der Tabelle lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Versuche mit höherem globalem Effektivitätsparameter verbrauchen am meisten Energie
- Die Versuche mit Standard-Elektroden verbrauchen weniger Energie als die mit Monopolar-Elektroden
- Die Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden und Parallelschaltung verbrauchen weniger Energie als mit Serienschaltung

Hier ist ein interessanter Aspekt zu betonen: die Ergebnisse der Untersuchungen mit geringem Energieverbrauch decken sich mit denen mit besseren Resultaten zum prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit.

Fazit

Versuchscode	Effektivität [%]	Energie [Wh]
B-1EP-1A-1,5cm	16,64	5,21
B-1EP-1A-2,5cm	22,64	6,02
B-2EP-1A-1,5cm-P	57,51	8,64
B-2EP-1A-2,5cm-P	51,93	8,73
B-2EP-1A-1,5cm-S	45,13	12,20
B-2EP-1A-2,5cm-S	50,97	13,02
B-1EP-2A-1,5cm	29,54	17,46
B-1EP-2A-2,5cm	38,82	20,96
B-2EP-2A-1,5cm-P	81,24	27,85
B-2EP-2A-2,5cm-P	75,55	31,50
B-2EP-2A-1,5cm-S	61,94	38,57
B-2EP-2A-1,5cm-P	58,14	40,73

Tabelle 6.6: Analyse des Energieverbrauchs, Versuchsreihe Monopolar-Elektroden

Die Untersuchungen zur Elektrokoagulation der Bentonitsuspension mit 4 Monopolar- Elektroden ergeben, dass die Gewinnung der aktiven Elektrodenoberfläche durch die Anwendung von mehrere Elektrodenpaaren im Vergleich zu den Untersuchungen mit Standard-Elektroden erfolgreich ist. Diese führt zu einer Verbesserung der Effektivität der Elektrokoagulation.

Der Einfluss der elektrischen Schaltung zwischen Anoden, Kathoden und Netzgerät auf die Effektivität der Trennung und Destabilisierung ist ebenfalls entscheidend. Die Untersuchungen mit Parallelschaltung ergeben im Vergleich zu denen mit Serienschaltung höhere Effektivitätswerte. Werden 4 Monopolar-Elektroden mit Parallelschaltung statt 2 Standard-Elektroden an der Elektrokoagulation eingesetzt, wird die Leistung der Trennung des Bentonit und der Destabilisierung der Suspension deutlich erhöht.

Die Berücksichtigung des Energieverbrauchs bei der Elektrokoagulation ist sehr relevant, da er eine Beitrag zu den Betriebskosten leistet. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Elektrokoagulation mit Parallelschaltung weniger Energie als die Serienschaltung verbraucht.

Aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse wird die Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden und Parallelschaltung als Best-Combination für zukünftige Untersuchungen vorgeschlagen.

6.1.4 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Parameter Elektrodenmaterial, Elektrodenabstand und Stromstärke unter Verwendung der Zellen A und B ergeben die folgenden Tendenzen im Bezug auf die Spannung und die Effektivität der Elektrokoagulation.

Die Spannungsverläufe bestätigen das Ohm'sche Gesetz bei Elektrodenabständen von 3,5 bis 6,5 cm. D.h. mit zunehmendem Elektrodenabstand und zunehmender Stromstärke nimmt die Spannung am Versuchsanfang und während der Reaktion gleichmäßig zu.

Bei kleineren Elektrodenabständen (0,5 bis 2,5 cm) ist der Raum zwischen Anode und Kathode mit koaguliertem Bentonit ausgefüllt. Dies hat die Blockierung der elektrochemischen Reaktion zu Folge. Diese Blockierung zeigt sich durch den Spannungsanstieg in den Verläufen.

Nur Aluminium als Elektrodenmaterial beeinflusst die Spannung ebenfalls. Die Zerstörung der Schutzschicht an der Oberfläche der Aluminiumanode wird durch eine Erhöhung der Span-

nung am Reaktionsanfang hervorgerufen. Diese Zerstörung wird in Form einer Spannungsspitze registriert.

Aus den Ergebnissen zur Effektivität der Elektrokoagulation geht hervor, dass die Leistungsfähigkeit der Reaktion (bezüglich der Parameter $B_{kt}\%$ und $\Delta\rho\%$) mit zunehmender Stromstärke und zunehmendem Elektrodenabstand ansteigt. Die Analyse der Stabilität der Restsuspension ergibt, dass die Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand deutlich instabiler wird. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, Aluminium als bevorzugtes Elektrodenmaterial zu verwenden.

Die Beobachtungen des angelagerten koagulierten Bentonits zeigen, dass die Elektrokoagulation mit Stahlelektroden zu einem chemisch instabilen koagulierten Bentonit führt. Dieses Phänomen ist beim koagulierten Bentonit mit Aluminiumelektroden nicht zu erkennen. Dieser Sachverhalt legt ebenfalls nahe, vorzugsweise Aluminiumelektroden zu verwenden.

Die Untersuchung von zwei unterschiedlichen Elektrodenoberflächen (Zelle A und B) ergeben keine deutlichen Tendenzen. Für den Parameter $B_{kt}\%$ und $\Delta FW\%$ wird Zelle B bevorzugt. Für den Parameter $\Delta\rho\%$ wird Zelle A bevorzugt. Bei diesem Vergleich ist zu betonen, dass die Zelle B niedrigere Spannung als Zelle A für die Reaktion unter 1 oder 2 Ampere erfordert, da die aktive Elektrodenoberfläche größer ist. Aus diesem Grund wird Zelle B bevorzugt und als Parameter der Best-Combination bezeichnet.

Der Gewinn an Elektrodenoberfläche durch den Einsatz von 4 Monopolar-Elektroden erzielt eine offensichtlich höhere Effektivität der Elektrokoagulation verglichen mit dem Einsatz von Standard-Elektroden. Die Parallelschaltung ist bevorzugt, da im Allgemeinen höhere Effektivität ergibt und wenig Energieverbrauch als die Serienschaltung.

Der Aufbau der Elektrokoagulationszelle hat offensichtlich einen großen Einfluss auf die Effektivität. Im Folgenden werden die bevorzugten Parameter für die Best-Combination präsentiert:

- Elektrodenmaterial: Al
- Elektrodenabstand: 6,5 cm
- Stromstärke: 2A
- Anzahl an Elektroden: 4 Monopolar-Elektroden

6.2 Einfluss der Betriebsart der Elektrokoagulationszelle

Die Parameter zur Betriebstart der Zelle (Strömungszustand und Strömungssystem) werden hier untersucht. Dazu werden Untersuchungen zur Reinigung der Elektroden (mechanische und elektrische Reinigung) durchgeführt. Die Verweildauer als Betriebsartparameter wird ebenfalls untersucht.

6.2.1 Strömungszustand

Die Versuche des Kapitels „Einfluss des Aufbaus der Elektrokoagulationszelle“ wurden im Ruhe-Zustand durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter kontinuierlicher Strömung vorgestellt. Ziel der Anwendung einer Strömung in der Elektrokoagulation ist es, die Eigenschaften des Elektrolyts in der Zelle homogen zu halten und die Blockierung des Systems bei niedrigen Elektrodenabständen zu vermeiden.

Elektrokoagulation mit Strömungszustand wird sowohl mit Zelle A als auch mit Zelle C untersucht. Mit jeder Zelle wird ein bestimmter Strömungszustand getestet.

- Mithilfe der Zelle A wird die kontinuierliche turbulente Strömung durch Rührer (abgekürzt KTSR) untersucht
- Die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSR werden mit denen von Zelle A im Ruhe-Zustand (Versuchsreihe EMAS-Zelle A) verglichen, um den Einfluss der kontinuierlichen turbulenten Strömung durch den Rührer auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu untersuchen
- Mithilfe der Zelle A wird die kontinuierliche turbulente Strömung durch die Pumpe (abgekürzt KTSP) untersucht
- Die Ergebnisse der Versuchsreihen EMAS-Zelle A, KTSR und KTSP werden miteinander verglichen, um den Einfluss der kontinuierlichen turbulenten Strömung durch den Rührer bzw. die Pumpe auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen
- Die Zelle C ermöglicht die Elektrokoagulation von Bentonitsuspension unter laminarer Strömung durch die Pumpe. In ähnlicher Weise werden diese Ergebnisse mit denen im Ruhe-Zustand verglichen, um den Einfluss der kontinuierliche laminare Strömung durch die Pumpe auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen.

Kontinuierliche turbulente Strömung durch Rührer

Ziel der Versuchsreihe ist die Untersuchung des Einflusses von Elektrodenabstand, Stromstärke und Elektrodenmaterial auf die Effektivität der Elektrokoagulation mit kontinuierlicher turbulenter Strömung durch den Rührer.

Zelle A wird zusammen mit Elektroden aus Aluminium bzw. Stahl, mit Stromstärken von 1 bzw. 2 Ampere und Elektrodenabständen von 0,5 bis 6,5 cm eingesetzt. Die Tabelle 6.7 stellt die Parameter vor.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: A		
	Versuchsreihe: turbulente Strömung - Rührer		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	0,5 und 6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	124,4
	Material	[-]	Al und Stahl
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	1 und 2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	kont. Strömung
	Strömung	[-]	turbulent
	Strömungssystem	[-]	Rührer
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	B_{kt} einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.7: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A

Die kontinuierliche Strömung wird durch einen Rührer und einen Mischer erzeugt (Abb. 6.20). Der Rührer hat eine Propellerform mit vier Flügeln, jeder Flügel ist 1 cm breit und 6 cm lang. Die Drehung der Flügel entwickelt in der Zelle, je nach Umlaufgeschwindigkeit, eine Strömung. Diese können von 0 bis 2500 rpm eingestellt werden. Der Rührer wird in der Zellmitte zwischen Anode und Kathode 0,5 cm über dem Boden der Zelle positioniert; der Mischer wird manuell auf eine Umlaufgeschwindigkeit von 1500 rpm eingestellt. Bei der Elektrokoagulation mit einem Elektrodenabstand von 0,5 cm passt die Achse der Rührer nicht zwischen Anode und Kathode. In diesem Fall wird der Rührer exzentrisch positioniert, d. h. links von der Anode. Die Abbildung 6.21 stellt die Position des Rührers in der Zelle, bei Elektrodenabständen von 1,5 bis 6,5 cm dar.

Die Versuche werden mittels eines Codes aus der Stromstärke in Ampere sowie dem Elektrodenmaterial (Alu für Aluminium und St für Stahl) und -abstand in cm identifiziert. Zum Beispiel steht der Code 1A-Al-3,5 cm für den Versuch mit einer Stromstärke von 1 Ampere, Elektroden aus Aluminium und einem Elektrodenabstand von 3,5 cm.

Die Spannungsverläufe und die Effektivitätsparameter werden präsentiert. Abschließend werden die Eigenschaften der Bentonitschicht an der Anode kommentiert.

Spannungsverläufe

Die Versuche werden nach dem galvanischen Prinzip durchgeführt, d.h. mit einer konstant gehaltenen Stromstärke von 1 bzw. 2 Ampere. Die Spannung stellt bei diesem Verfahren den Widerstand dar.

In der Abbildung 6.22 werden die Spannungsprofile abgebildet und beschrieben. Diese Abbildung besteht aus 4 Diagrammen zum Spannungsverlauf der Elektrokoagulation. Die hier vorgestellten Verläufe gehören zu den folgenden Versuchen (links nach rechts, oben nach unten):

- Versuche 1A-Stahl

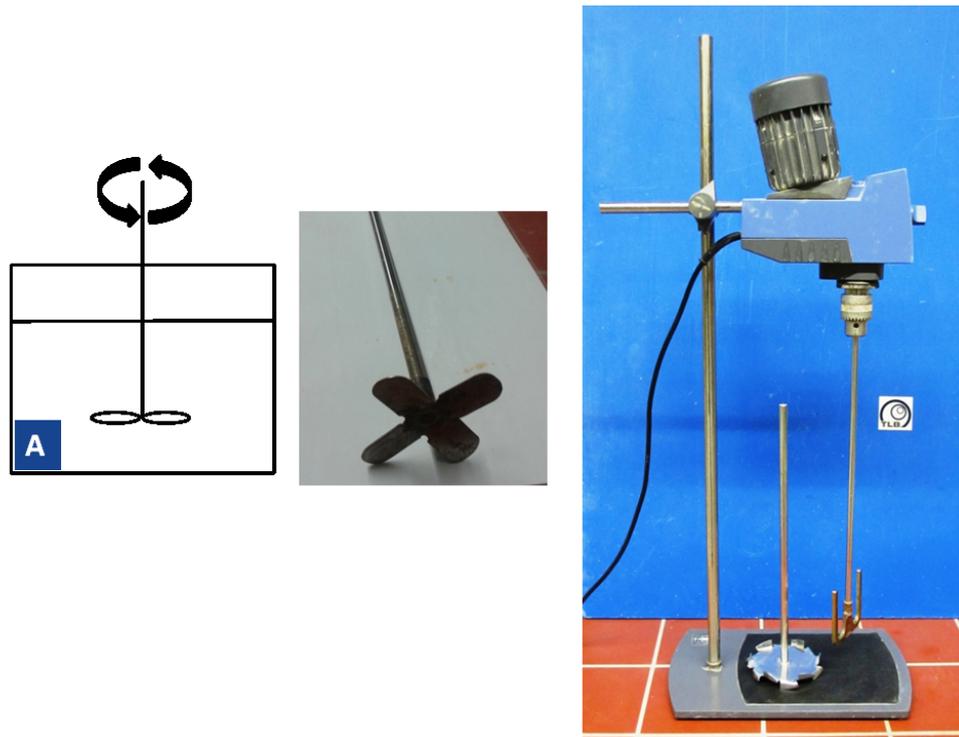


Abbildung 6.20: Skizze der Elektrokoagulationszelle A unter KTSR, Mischer und Rührer

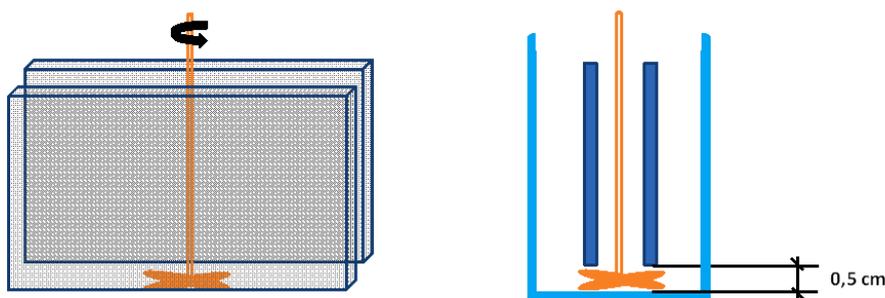


Abbildung 6.21: Skizze zur Position des Rührers in der Zelle A

- Versuche 2A-Stahl
- Versuche 1A-Al
- Versuche 2A-Al

In jedem Diagramm wird die Zeit in Minuten auf der x-Achse und die Spannung in Volt auf der y-Achse angegeben. Die unterschiedlichen Farben der Profile stellen die jeweiligen Versuche mit unterschiedlichen Elektrodenabständen dar.

Die folgenden Effekte werden erkannt:

- Sowohl die Spannung am Anfang als auch die Variation der Spannung im Laufe der Reaktion sind proportional zum Elektrodenabstand
- Die Endspannungswerte tendieren je nach Elektrodenmaterial und Stromstärke zu einem Spannungsbereich

- Die Spannungsverläufe der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium zeigen Spannungsspitzen

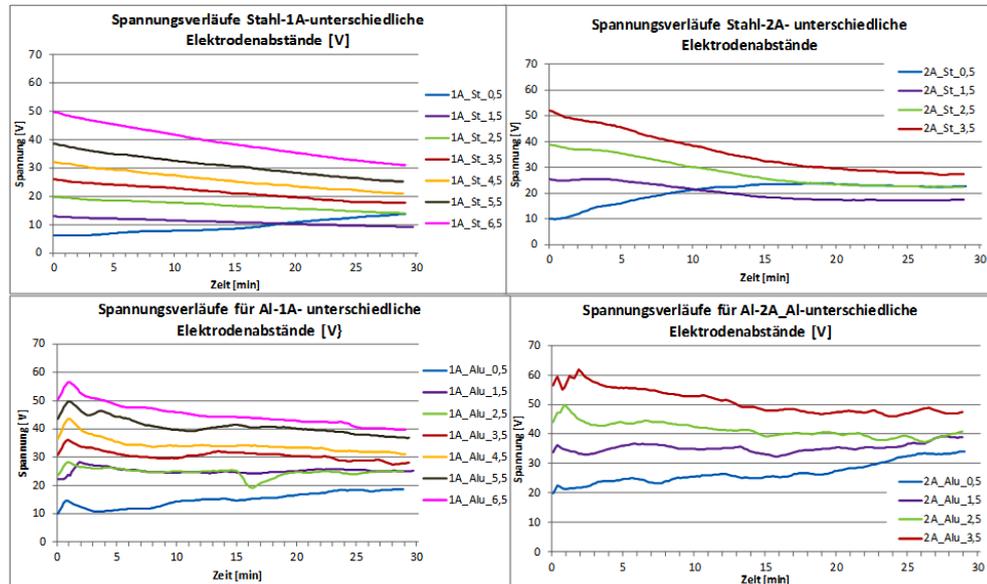


Abbildung 6.22: Spannungverläufe der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A

Die **Spannung am Anfang und die Variation der Spannung im Laufe der Reaktion sind proportional zum Elektrodenabstand**: die Spannungen steigen bei Vergrößerung des Elektrodenabstandes. Die Ausnahme bilden die Spannungverläufe bei einem Abstand von 0,5 cm, die als einzige ein Profil C zeigen. Die übrigen Spannungverläufe gehören dem Profil A an.

Die **Profile tendieren je nach Elektrodenmaterial und Stromstärke zu einem bestimmten Spannungsbereich**. Im Folgenden werden die Spannungsbereiche vorgestellt:

- Versuche 1A-Stahl: 10-30 Volt
- Versuche 1A-Al: 28-40 Volt
- Versuche 2A-Stahl: 17-28 Volt
- Versuche 2A-Al: 33-48 Volt

Die Spannungverläufe der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium erzielen höhere Spannungen als jene mit Elektroden aus Stahl. Die unterschiedlichen Potenziale der chemischen Vorgänge der Elektrokoagulation, welche vom Elektrodenmaterial abhängig sind, begründen dieses Phänomen. Das Ohm'sche Gesetz bezieht sich auf das Verhältnis von Stromstärke und Spannung: je höher die Stromstärke, desto höher die Spannung.

An dieser Stelle sei betont, dass die gleichen Tendenzen wie bei der Versuchsreihe EMAS zu erkennen sind.

Die Spannungverläufe mit Elektroden aus Aluminium zeigen alle zu Beginn eine **Spannungsspitze**. Beim Versuch Al-1A-2,5 cm ist mitten im Verlauf ein Spannungsabfall zu beobachten. Da dies nicht dem Normalfall entspricht, lässt sich hier auf Messfehler schließen.

Effektivitätsparameter

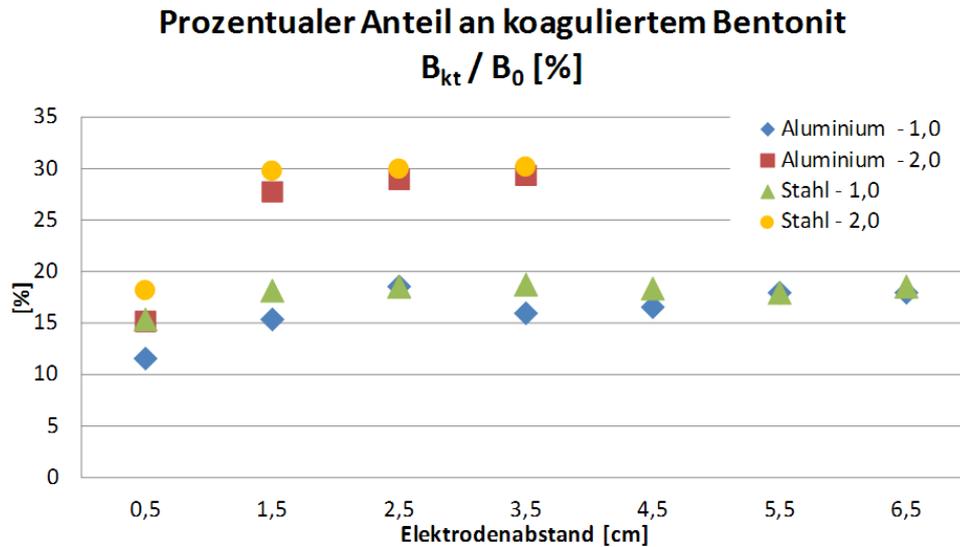


Abbildung 6.23: Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A

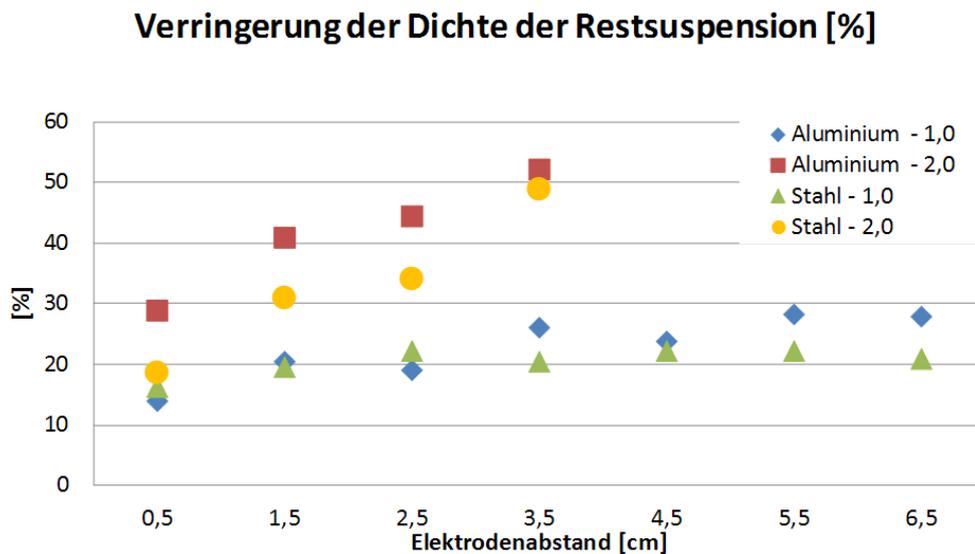


Abbildung 6.24: Verringerung der Dichte der Restsuspension, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A

Die Effektivität der Elektrokoagulation wird mithilfe der drei Effektivitätsparameter analysiert.

- $B_{kt}\%$: prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit
- $\Delta\rho\%$: Verringerung der Dichte der Restsuspension
- $\Delta FW\%$: Verringerung der Stabilität der Restsuspension

Die Abbildung 6.23 stellt den **prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit** dar. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse der prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit in % angegeben.

Im Folgenden werden die Einflüsse des Elektrodenabstands, -materials und der Stromstärke auf die Effektivität der Elektrokoagulation bestimmt.

Verringerung der Stabilität der Restsuspension [%]

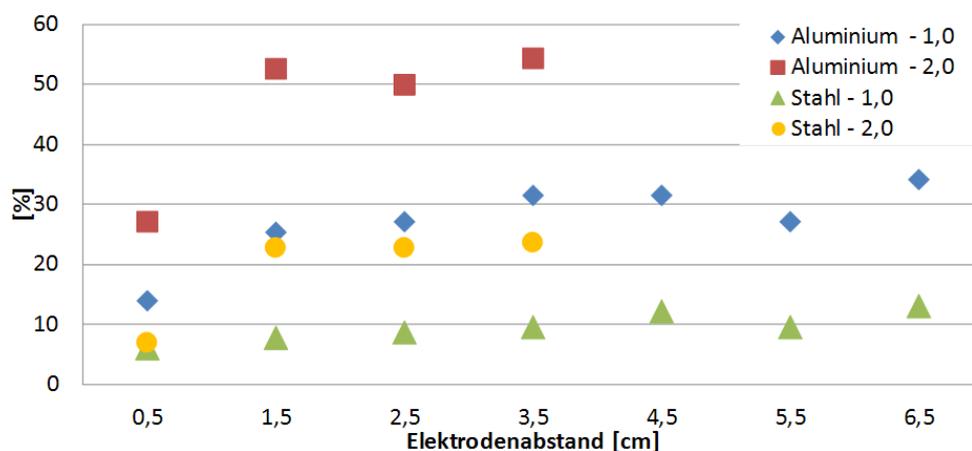


Abbildung 6.25: Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Versuchsreihe: KTSR- Zelle A

Der Elektrodenabstand hat unter den genannten Bedingungen nur einen leichten Einfluss auf den Parameter B_{kt} , der unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenmaterial ist.

Die Ergebnisse der Versuche mit Aluminium und Stahl unterscheiden sich nur gering von einander, d.h. der Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Parameter B_{kt} ist minimal.

Die Stromstärke übt jedoch einen großen Einfluss auf den prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit aus. Die Werte sind, unabhängig von Elektrodenmaterial und -abstand, ansatzweise konstant: ca. 15-18 % bei den Versuchen mit 1 Ampere und ca. 27-30 % bei denen mit 2 Ampere. Eine Ausnahme bilden die Versuche mit dem Elektrodenabstand 0,5 cm, die niedrigere Werte ergeben: der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit ist geringer als 15 % bei den Versuchen mit 1 Ampere und unter 20 % bei denen mit 2 Ampere.

Die Abbildung 6.24 stellt die **Verringerung der Dichte der Restsuspension** dar. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse die Verringerung der Dichte der Restsuspension in % angegeben. Die Einflüsse des Elektrodenabstands, -materials und der Stromstärke auf die Verringerung der Dichte der Restsuspension werden bestimmt.

Die Analyse der Verringerung der Dichte ergibt, dass der Elektrodenabstand bei den Versuchen mit 2 Ampere den Parameter stark beeinflusst. Im Fall von Versuchen mit Elektroden aus Aluminium und 2 Ampere beträgt die Verringerung der Dichte ca. 29 %, 41 %, 45 % und 52 % mit jeweils 0,5, 1,5, 2,5 und 3,5 cm Elektrodenabstand. Mit zunehmendem Elektrodenabstand steigt die Verringerung der Dichte der Restsuspension linear. Im Fall von Versuchen mit 1 Ampere ist die Zunahme des Parameters geringer als mit 2 Ampere.

Die Ergebnisse zeigen einen großen Einfluss des Elektrodenmaterials auf die Verringerung der Dichte der Restsuspension in den folgenden Sonderfällen:

- Elektrokoagulation mit 2 Ampere, 0,5 bis 2,5 cm Elektrodenabstand: die Verringerung der Dichte mit Elektroden aus Aluminium ist ca. 10 % höher als bei der Verwendung von Elektroden aus Stahl.
- Elektrokoagulation mit 1 Ampere, 3,5, 5,5 und 6,5 cm Elektrodenabstand: die Verringerung der Dichte mit Elektroden aus Aluminium ist ca. 5 % als bei der Verwendung von Elektroden aus Stahl.

Bei den übrigen Versuchen hat der Elektrodenabstand keinen deutlichen Einfluss auf die Verringerung der Dichte.

Wie oben erwähnt, spielt die Stromstärke bei der Verringerung der Dichte eine große Rolle. Dieser Einfluss ist mit dem Elektrodenabstand verknüpft: je höher der Elektrodenabstand, desto größer ist der Unterschied zwischen den Ergebnissen mit 1 und 2 Ampere.

Abbildung 6.25 stellt die **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** dar. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse die Verringerung der Stabilität der Restsuspension in % angegeben. Hier werden in ähnlicher Weise die Einflüsse von Elektrodenabstand, -material und Stromstärke auf die Effektivität der Elektrokoagulation analysiert.

Der Einfluss des Elektrodenabstandes auf den Parameter B_{kt} ist im Fall des Parameters „Verringerung der Stabilität der Restsuspension“ ebenfalls gültig. Die Werte bei den Versuchen mit Elektrodenabstand 0,5 cm sind niedrig. Bei den Versuchen mit Elektrodenabständen ab 1,5 cm steigen sie und bleiben je nach Elektrodenmaterial und Stromstärke annähernd konstant. Zum Beispiel beträgt bei den Versuchen mit Aluminiumelektroden und 2 Ampere die Verringerung der Stabilität der Restsuspension über 50 %.

Relevant ist bei der Analyse der Verringerung der Stabilität der Effekt des Elektrodenmaterials. Das Elektrodenmaterial hat einen größeren Einfluss auf die Verringerung der Stabilität als die Stromstärke, dennoch sind beide Einflüsse miteinander verknüpft:

- Versuche mit 2 Ampere: die Verringerung der Stabilität der Restsuspension ist bei Versuchen mit Aluminiumelektroden ca. 30 % größer als bei der Verwendung von Stahlelektroden.
- Versuche mit 1 Ampere: die Verringerung der Stabilität der Restsuspension ist bei Versuchen mit Aluminiumelektroden ca. 20 % größer als bei der Verwendung von Stahlelektroden.

Bei den vorherigen Schlussfolgerungen werden die Ergebnisse der Versuche mit einem Elektrodenabstand von 0,5 cm nicht berücksichtigt.

Kommentar über das koagulierte Bentonit

Während der Elektrokoagulation bildet sich eine Bentonitschicht an der Anode, welche besondere Eigenschaften hat:

- hohe Festigkeit an der Anodenoberfläche
- harte Konsistenz
- unregelmäßige Dicke

Die Schicht wird sehr fest an der Anode angelagert und fällt nicht von allein von der Anode ab. Um diese Schicht zu entfernen, wird ein Spachtel benötigt.

Das an der Anode angelagerte Bentonit verfügt über eine sehr feste Konsistenz sowie einen niedrigen Wassergehalt.

Die Schicht hat eine unregelmäßige Dicke. Diese Dicke hängt vom Elektrodenabstand des Versuchs ab. Bei niedrigen Elektrodenabständen (1,5 bis 2,5 cm) wird die Bentonitschicht lokal vom Rührer zerstört. Bei Elektrodenabständen ab 3,5 cm findet dies nicht statt.

Die Abbildung ?? zeigt die Bentonitschicht an der Anode. In Bild A ist die feste Bentonitschicht an der Anode zu erkennen. Bild B zeigt die Verformung an der Bentonitschicht.

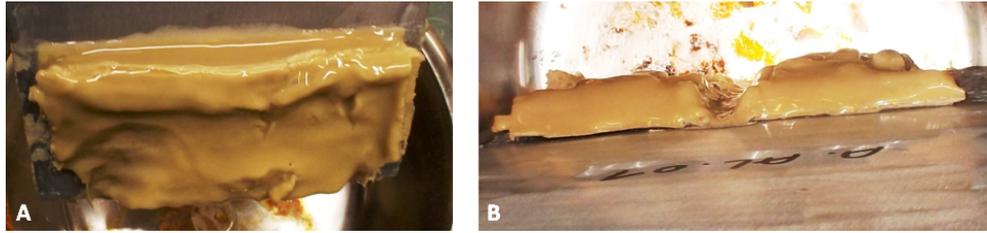


Abbildung 6.26: Eigenschaften des koagulierten Bentonits, Versuchsreihe KTZR

An dieser Stelle sei betont, dass nicht nur Bentonit an der Anode koaguliert wird, sondern dass gleichzeitig Flocken aus Bentonit in der Restsuspension zu sehen sind.

Fazit

Aus der Analyse der Spannungsverläufe gehen die folgenden Tendenzen hervor. Diese sind ähnlich den Tendenzen aus der Versuchsreihe EMAS.

- Die Spannung zu Beginn und die Variation der Spannung im Laufe der Reaktion sind gleichmäßig proportional zum Elektrodenabstand.
- Die Endspannungswerte tendieren je nach Stromstärke und Elektrodenmaterial zu einem bestimmten Spannungsbereich: die Versuche mit 2 Ampere und Elektroden aus Aluminium erzielen höhere Spannungswerte am Ende der Reaktion.
- Die Spannungsverläufe der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden zeigen Spannungsspitzen.

Die Analyse der Effektivität der Elektrokoagulation mit kontinuierlicher turbulenter Strömung durch den Rührer ergibt, dass die Versuche mit einem Elektrodenabstand von 0,5 cm sehr niedrige Werte erzielen. Bei diesen Versuchen ist es zu berücksichtigen, dass der Rührer nicht zwischen Anode und Kathode, sondern zwischen Anode und Zellenwand angeordnet ist.

Der Einfluss der Stromstärke auf die Effektivität der Reaktion ist sehr relevant. Alle drei Effektivitätsparameter werden von dieser beeinflusst: je höher die Stromstärke, desto größer sind der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit, die Verringerung der Dichte sowie die Stabilität der Restsuspension.

Das Elektrodenmaterial übt einen großen Einfluss auf die Verringerung der Dichte der Restsuspension aus. Mit zunehmendem Elektrodenabstand steigt die Verringerung der Dichte der Restsuspension linear. Im Fall von Versuchen mit 1 Ampere ist die Zunahme des Parameters geringer als mit 2 Ampere.

Ein Einfluss des Elektrodenmaterials auf die Verringerung der Stabilität der Restsuspension ist ebenfalls zu erkennen: die Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium führt zu einer weniger stabilen Suspension als mit Elektroden aus Stahl.

Die Tabelle 6.8 stellt die drei besten Ergebnisse und ihre Versuche dar:

Aufgrund dieser Ergebnisse sind die folgenden Parameter für die Elektrokoagulation mit einer kontinuierlichen Strömung durch den Rührer bevorzugt:

- 2 Ampere
- Aluminiumelektroden
- Elektrodenabstand von 6,5 cm

Versuche	$B_{kt}\%$	$\Delta\rho\%$	$\Delta FW\%$
Stahl 2A 3,5 cm	30,2	48,9	-
Stahl 2A 2,5 cm	30,0	-	-
Al 2A 3,5 cm	29,4	52,2	54,4
Al 2A 1,5 cm	-	-	52,6
Al 2A 2,5 cm	-	44,4	50,0

Tabelle 6.8: Beste Ergebnisse, Versuchsreihe turbulente Strömung durch Rührer; Zelle A

Vergleich: Ruhe-Zustand vs. kontinuierliche turbulente Strömung durch den Rührer

Die Versuchsreihen EMAS und KTSR werden anhand der Zelle A durchgeführt. Innerhalb beider Reihen werden die Einflüsse von Elektrodenmaterial und -abstand sowie der Einfluss der Stromstärke auf die Effektivität der Elektrokoagulation analysiert. Aus diesem Grund können sie miteinander verglichen werden. Anhand dieses Vergleiches kann der Effekt der kontinuierlichen turbulenten Strömung durch den Rührer hinsichtlich des Ruhe-Zustands auf die Spannung, die Effektivität der Elektrokoagulation und auf das Bentonit an der Anodenoberfläche bestimmt werden.

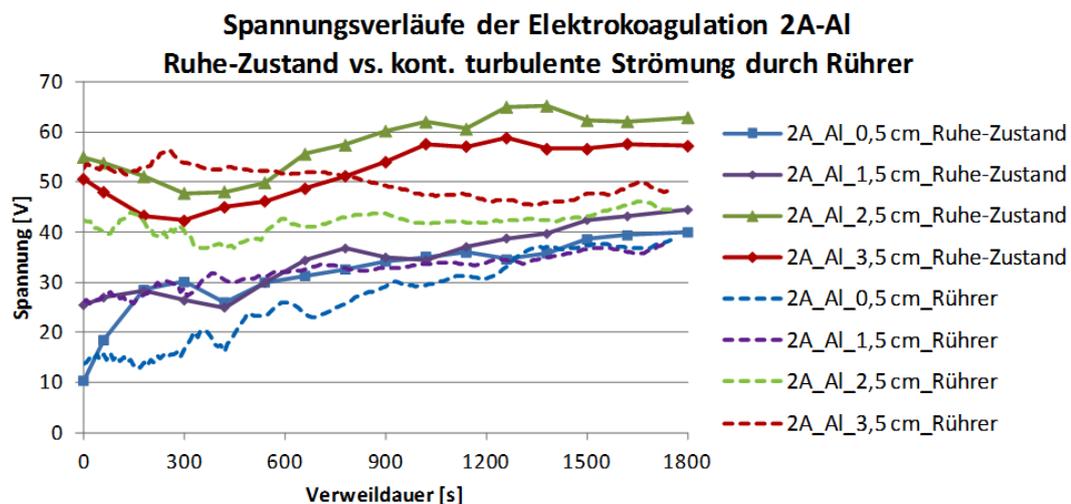


Abbildung 6.27: Vergleich der Spannungsverläufe der Elektrokoagulation Ruhe-Zustand vs. KTSR

Die Abbildung 6.27 stellt die **Spannungsverläufe** der Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand und unter KTSR dar. Sie zeigt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium und der Stromstärke 2 Ampere, da diese Einstellungen die besten Ergebnisse unabhängig vom Strömungszustand liefern. Auf der x-Achse wird die Verweildauer in s und auf der y-Achse wird die Spannung in Volt angegeben. Die durchgehenden Linien des Diagramms beziehen sich auf die Ergebnisse der Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand; die gestrichelten Linien beziehen sich auf die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter KTSR. In beiden Fällen folgen die Spannungsverläufe dem Profil C, d.h. die Spannung steigt im Laufe der Reaktion an. Die Endwerte

der Spannungen zeigen jedoch eine dazu verschiedene Tendenz. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Spannung am Ende der Reaktion bei der Elektrokoagulation unter KTSR niedriger als jene im Ruhe-Zustand ist.

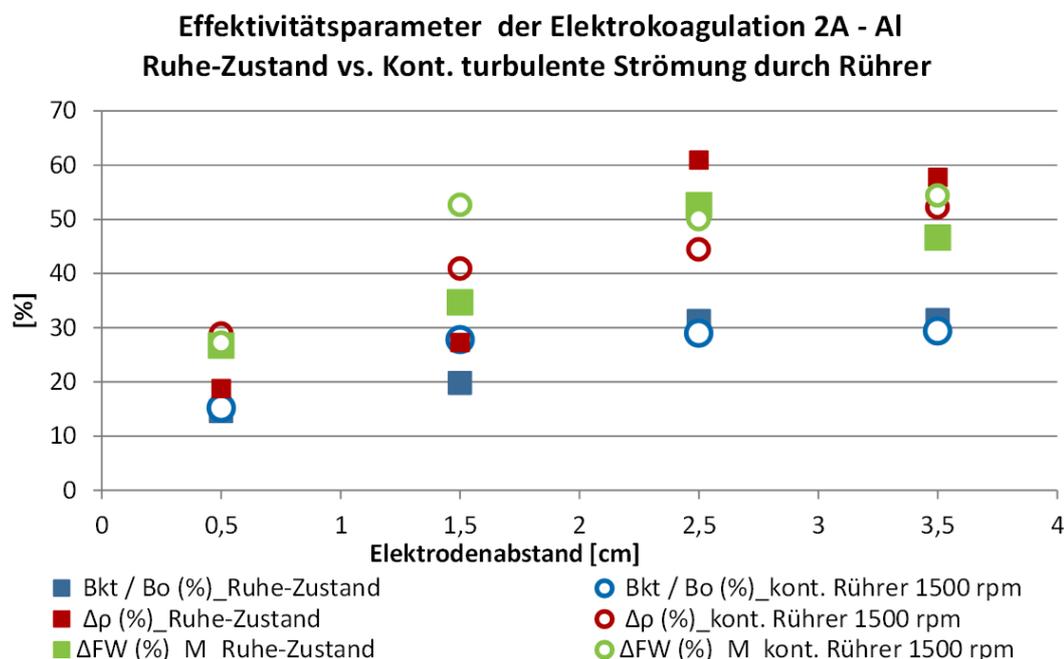


Abbildung 6.28: Vergleich der Effektivitätsparameter Ruhe-Zustand vs.KTSR

Im Folgenden werden die **Effektivitätsparameter** der drei Versuchsreihen mithilfe der Abbildung 6.28 verglichen. Diese Abbildung stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden und einer Stromstärke von 2 Ampere dar, da diese Einstellungen zu den besten Ergebnissen der Versuchsreihe EMAS führen. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben. Die blauen Markierungen stellen den Anteil an koagulierte Bentonit, die roten Markierungen die Verringerung der Dichte und die grünen Markierungen die Verringerung der Stabilität der Restsuspension dar. Die viereckigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe EMAS, die kreisförmigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSR und die kreuzförmigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSP. Letztgenannte sind bereits durch einen Faktor modifiziert.

Die Abbildung zeigt den Vergleich der Effektivität der Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand und KTSR. Hier werden ebenfalls die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium und einer Stromstärke von 2 Ampere berücksichtigt. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben. Die blauen Markierungen stellen den Anteil an koagulierte Bentonit, die roten Markierungen die Verringerung der Dichte und die grünen Markierungen die Verringerung der Stabilität der Restsuspension dar. Die viereckigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe EMAS und die kreisförmigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSR.

Die blauen Markierungen zeigen, dass die Strömung bei einem Elektrodenabstand von 1,5 cm zu einer minimale Verbesserung des Parameters $B_{kt}\%$ führt. Bei 0,5, 3,5 und 4,5 cm sind die Werte des Parameters im Ruhe-Zustand und unter kontinuierlicher Strömung sehr ähnlich.

Der Vergleich zwischen Ruhe-Zustand und kontinuierlicher Strömung zeigt, dass die Strömung bei Elektrodenabständen von 0,5 und 1,5 cm einen positiven Einfluss auf die Verringerung der Dichte der Restsuspension hat. Der Wert des Parameters steigt bei einer kontinuierlichen turbulenten Strömung durch den Rührer um ca. 10 %.

Der Vergleich zwischen Ruhe-Zustand und kontinuierlicher Strömung zeigt, dass der größte Effekt bei der Elektrokoagulation bei einem Elektrodenabstand von 1,5 cm zu erkennen ist. Dabei nimmt die Verringerung der Stabilität durch die Strömung um ca. 20 % zu.

Hinsichtlich der Festigkeit sowie der Konsistenz der **Bentonitschicht an der Anode** ist zu betonen, dass das koagulierte Bentonit bei der Elektrokoagulation mit KTSR fester als im Ruhe-Zustand an der Anode klebt und härter ist. Das Vorhandensein von Flocken aus Bentonit in der Restsuspension ist ebenfalls eine Eigenschaft des Einsatzes der KTSR. Nur bei der Elektrokoagulation mit KTSR befinden sich kleine Flocken in der Suspension.

Die kontinuierliche turbulente Strömung durch den Rührer verursacht in der Suspension starke Verwirbelungen, die eine homogene Mischung in der Zelle gewährleisten. Diese Verwirbelung trägt zur Ablösung des Bentonits von der Anodenoberfläche bei. Je niedriger der Elektrodenabstand ist, desto größer ist der Einfluss der turbulenten Strömung auf die Anodenoberfläche. Bei einem Elektrodenabstand von 1,5 cm ist diese Auswirkung am stärksten: die Effektivität der Elektrokoagulation ist deutlich höher als im Ruhe-Zustand. Die Elektrokoagulation mit einem Elektrodenabstand von 0,5 cm profitiert sich nicht von diesem Vorteil, da der Rührer in diesem Fall exzentrisch in der Zelle positioniert wird.

An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass die Verwirbelung durch eine turbulente Strömung bei den Versuchen mit einem Elektrodenabstand von 1,5 cm ausschließlich zu einer kontinuierlichen Reinigung der Anode führt.

Fazit

Die kontinuierliche turbulente Strömung durch den Rührer ergibt verglichen mit dem Ruhe-Zustand niedrigere Endspannungswerte und eine bessere Leistung der Elektrokoagulation. Dies ist ausschließlich bei einem Elektrodenabstand von 1,5 cm der Fall. Das Bentonit lagert sich fester an der Anode an; die Konsistenz ist beim Versuch KTSR härter als im Ruhe-Zustand.

Kontinuierliche turbulente Strömung durch die Pumpe

Ziel der Versuchsreihe ist die Bestimmung des Einflusses der Elektrodenparameter und der Stromstärke bei der Elektrokoagulation unter kontinuierlicher turbulenter Strömung durch die Pumpe (ab hier abgekürzt KTSP) auf die Effektivität der Reaktion. Der Unterschied zu der vorherigen Versuchsreihe ist das Strömungssystem: hier wird eine Pumpe in einen Strömungskreislauf eingebunden, welche eine kontinuierliche turbulente Strömung in der Zelle erzeugt.

Die Pumpe wird als selbstansaugende Flüssigkeitsringpumpe kategorisiert. Eine selbstansaugende Pumpe darf nicht ohne Flüssigkeitsfüllung betrieben werden. Vor der Inbetriebnahme muss die Pumpe mit dem Fördermedium vollständig aufgefüllt werden. Daher werden in dieser Versuchsreihe 3 l anstatt 2 l Suspension eingesetzt. In der Zelle befinden sich immer 2 l Suspension. Der dritte Liter hat die Aufgabe den Pumpenkreislauf mit Suspension aufzufüllen. Die Pumpe hat einen maximalen Durchfluss von $Q_{max} = 4,7 \text{ m}^3/h$ für die Bentonitsuspension W 2,5 % . Im Fall von Wasser beträgt der maximale Durchfluss $4,9 \text{ m}^3/h$. Dieser kann nicht verändert werden.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: A		
	Versuchsreihe: turbulente Strömung - Pumpe		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	0,5 und 6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	124,4
	Material	[-]	Al und Stahl
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	1 und 2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	kont. Strömung
	Strömung	[-]	turbulent
	Strömungssystem	[-]	Pumpe
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	B_{kt} einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.9: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe turbulente Strömung durch die Pumpe; Zelle A

Die Schläuche werden an der Pumpe sowie rechts und links an den Zellenseiten angeschlossen, sodass die Suspension zwischen den Elektroden fließt. Die Abbildung xx stellt die Zelle A mit den Schlauchanschlüssen dar.

Die Tabelle 6.9 stellt die Parameter dieser Versuchsreihe dar.

Im Folgenden werden die Spannungsverläufe und die Effektivitätsparameter kurz beschrieben. Zum Schluss wird die unregelmäßige aktive Elektrodenoberfläche bei der Elektrokoagulation unter den hier analysierten Bedingungen kommentiert.

Die Analyse der **Spannungsverläufe** zeigt gleiche Einflüsse der Elektrodenparameter und der Stromstärke auf die Effektivität der Elektrokoagulation wie bei der Versuchsreihe KTZR. Die Spannungsverläufe zeigen alle das Profil A und folgen der logischen Reihenfolge je nach Elektrodenabstand und Stromstärke: je größer der Elektrodenabstand und je höher die Stromstärke, desto höher die Spannung. Die Versuche Al-2A-0,5 cm und 1,5 cm sind eine Ausnahme, da sie dem Profil B bzw. C folgen.

Die Spannungswerte nach 30 Minuten (Endspannungswerte) unterscheiden sich leicht von den Spannungswerten zu Beginn der Reaktion. Je kleiner der Elektrodenabstand, desto kleiner ist der Unterschied des Spannungswerts am Anfang und am Ende der Elektrokoagulation. Zum Beispiel:

- Profil Stahl-1A-6,5 cm: $V_{Anfang} = 51 \text{ V}$ vs. $V_{Ende} = 35 \text{ V}$
- Profil Stahl-1A-0,5 cm: $V_{Anfang} = 7 \text{ V}$ vs. $V_{Ende} = 3 \text{ V}$
- Profil Al-1A-6,5 cm: $V_{Anfang} = 52 \text{ V}$ vs. $V_{Ende} = 43 \text{ V}$
- Profil Al-1A-0,5 cm: $V_{Anfang} = 7 \text{ V}$ vs. $V_{Ende} = 7 \text{ V}$

Dieses Phänomen führt insgesamt zu einer hohen Spannungswerten und folglich zu einem hohen Verbrauch an Energie.

Aus der Analyse der **Effektivitätsparameter** geht hervor, dass die Elektrokoagulation unter KTSP gleiche Tendenzen hinsichtlich der Elektrodenparameter und der Stromstärke zeigt, wie bei der Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand. Zusammenfassend haben die Stromstärke und der Elektrodenabstand einen großen positiven Einfluss. Hinsichtlich des Elektrodenmaterials zeigen die Ergebnisse der Filterpresse, dass die Elektrokoagulation mit Elektroden aus Aluminium die Suspension am meisten destabilisieren.

Im Folgenden werden die besten Ergebnisse dieser Versuchsreihe vorgestellt:

- $Bkt < 21$ % beim Versuch Stahl-2A-3,5cm
- $\Delta\rho < 40$ % beim Versuch Al-2A-3,5cm
- $\Delta FW < 30$ % beim Versuch Al-2A-2,5cm

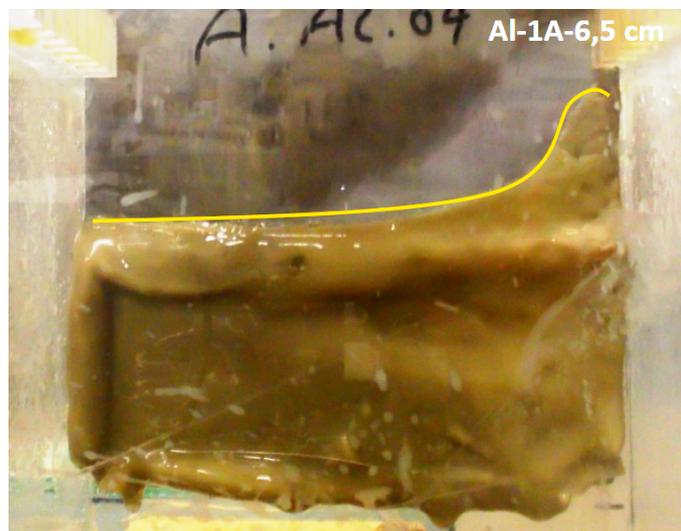


Abbildung 6.29: Anodenoberfläche, Versuchsreihe: KTSP

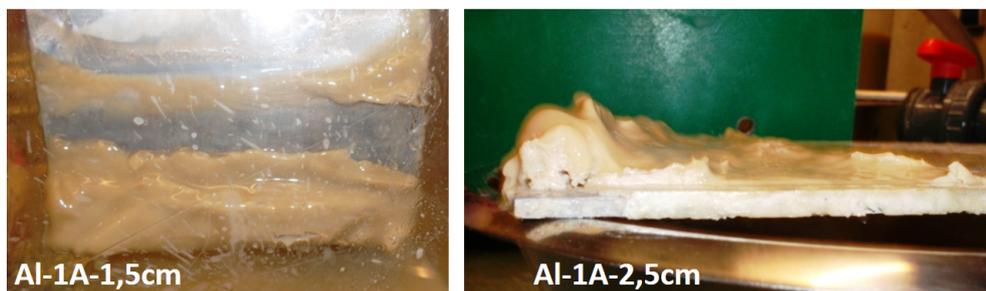


Abbildung 6.30: Bentonitschicht an der Anode, Versuchsreihe: KTSP

Aus Beobachtungen im Labor geht hervor, dass eine starke turbulente Strömung zu sehr **unregelmäßigen aktiven Elektrodenoberflächen** führt. Die turbulente Strömung in der Zelle verändert den Suspensionsspiegel, sodass dieser nicht mehr ebenförmig ist. Dies hat zur Folge, dass die aktive Elektrodenoberfläche nicht mehr viereckig ist, sondern unregelmäßig. Die Abbildung 6.29 zeigt die Anode nach der Elektrokoagulation unter KTSP. Das Bentonit klebt an der Anode ebenfalls unregelmäßig, d.h. die Bentonitschicht ist nicht gleich dick. Dieses

Phänomen wird ebenfalls anhand von 2 Bildern (Abb. 6.30) gezeigt. Das erste Bild zeigt, wie die turbulente Strömung die Bentonitschicht an der Anode bei einem Elektrodenabstand 1,5 cm unregelmäßig abträgt. Dabei wird die Bentonitschicht an der oberen Seite der Anode entfernt, an der unteren Seite jedoch nicht. Das zweite Bild stellt das Bentonitschichtprofil an der Anode beim Versuch mit einem Elektrodenabstand von 2,5 cm dar. Die Bentonitschicht an der oberen Seite der Anode wird nicht vollständig abgetragen.

Fazit

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Effektivität in diesem Fall sehr gering ist. Hier ist zu berücksichtigen, dass die verwendete Stromstärke (1A und 2A) zwar gleich wie bei den vorherigen Versuchen ist, jedoch werden in dieser Versuchsreihe 3 l Suspension anstatt 2 l verwendet.

Die Wichtigsten Ergebnisse zur Effektivität der Elektrokoagulation KTSP werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Vergleich: Ruhe-Zustand vs. kontinuierliche turbulente Strömung durch den Rührer und die Pumpe

Die Versuche EMAS, KTSR und KTSP werden in diesem Abschnitt verglichen. Verglichen wird der Einfluss der kontinuierlichen Strömung durch den Rührer oder die Pumpe auf die Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit dem Ruhe-Zustand.

Um den Vergleich zu führen, müssen die Daten aus den drei Versuchsreihen vergleichbar sein. Da in den Versuchsreihen EMAS und KTSR 2 l Suspension und in der Versuchsreihe KTSP 3 l Suspension verwendet werden, müssen die Ergebnisse zur Effektivität aus der Versuchsreihe KTSP durch einen Faktor modifiziert werden.

Der Modifikationsfaktor wird mithilfe des Verhältnisses *aktive Elektrodenoberfläche / Volumen der Zelle* (AF/V) berechnet.

In der Literatur ist dieses Verhältnis ein Indikator für die Verteilung der Koagulans in der Zelle. In diesem Zusammenhang bezieht sich das Volumen der Zelle auf das Volumen der Flüssigkeit, die sich in der Zelle befindet und in der die Reaktion stattfindet. Das Verhältnis bezieht sich somit auf die Verteilung der Koagulans in der behandelten Flüssigkeit. Das Volumen der Zelle entspricht nicht immer dem Volumen der verwendeten Flüssigkeit. Die Versuchsreihe KTSP ist ein Beispiel dafür: das Volumen der Zelle beträgt 2 l und das Volumen der behandelten Flüssigkeit beträgt 3 l.

Das Verhältnis kann auch so definiert werden: Verhältnis *aktive Elektrodenoberfläche / Volumen der verwendeten Flüssigkeit* (AF/V), damit das Volumen der Flüssigkeit, anstatt des Volumens der Zelle berücksichtigt wird. Dieses Verhältnis für die Versuchsreihen EMAS sowie KTSR beträgt:

$$\text{Verhaeltnis}_{EMAS} = \text{Verhaeltnis}_{KTSR} = 0,0622\text{cm}^2/\text{cm}^3$$

In diesem Fall ist das Verhältnis gleichwertig, da die aktive Elektrodenoberfläche und die verwendete Flüssigkeit nicht variiert werden. Hinsichtlich der Versuchsreihe KTSP beträgt das Verhältnis:

$$\text{Verhaeltnis}_{KTSP} = 0,0413\text{cm}^2/\text{cm}^3.$$

Dies bedeutet, dass die Koagulans bei den Versuchsreihen EMAS und KTSR besser verteilt wird. Dieser Sachverhalt ist auch nachvollziehbar, da in den beiden ersten Versuchsreihen 2 l anstatt 3 l mit der gleichen Menge an Koagulans behandelt werden. Um den Effekt der unregelmäßigen Verteilung der Koagulans beim Vergleich von Ergebnissen zu beseitigen, werden alle Effektivitätsparameter durch das Verhältnis dividiert. Durch diese Modifikation sind die Effektivitätsparameter aller drei Versuchsreihen vergleichbar.

- $Eff.Param._{EMAS} / Verhaeltnis_{EMAS}$
- $Eff.Param._{KTSR} / Verhaeltnis_{KTSR}$
- $Eff.Param._{KTSP} / Verhaeltnis_{EMAS}$

Um den Vergleich zu vereinfachen, werden die Effektivitätsparameter mit einem konstanten Wert multipliziert. Der konstante Wert ist gleich $Verhlnis_{EMAS} = Verhlnis_{KTSR}$. Demzufolge müssen nur die Effektivitätsparameter der Versuchsreihe KTSP durch einen Faktor modifiziert werden.

- $Eff.Param._{EMAS} / Verhaeltnis_{EMAS} * Verhaeltnis_{EMAS} = Eff.Param._{EMAS}$
- $Eff.Param._{KTSR} / Verhaeltnis_{KTSR} * Verhaeltnis_{EMAS} = Eff.Param._{KTSP} * Faktor$
 - $Faktor = Verhaeltnis_{EMAS} / Verhaeltnis_{KTSR} = 1,5$
- $Eff.Param._{KTSP} / Verhaeltnis_{EMAS} * Verhaeltnis_{EMAS} = Eff.Param._{KTSP}$

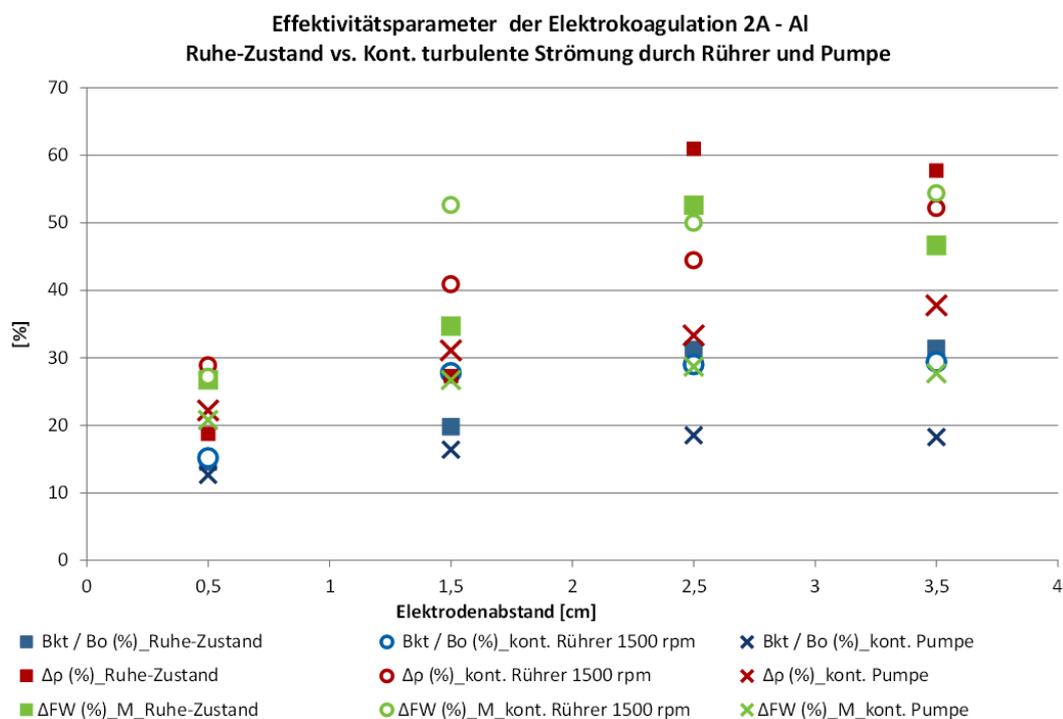


Abbildung 6.31: Vergleich der Effektivitätsparameter Ruhe-Zustand vs. kontinuierliche Strömung durch den Rührer und die Pumpe.

Im Folgenden werden die **Effektivitätsparameter** der drei Versuchsreihen mithilfe der Abbildung 6.31 verglichen. Diese Abbildung stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Aluminiumelektroden und einer von Stromstärke 2 Ampere dar, da diese Kombination der Parameter zu den besten Ergebnissen der Versuchsreihe EMAS führen. Auf der x-Achse wird der Elektrodenabstand in cm und auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben. Die blauen Markierungen stellen den Anteil an koagulierte Bentonit, die roten Markierungen die Verringerung der Dichte und die grünen Markierungen die Verringerung der Stabilität der Restsuspension dar. Die viereckigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe EMAS, die kreisförmigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSP und die kreuzförmigen Markierungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Versuchsreihe KTSP. Letztgenannte sind bereits durch den Faktor modifiziert.

Diese Ergebnisse werden je nach Elektrodenabstand analysiert. Zuerst werden die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Elektrodenabständen von 0,5 und 1,5 cm dargestellt. Abschließend folgt die Darstellung der Ergebnisse mit Elektrodenabständen von 2,5 und 3,5 cm.

- **Gruppe: Elektrodenabstand von 0,5 und 1,5 cm.** Aus der Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Elektrodenabständen von 0,5 und 1,5 cm geht hervor, dass der Einsatz einer kontinuierlichen, turbulenten Strömung durch den Rührer einen positiven Einfluss auf alle drei Effektivitätsparameter hat. Insbesondere trägt die Strömung durch den Rührer zu einer Verringerung der Dichte bei. Die Verringerung der Dichte beträgt bei einem Elektrodenabstand von 0,5 cm etwa 10 % und bei einem Abstand von 1,5 cm ca. 12 %. Beim Effektivitätsparameter $\Delta\rho\%$ stellt die Strömung durch die Pumpe gegenüber dem Ruhe-Zustand eine marginale Verbesserung dar.
- **Gruppe: Elektrodenabstand von 2,5 und 3,5 cm** Die Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand ist bei Elektrodenabständen von 2,5 und 3,5 cm deutlich effektiver. Alle drei Effektivitätsparameter zeigen im Ruhe-Zustand die besten Ergebnisse. Lediglich die Ergebnisse zur Verringerung der Stabilität der Restsuspension zeigen, dass die Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand und unter Strömung durch den Rührer gleich effizient sein kann.

Die besten Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt:

- $Bkt\% < 30\%$ bei den Versuchen Ruhe-Zustand mit 2,5 und 3,5 cm
- $\Delta\rho\% < 55\%$ bei den Versuchen Ruhe-Zustand mit 2,5 und 3,5 cm
- $\Delta FW\% < 50\%$ bei den Versuchen Ruhe-Zustand mit 2,5 cm und KTSP mit 3,5 cm

Im Allgemeinen führt die Strömung durch die Pumpe nicht zu einer Verbesserung der Leistung der Elektrokoagulation.

Kontinuierliche laminare Strömung

Als laminare Strömung wird die Bewegung von Flüssigkeiten in Schichten verstanden. Bei dieser Bewegung sind keine Turbulenzen zu beobachten und der Flüssigkeitsspiegel bleibt weitestgehend horizontal. Bei der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung ist die aktive Elektrodenoberfläche wie beim Ruhe-Zustand rechteckig.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: C		
	Versuchsreihe: laminare Strömung - Pumpe		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	277,0
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	kont. Strömung
	Strömung	[-]	laminar
	Strömungssystem	[-]	Pumpe
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	B_{kt} einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.10: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C

Die laminare Strömung lässt sich durch eine Exzentrerschneckenpumpe (Abb. 6.32) mit Förderströmen von 2 bis 12 l/min für eine Bentonitsuspension W 2,5 % erzeugen. Die Pumpe hat eine manuelle Frequenzsteuerung, durch die der Durchfluss reguliert werden kann. Die folgenden Durchflüsse werden untersucht: 0; 2,0; 3,2; 4,2; 5,0 und 6,0 l/min. Bei einem Durchfluss von 0 l/min herrscht in der Zelle der Ruhe-Zustand. Dieser Versuch dient als Referenz.



Abbildung 6.32: Exzentrerschneckenpumpe für die laminare Strömung

Zelle C ist so konzipiert, dass die Elektrokoagulation unter laminarer Strömung durchgeführt werden kann. Diese Zelle ist schmaler und länger als die Zellen A und B. Der Elektrodenabstand in Zelle C ist mit 6,5 cm festgesetzt. Die Untersuchungen werden außerdem nur mit 2 Ampere und nur mit Elektroden aus Aluminium durchgeführt. Diese 3 konstanten Parameter ergeben sich aus der Best-Combination + der Versuchsreihe EMAS unter Verwendung der Zelle B.

In der Tabelle 6.10 werden die Parameter dieser Versuchsreihe detailliert dargestellt.

Bezüglich des Volumens der behandelten Suspension wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung mit 3 l anstatt 2 l durchgeführt werden. Zwei Liter bleiben immer in der Zelle C; ein zusätzlicher Liter wird benötigt, um die Pumpe und den Schlauchkreislauf zu füllen. Bei den Versuchen im Ruhe-Zustand

werden wie üblich 2 Liter eingesetzt.

Es wird an dieser Stelle erneut die Problematik erkannt, dass die Ergebnisse im Ruhe-Zustand und unter Strömung nicht vergleichbar sind, wenn diese nicht durch einen Faktor modifiziert werden. Die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung werden durch einen Faktor modifiziert. Dieser Faktor bezieht sich wieder auf das Verhältnis „aktive Elektrodenoberfläche / Volumen der behandelten Flüssigkeit“. Die Berechnung des Faktors und die Modifikation der Ergebnisse lässt sich wie folgt zusammenfassen:

$$\text{Ergebnisse}_{\text{Ruhe-Zustand}} / \text{Verhaeltnis}_{\text{Ruhe-Zustand}} * \text{Verhaeltnis}_{\text{Ruhe-Zustand}}$$

$$\text{Ergebnisse}_{\text{lam.Str.}} / \text{Verhaeltnis}_{\text{lam.Str.}} * \text{Verhaeltnis}_{\text{Ruhe-Zustand}}$$

$$\text{Faktor} = \text{Verhaeltnis}_{\text{Ruhe-Zustand}} / \text{Verhaeltnis}_{\text{lam.Str.}} = 1,5$$

$$\text{Ergebnisse}_{\text{lam.Str.}} * 1,5$$

Die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung mit unterschiedlichen Durchflüssen werden zusammen mit denen im Ruhe-Zustand dargestellt. Damit wird nicht nur der Einfluss der laminaren Strömung sondern auch der Einfluss des Durchflusses der Strömung auf die Effektivität der Elektrokoagulation bestimmt. Die Eigenschaften des koagulierten Bentonits werden ebenfalls kommentiert.

Effektivitätsparameter

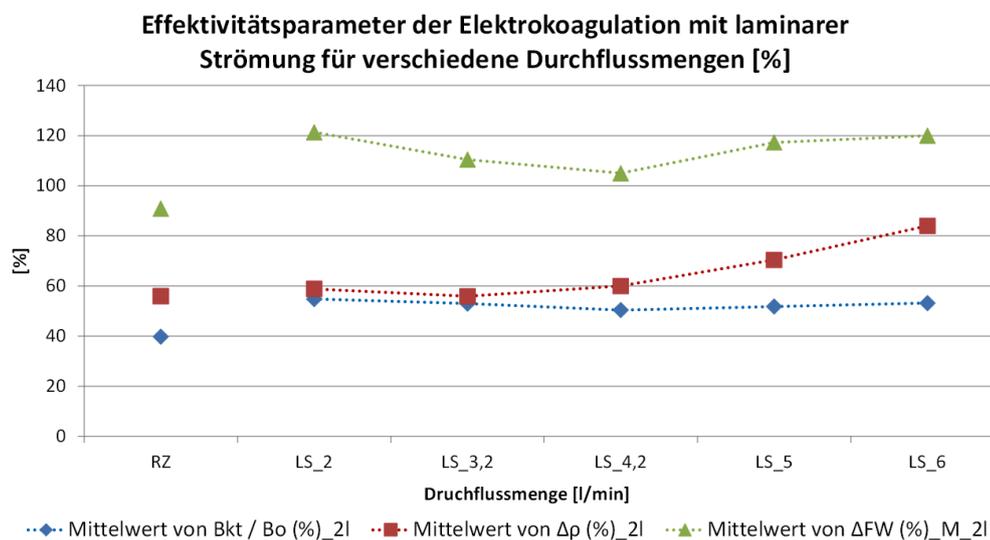


Abbildung 6.33: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C

Abbildung 6.33 stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter Verwendung der Zelle C im Ruhe-Zustand und unter laminarer Strömung mit unterschiedlichen Durchflussraten dar. Auf der x-Achse werden die verschiedenen Durchflussmengen in l/min angegeben. Hier wird der Ruhe-Zustand mit RZ und die laminare Strömung mit LS abgekürzt. Auf der y-Achse

werden die Effektivitätsparameter ($B_{kt}\%$, $\Delta\rho\%$ und $\Delta FW\%$) in % angegeben. Die Ergebnisse der Versuchsreihe der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung sind bereits durch den Faktor modifiziert.

Mithilfe dieser Abbildung lassen sich zwei Einflüsse auf die Effektivität der Elektrokoagulation feststellen:

- Einfluss der kontinuierlichen laminaren Strömung auf die Effektivität der Elektrokoagulation: durch den Vergleich der Ergebnisse im Ruhe-Zustand mit den Ergebnissen aus laminarer Strömung
- Einfluss des Durchflusses der kontinuierlichen laminaren Strömung auf die Effektivität der Elektrokoagulation

Die Ergebnisse zeigen, dass die laminare Strömung - im Gegensatz zum Ruhe-Zustand - eine Verbesserung aller drei Effektivitätsparameter bei der Elektrokoagulation hervorruft. Die Ergebnisse des **prozentualen Anteils an koagulierte Bentonit** bei der Elektrokoagulation unter laminarer Strömung sind deutlich höher als im Ruhe-Zustand. Bei laminarer Strömung steigt dieser Parameter unabhängig von der Durchflussrate von 40 % bis auf ca. 55 %. Hinsichtlich der untersuchten Durchflüsse in Bereichen von 2 bis 6 l/m stellt dieser Parameter keinen Einfluss auf die Effektivität der Elektrokoagulation dar.

Die laminare Strömung hat, je nach Durchflussmenge, einen neutralen bis positiven Einfluss auf die **Verringerung der Dichte der Restsuspension**. Bei niedrigen Durchflussraten (2 bis 3,2 l/min) beeinflusst diese die Verringerung der Dichte kaum. Die Werte dieses Effektivitätsparameters liegen bei ca. 58 %. Höhere Durchflussmenge ab 4,2 m/l haben einen deutlichen positiven Einfluss auf die Verringerung der Dichte.

In Hinblick auf die **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** ruft die laminare Strömung eine deutliche Verbesserung der Effektivität hervor. Die Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand zeigt eine Verringerung der Dichte von ca. 90%. Dagegen führt die Elektrokoagulation unter laminarer Strömung zu Werten von 105 bis 120 %. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass diese Verbesserung der Verringerung der Stabilität der Restsuspension nicht von der Durchflussrate abhängig ist. Die Werte der Verringerung der Stabilität liegen über 120% bei Durchflussraten von 2 und 6 l/min. Für Durchflussraten zwischen 2 und 6 l/min liegen die Werte bei ca. 105 bis 120 %.



Abbildung 6.34: Bentonitschicht an der Anode, Versuchsreihe: laminare Strömung-Zelle C

Kommentar zum koagulierten Bentonit

Aus den Beobachtungen im Labor geht hervor, dass sich das Bentonit vollständig an der Anode ansammelt. Die Bentonitschicht ist ca. 1,5 cm dick. Das angesammelte Bentonit haftet

nicht an Anode, sondern löst sich nach der Reaktion von allein von der Anode ab, (Abb. 6.34). Außerdem befinden sich keine Flocken in der Restsuspension. D.h., das koagulierte Bentonit besteht ausschließlich aus der Bentonitschicht an der Anode.

Fazit

Zusammenfassend führt die laminare Strömung zu einer Erhöhung der Effektivität der Elektrokoagulation in Hinblick auf alle drei Effektivitätsparameter. Die besten Ergebnisse ergeben Versuche unter kontinuierlicher laminarer Strömung mit einem Durchfluss von 5 bis 6 l/min. Dieser Durchfluss wird für bei laminarer Strömung bevorzugt. Im Folgenden werden die besten Ergebnisse dieser Versuchsreihe aufgezeigt:

- $B_{kt}\% \approx 50\%$
- $\Delta\rho\% \approx 70 - 85\%$
- $\Delta FW\% \approx 110 - 120\%$

Diese Betriebsart wird für die Integration der Elektrokoagulation dieser Trennmethode in der aktuellen Separationsanlage gegenüber dem Ruhe-Zustand bevorzugt. In den weiteren Versuchsreihen wird dennoch die Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand durchgeführt, da diese Untersuchungen einfacher durchzuführen sind und einen geringeren Zeitaufwand mit sich bringen.

6.2.2 Reinigungssystem der Anode

Eine Herausforderung stellt die Verringerung der Leistung der Elektrokoagulation durch die vermehrte Anlagerung von Bentonitpartikeln an der Anodenoberfläche im Zuge der Reaktion dar. Mechanismen gegen diese Anlagerung, wie die mechanische und die elektrische Reinigung der Anode werden nachfolgend untersucht. Die mechanische Reinigung wird durch das manuelle Abkratzen der Anode realisiert; die elektrische Reinigung geschieht durch eine Polaritätsumschaltung zwischen Anode und Kathode. Abschließend werden die Versuchsreihen zur Reinigung der Anode sowie ihre Ergebnisse vorgestellt.

Mechanische Reinigung der Anode

Ziel dieser Versuchsreihe ist es, den Einfluss der mechanischen Reinigung der Anode auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen. Die mechanische Reinigung geschieht durch das Abkratzen der Anode, woraufhin das koagulierte Bentonit eingesammelt und die Anodenplatte nach einem festgelegten Zeitintervall ausgewechselt wird. Diese drei Prozesse werden mit einander kombiniert und simulieren ein mechanisches Reinigungssystem der Anode in der Elektrokoagulationszelle.

Im Folgenden werden die Reinigungsprozesse dargestellt.

- **Reinigungsintervall der Anode: alle 5 oder 10 min. (Abkürzung: R05 oder R10) .**
- **Einsammeln des koagulierten Bentonits (Abkürzung: BE)**
- **Wechseln der Anodenplatte (Abkürzung: AW)**

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Mechanische Reinigung		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm^2]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	mechanisch
	Zeitintervall	[min]	5 und 10
	B_{kt} einsammeln	[-]	Ja
	Anode wechseln	[-]	Ja

Tabelle 6.11: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Mechanische Reinigung der Anode

Die oben vorgestellten Prozesse werden wie folgt kombiniert, um unterschiedliche Betriebsarten des Reinigungssystems zu simulieren:

- **Einfache Reinigung der Anode, Zeitintervall 5 bzw. 10 Minuten: R05 und R10.** Alle 5 bzw. 10 Minuten wird das koagulierte Bentonit, das an der Anode haftet, von der Anode abgekratzt. Das koagulierte Bentonit bleibt in der Suspension. Die Versuche R05 und R10 simulieren die Anwendung eines diskontinuierlichen Reinigungssystems der Anode. Abbildung 6.35 zeigt eine Skizze der hier beschriebenen Elektrokoagulationszelle.
- **Reinigung der Anode und Einsammeln des koagulierten Bentonits, Zeitintervall 5 bzw. 10 Minuten: R05-BE und R10-BE.** In diesem Fall wird die Anode alle 5 bzw. 10 Minuten gereinigt. Die Suspension wird gesiebt und das koagulierte Bentonit eingesammelt. Die Restsuspension wird zurück in die Zelle gegeben und die Reaktion wird fortgesetzt. Dieser Versuch untersucht eine Elektrokoagulationszelle mit einem geschlossenen Kreislauf, wobei das Filtrationssystem das koagulierte Bentonit trennt. Dieses wird eingesammelt und das nicht-koagulierte Bentonit, d.h. die Restsuspension, zurück in die Zelle geleitet. Abbildung 6.35 zeigt eine Skizze dieser simulierten Elektrokoagulationszelle.
- **Reinigung und Wechseln der Anode, Zeitintervall 5 bzw. 10 Minuten: R05-AW und R10-AW.** Alle 5 bzw. 10 Minuten wird die Anode gereinigt und ersetzt. Das koagulierte Bentonit, das an der Anode haftet, bleibt in der Suspension. Dieser Test simuliert eine einfache Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen. Alle 5 bzw. 10 Minuten fließt die Suspension, einschließlich des koagulierten Bentonits, durch ein neues Elektrodenpaar, wobei die Anode neu, poliert und sauber ist. Die Abbildung 6.36 zeigt eine Skizze dieser simulierten Elektrokoagulationszelle.
- **Reinigung und Wechseln der Anode sowie Einsammeln des koagulierten Bentonits, Zeitintervall 5 bzw. 10 Minuten: R05-BE-AW und R10-BE-AW.** Bei

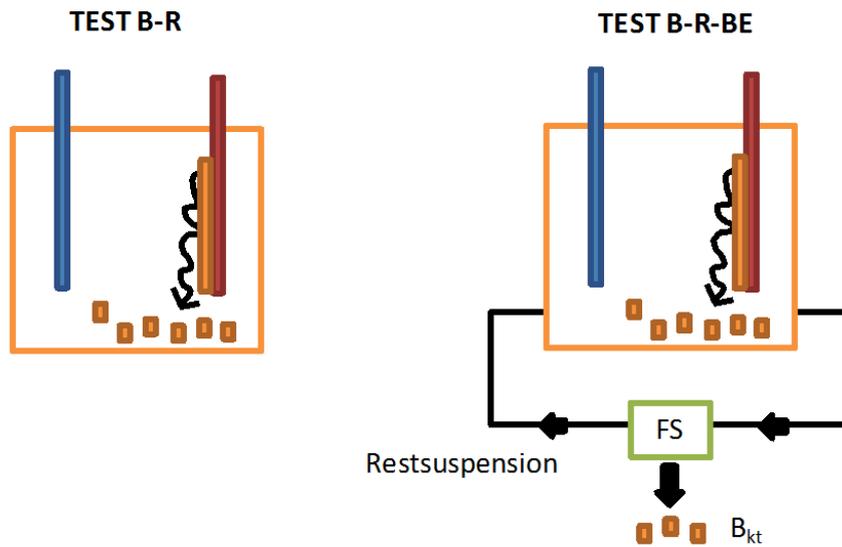


Abbildung 6.35: Skizze einer Elektrokoagulationszelle mit einem Reinigungssystem B-R und mit Reinigungs- und Filtrationssystem B-R-BE.

diesen Versuchen wird die Anode sowohl gereinigt als auch ersetzt und das koagulierte Bentonit wird ebenfalls eingesammelt. In diesem Fall wird eine Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen verwendet, wobei die Suspension durch ein Filtrationssystem geführt und das koagulierte Bentonit getrennt und eingesammelt wird. Alle 5 bzw. 10 Minuten fließt die Restsuspension, ohne das koagulierte Bentonit, durch ein neues Elektrodenpaar, wobei die Anode neu, poliert und sauber ist. Die Abbildung 6.37 zeigt eine Skizze dieser simulierten Elektrokoagulationszelle.

Tabelle 6.11 zeigt sämtliche Parameter der Versuchsreihe.

Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code beschreibt die Betriebsart des Reinigungssystems sowie ihre Häufigkeit. Beispielsweise steht der Code B R05-BE-AW für einen Versuche, bei dem die Anode alle 5 Minuten gereinigt und gewechselt und das koagulierte Bentonit eingesammelt wird.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden mit jenen von der Versuchsreihe Zelle B Al-2A-6,5 cm ohne Reinigung der Anode verglichen. Diese Ergebnisse werden als Referenz berücksichtigt und mit dem Code B gezeigt.

Hier wird zunächst der Verlauf der Spannung analysiert. Anschließend werden die Effektivitätsparameter dargestellt. Zum Schluss wird die Festigkeit des Bentonits an der Anodenoberfläche kommentiert.

Spannungsverläufe

In den Versuchen wurden konstante Parameter angewendet, d.h. Aluminiumelektroden, eine Stromstärke von 2 Ampere, eine maximale Spannung von 65 V und ein Elektrodenabstand von 6,5 cm.

Die Reinigung der Anode, das Einsammeln des koagulierten Bentonits und der Wechseln der Anodenplatte finden nicht sofort statt, sondern sie haben eine Dauer. Während der Reinigung

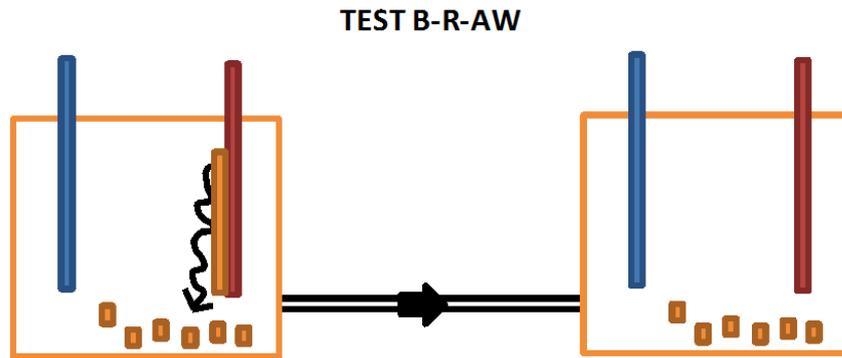


Abbildung 6.36: Skizze der Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen B-R-AW.

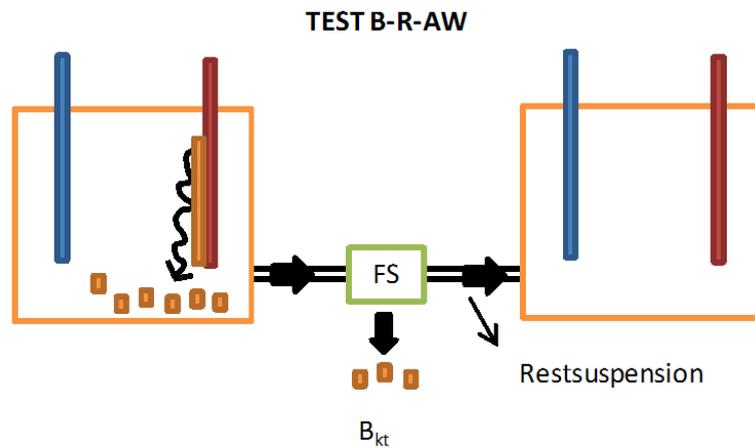


Abbildung 6.37: Skizze der Kaskadenschaltung zwischen mehreren Elektrokoagulationszellen mit einem Filtrationssystem B-R-BE-AW.

der Anode und der weiteren Variationen wird die Reaktion der Elektrokoagulation unterbrochen. Diese Unterbrechung übt eine Wirkung auf den Spannungsverlauf aus, da die Reaktion, je nach Versuche, jede 5 bzw. 10 Minuten 10 bis 30 Sekunden lang unterbrochen wird.

Abbildung 6.38 zeigt die Spannungsverläufe der Versuche ohne und mit Reinigung der Anode sowie mit Einsammeln des koagulierte Bentonits alle 5 bzw. 10 Minuten. Die x-Achse zeigt die Verweildauer der Reaktion in Sekunden; die y-Achse zeigt die entsprechende Spannung in Volt. Die Spannungsverläufe werden hier so dargestellt, dass der Zeitraum, in dem die Anode gereinigt und das koagulierte Bentonit eingesammelt wird, nicht berücksichtigt wird.

Die Spannungsverläufe dieser Versuchsreihe zeigen immer dann Spannungssprünge, wenn die Anode gereinigt wird. Daher sind die Spannungsverläufe, verglichen mit der Referenz (ohne Spannungssprünge), ungleichmäßig. Der Begriff Spannungssprung steht für eine Abnahme und eine sofortige Zunahme der Spannung. Nach dem Spannungssprung werden bei den Versuchen mit Reinigung höhere Spannungen als bei den Versuche ohne Reinigung erreicht. Mann kann in der Abbildung sehen, dass die Spannungsprofile der Versuche mit Reinigung über denen ohne

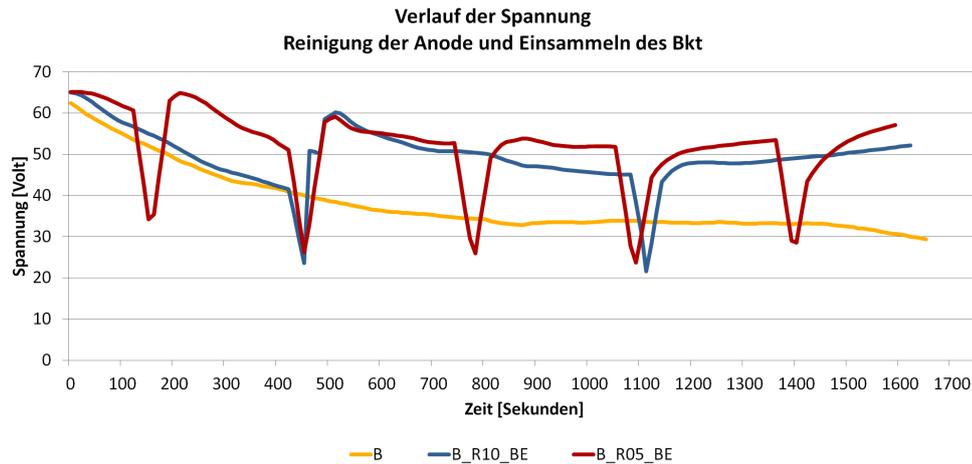


Abbildung 6.38: Verlauf der Spannung für Versuche mit Reinigung der Anode und Einsammeln des koagulierten Bentonits.

Reinigung liegen. Ein oder mehrere Spannungssprünge führen zu einer Zunahme der Spannung und demzufolge zu einem höheren Energieverbrauch.

Das Zeitintervalle der Reinigung spielen dabei eine große Rolle. Die Versuche zur Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode alle 5 Minuten, unabhängig von der Variationen *Wechseln der Anode* oder vom *Einsammeln des koagulierten Bentonits*, führen zu höheren Spannungen als die Versuche, bei denen die Anode alle 10 Minuten gereinigt wurde.

Effektivitätsparameter

Die folgende Einflüsse werden anschließend analysiert:

- Vergleich aller Reinigungssysteme (R, R-BE, R-AW und R-BE-AW) miteinander
- Einfluss des Reinigungssystems (R-BE und R-BE-AW) auf die Effektivität der Elektrokoagulation (gegenüber der Elektrokoagulation ohne Reinigung der Anode)
- Einfluss des Zeitintervalls der Reinigung (R-BE und R-BE-AW) auf die Effektivität der Elektrokoagulation
- Vergleich aller Reinigungssysteme miteinander

Die **Effektivität der Elektrokoagulation mit den Reinigungssystemen (R, R-BE, R-AW und R-BE-AW)** wurde analysiert.

Abbildung 6.39 zeigt die Effektivitätsparameter der Versuche mit den Reinigungssystemen (R, R-BE, R-AW und R-BE-AW) und einem Reinigungsintervall von 5 Minuten. Die Elektrokoagulation ohne Reinigung der Anode wird als B gekennzeichnet. Auf der x-Achse werden die Versuche, auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben. Hinsichtlich des Versuchs B weisen die Versuche B-R05 und B-R05-AW auf eine kleine Abnahme des prozentualen Anteils an koaguliertem Bentonit und auf eine markante Zunahme der Verringerung der Stabilität hin. In diesem Fall betragen die Werte der Verringerung der Stabilität über 90 %.

Die Kombinationen R-BE und R-BE-AW ergeben die besten Effektivitätsergebnisse: im Vergleich zu den Ergebnissen von B zeigen die Kombinationen R-BE und R-BE-AW eine große Zunahme der Parameter $B_{Kt}\%$ (5 %) und die Verringerung der Dichte der Restsuspension (10

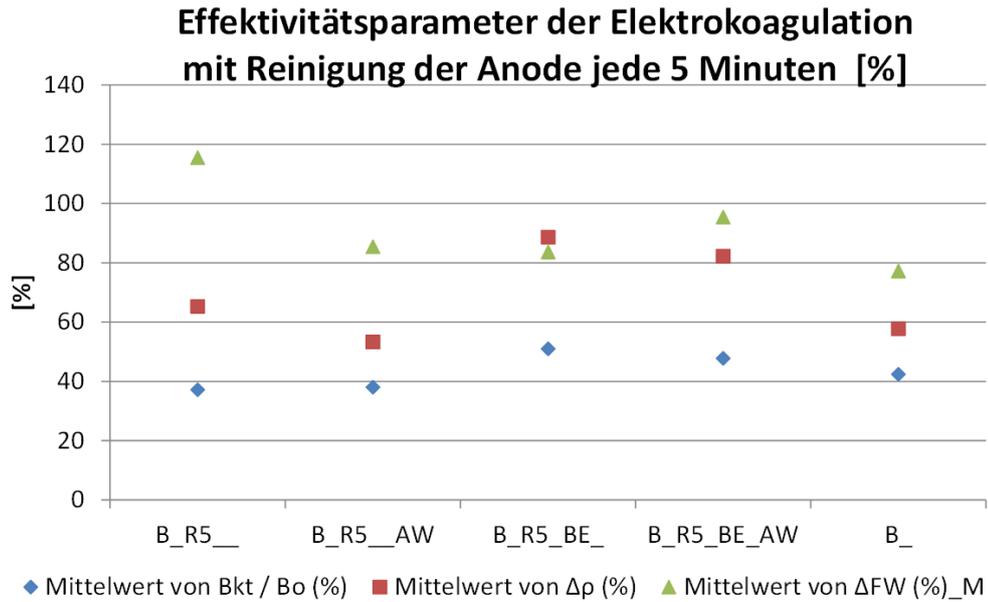


Abbildung 6.39: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode alle 5 Minuten

Der Parameter B_{kt} (5 %) ist auf über 50 % und der Parameter „Verringerung der Dichte der Restsuspension“ ist auf über 80 % angestiegen.

Die Reinigungssysteme, die höhere Ergebnisse erzielen, sind die R-BE und R-BE-AW. Daher werden nur diese detailliert analysiert.

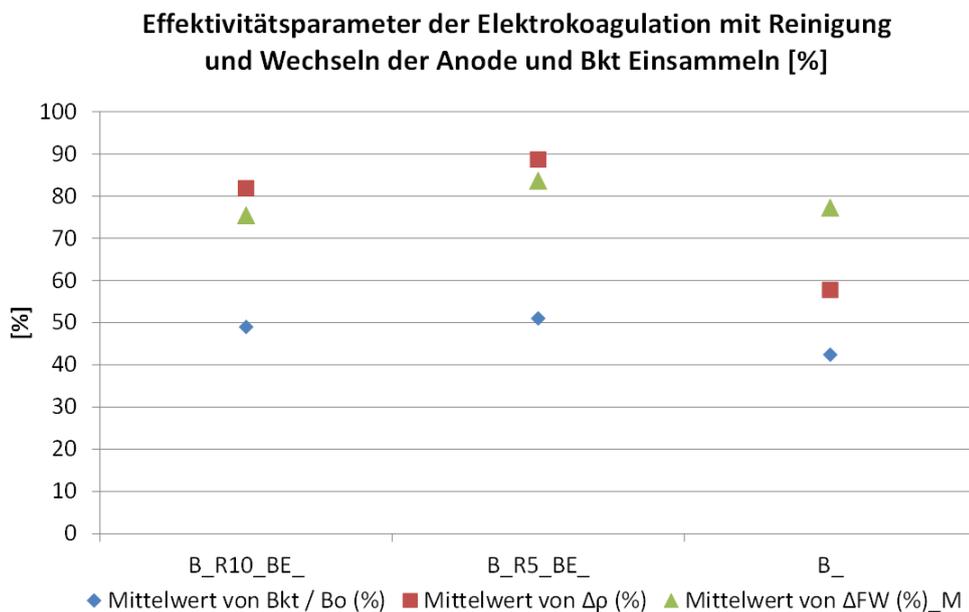


Abbildung 6.40: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode und Einsammeln des koagulierten Bentonits

Abbildung 6.40 zeigt die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit einer Reinigung der Anode und dem Einsammeln des koagulierten Bentonits. Auf der x-Achse werden die drei Versuche

ohne Reinigung, mit Reinigung-10 min Zeitintervall und mit Reinigung-05 min Zeitintervall; auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben.

Die Kombination aus der Reinigung der Anode und dem Einsammeln des koagulierten Bentonits beeinflusst positiv den prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit sowie die Verringerung der Dichte der Restsuspension. Das Zeitintervall ist ebenfalls entscheidend: je häufiger die Reinigung, desto höher ist die Effektivität bezüglich dieser zwei Effektivitätsparameter. Der Versuch B-R05-BE erzielt dabei die besten Ergebnisse: der Parameter B_{kt} beträgt über 50 % und $\Delta\rho$ beträgt über 90 %. Die Verringerung der Stabilität der Restsuspension zeigt keine Tendenz in Bezug auf diese Reinigungskombination. Die erreichten Werte für die Verringerung der Stabilität bleiben im Referenzbereich, d.h. diese Variation der Reinigung der Anode verursacht keinen deutlichen Einfluss auf diesen Parameter.

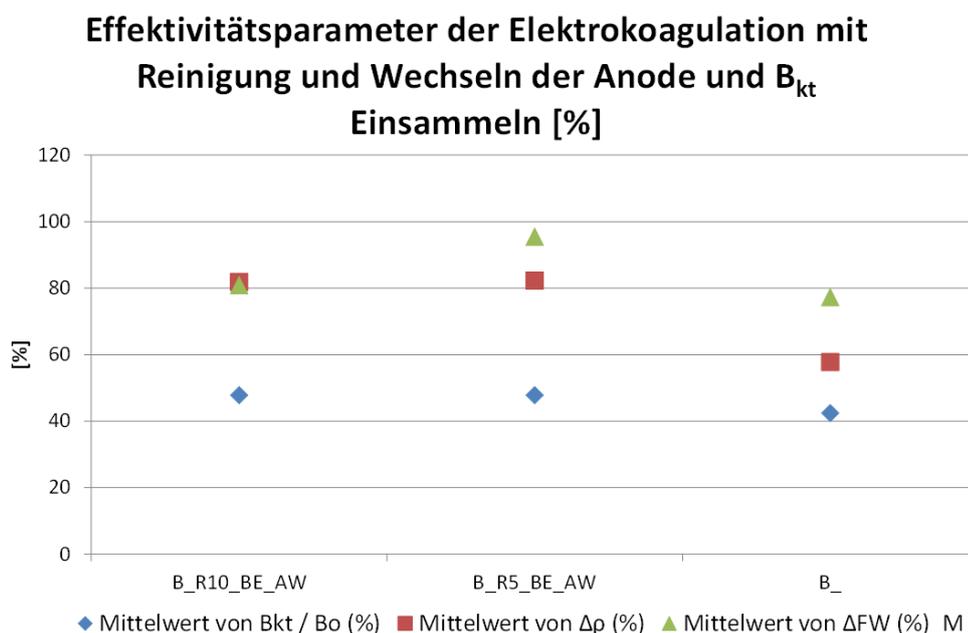


Abbildung 6.41: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation mit Reinigung und Wechsel der Anode sowie Einsammeln des koagulierten Bentonits

Abbildung 6.41 zeigt das Resultat der Elektrokoagulation mit einer Reinigung und dem Wechsel der Anode sowie dem Einsammeln des koagulierten Bentonits. Auf der x-Achse werden die drei Versuche ohne Reinigung, mit Reinigung-10 min Zeitintervall und mit Reinigung-05 min Zeitintervall, auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben.

Das Zusammenspiel von Reinigung, Wechseln der Anode und dem Einsammeln des koagulierten Bentonits verursacht eine positive Wirkung auf alle drei hier analysierten Effektivitätsparameter. Der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit beträgt ca. 45% und die Verringerung der Dichte über 80%. Das Zeitintervall der Reinigung der Anode beeinflusst die Parameter B_{kt} und $\Delta\rho$ kaum, die Verringerung der Stabilität der Restsuspension jedoch sehr. Je kürzer das Zeitintervall, desto höher ist die Verringerung der Stabilität.

Die besten Ergebnisse unter Berücksichtigung aller drei Effektivitätsparameter als einen globalen Effektivitätsparameter sind die folgenden:

- B-R5-BE-AW: 75,16 %
- B-R5-BE: 74,42 %

- B-R5: 72,62 %

Kommentar zur Festigkeit des koagulierten Bentonits

Im Laufe der Reaktion beginnen Bentonitpartikel an der Anode anzuhaften. Die Festigkeit der Bentonitpartikel an der Anode ist je nach Versuch unterschiedlich.

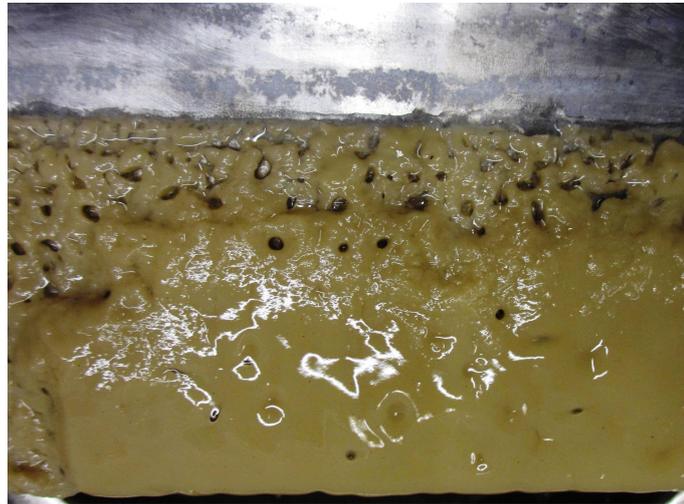


Abbildung 6.42: Bentonitschicht an der Anode beim Versuch B-R10-BE.

Die Beobachtungen während dieser Versuchsreihe ergeben, dass im Laufe der Reaktion ausschließlich die Versuche R05-BE und R10-BE eine ansteigende Festigkeit des koagulierten Bentonits ergeben. Bei dem Versuch R05-BE ist die Festigkeit ab 15 Minuten der Reaktion so gering, dass die sie locker ist und sich von selbst von Anode löst. Nach 30 Minuten der Reaktion ist die Schicht weitestgehend locker. Die Bentonitschicht löst sich selbstständig von ca. 80 % der Anodenoberfläche ab. In dem Fall des Versuchs R10-BE steigt die Festigkeit ab 20 Minuten an. Abbildung 6.42 zeigt die Bentonitschicht an der Anode im Versuch B-R10-BE.

Fazit

Das Einbringen eines Reinigungs- (R) und/oder Filtrationssystems (R-BE) in eine Elektrokoagulationszelle sowie die Berücksichtigung einer Verbindung mehrerer Zellen (R-BE-AW und R-AW), auch Kaskadenschaltung genannt, können - verglichen mit einer einfachen Zelle - zu einer höheren Leistung der Elektrokoagulation führen. Die hier vorgestellten Versuche ergeben, dass die Reinigungssysteme R-BE und R-BE-AW eine Verbesserung der Effektivität gegenüber der Elektrokoagulation ohne Reinigung erzielen.

Diese Verbesserung der Effektivität bedeutet eine Zunahme von ca. 5 % des prozentualen Anteils an koaguliertem Bentonit, eine Zunahme von ca. 10 % der Verringerung der Dichte und eine geringe Zunahme der Verringerung der Stabilität der Restsuspension. Bei diesen Konfigurationen der Reinigung der Anode wird das koagulierte Bentonit in definierten Zeitabständen nicht nur entfernt, sondern auch von der Suspension getrennt und separat eingesammelt. Dadurch verbleibt in der Zelle lediglich die zu behandelnde, nicht koagulierte Bentonitsuspension (die Restsuspension). Die Flocken machen die Suspension nicht homogen und führen zu einer Verringerung der Leistung der elektrochemischen Reaktion. Das Einsammeln des koagulierten

Bentonits ergibt eine bessere Leistung der Elektrokoagulation. Die Restsuspension wird instabiler (über 80 %) und dünner (ca. $1,0013 \text{ g/cm}^3$). Das gesamte eingesammelte koagulierte Bentonit erreicht einen Wert von 50 %. Referenz ist dabei immer die Elektrokoagulation ohne Reinigung.

Außerdem wird betont, dass die Verweildauer eine relevante Rolle bezüglich der Festigkeit, mit der die Bentonitschicht an der Anode anklebt, spielt. Nach 15 Minuten der Reaktion wird die Bentonitschicht an der Anode fester, sodass sich die Schicht nicht selbst von der Anode ablöst, sondern mithilfe eines Spachtels entfernt werden muss.

Das Zeitintervall der Reinigung der Anode spielt bei der Verbesserung der Elektrokoagulationsleistung eine große Rolle. Die Ergebnisse zeigen generell, dass, je häufiger die Anode gereinigt wird, die Effektivitätsparameter und demnach die Leistung der Elektrokoagulation höher ist.

Elektrische Reinigung der Anode

Die elektrische Reinigung der Anode wird durch eine Polaritätsumschaltung zwischen Anode und Kathode realisiert. D.h, die Pole der Elektroden ändern abwechselnd zu plus oder minus. Die Reinigung erfolgt, da die Anode jeder bestimmten Zeit Kathode und vice-versa wird. Während der Anoden-Phase einer Elektrode klebt sich das Bentonit an der Elektrodenoberfläche. Nach einer bestimmten Zeit wird die Polarität gewechselt. Diese Elektrode dient nicht mehr als Anode, sondern als Kathode. Die Elektrode übernimmt die Kathodenfunktion und sammelt kein mehr Bentonit. Das Bentonit fängt an, sich an der Elektrode gegenüber anzuhafte. Mit diesem Wechsel zwischen der Anoden- und Kathoden-Phase sollte die Reinigung der Elektroden erfolgen.

Ziel dieser Versuchsreihe ist, die Eignung der Polaritätsumschaltung als Methode zur Reinigung der Anode zu untersuchen und den Einfluss des Zeitintervalls der Polaritätsumschaltung auf die Reinigung der Anode sowie auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen. Das Zeitintervall der Polaritätsumschaltung ist für jede Untersuchung konstant. Die folgenden Zeitintervalle werden getestet: 60 bis 900 s (1 bis 15 min). Die Elektrokoagulation wird in dieser Versuchsreihe mit den folgenden Parameter durchgeführt (Tab. 6.12).

Im Folgenden werden die Spannungs- und Stromverläufe analysiert, die Polaritätsumschaltung als Mechanismus zur Reinigung der Elektroden untersucht und die Effektivität der Elektrokoagulation dargestellt.

Spannungs- und Stromverläufe

Die Abbildung 6.43 besteht aus 6 Diagrammen. Das erste Diagramm stellt den Spannungs- und Stromstärkenverlauf der Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung dar. Der Rest der Diagramme bildet die Verläufe der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung und unterschiedlichen Zeitintervallen ab. Auf jedem Diagramm wird die Verweildauer in s auf der x-Achse angegeben. Die Spannung wird in Volt auf der primären y-Achse und die Stromstärke in Ampere auf der sekundären y-Achse angegeben. Die Verläufe zeigen in jedem Fall das Muster jeder Polaritätsumschaltung.

Aus der Abbildung geht hervor, dass beide Profile von der Polaritätsumschaltung beeinflusst werden. Es lassen sich die folgenden Einflüsse der Polaritätsumschaltung erkennen:

- Einfluss auf die Spannungsverläufe
- Spannungssprünge und -spitze

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Elektrische Reinigung		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	elektrisch
	Zeitintervall	[min]	1 bis 15
	B_{kt} einsammeln	[-]	Nein
	Anode wechseln	[-]	Nein

Tabelle 6.12: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe elektrische Reinigung der Anode

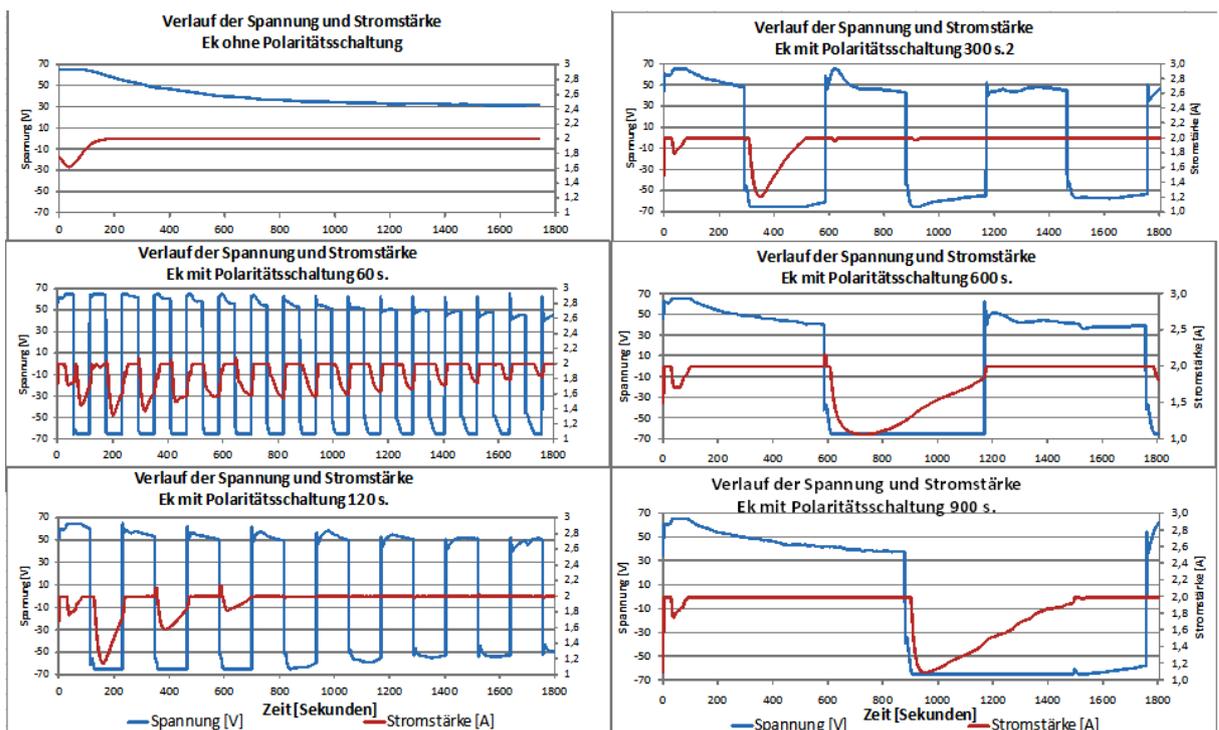


Abbildung 6.43: Strom- und Spannungsverläufe, Versuchsreihe: elektrische Reinigung

- Endspannungswerte
- Einfluss auf die Stromverläufe
- konstante Stromstärke von 2 Ampere
- Aktivierung der Elektrode als Anode bzw. als Kathode

Das Spannungsprofil der Elektrokoagulation wird von der Polaritätsumschaltung beeinflusst: dies ergibt **Spannungssprünge sowie Spannungsspitzen**. Jeder Spannungssprung kennzeichnet eine Polaritätsumschaltung von positiver zu negativer Spannung und vice versa. Dieser Spannungssprung zeigt ebenfalls das Zeitintervall jedes Versuchs an: je kürzer die Zeitintervall, umso mehr Spannungssprünge. Zum Beispiel ergibt das Diagramm ohne Polaritätsumschaltung keinen Spannungssprung. Dagegen ergeben die Diagramme Polaritätsumschaltung 60 und 600 s 30 bzw. 2 Sprünge. Spannungsspitzen werden nicht nur am Versuchsanfang (wie bei der Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung), sondern auch nach jedem Spannungssprung von positiver zu negativer Spannung.

Die **Endspannungswerte** der Elektrokoagulation tendieren ohne Polaritätsumschaltung zu ca. 40 V und mit zu ca. 45-50 V. Es kann festgestellt werden, dass die Polaritätsumschaltung zu einer Erhöhung der Spannung und einem dementsprechenden Energieverbrauch beiträgt.

Das Profil der Stromstärke zeigt, dass **die Stromstärke nicht konstant bleibt**, sondern auch von der Polaritätsumschaltung beeinflusst wird. Nach der ersten Umschaltung ist die Stromstärke immer kleiner als 2 Ampere. Danach, nach jeder Umschaltung von positiver zur negativer Spannung, steigt die Stromstärke langsam und tendiert zu 2 Ampere. Je nach Zeitintervall werden die 2 Ampere erreicht. Das lässt sich wie folgt begründen: bei der Aktivierung der Elektroden als Anode oder als Kathode spielt die erste Funktion der Elektrode eine große Rolle. Jede Elektrode gewöhnt sich stark an der ersten Funktion. Die Aktivierung der „Gegenfunktion“ erfordert ein hohes Potential. Das Potential nimmt zu, um die Aktivierung zu schaffen. Wenn die maximale Spannung des Netzgerätes (65 V) erreicht wird, erfolgt eine Verringerung der Stromstärke. Daher kann die Stromstärke nicht konstant bei 2 Ampere gehalten werden.

Hier ist ein anderer Aspekt zu erkennen: die Polaritätsumschaltung bei der Elektrokoagulation hat zu Folge, dass beide Elektroden ständig und immer wieder als Anode bzw. als Kathode aktiviert werden müssen. Es kann festgestellt werden, dass Anode und Kathode aktiviert sind, wenn sie mit 2 Ampere und unter max. 65 Volt arbeiten und diese Arbeitsbedingungen bis zum Ende der Reaktion bleiben. Diese **Aktivierung der Elektroden als Anode bzw. als Kathode hängt vom Zeitintervall** ab. Drei Tendenzen lassen sich unterscheiden.

1. Bei geringeren Zeitintervallen (60 s) wird dieser Fall nicht erreicht: jedes Intervall dauert nicht lang genug, um die Elektrode als Anode oder Kathode zu aktivieren.
2. Bei mittleren Zeitintervallen (120 s und 300 s) werden nach 700 s bzw. 400 s die genannten Arbeitsbedingungen erreicht.
3. Bei langen Zeitintervallen (600 s und 900 s) dauert die erste Anoden- bzw. Kathoden-Phase zu lang, sodass sie sich an die Anoden- bzw. Kathodenfunktion gewöhnt haben. Nach dem ersten Wechsel brauchen sie ein hohes Potenzial und lange Zeit, um die oben genannten Arbeitsbedingungen zu erreichen.

Als Haupttendenz lässt sich erkennen, dass die Polaritätsumschaltung die elektrische Leistung der Elektrokoagulationszelle stark beeinflusst. Die Elektroden gewöhnen sich stark an die erste Funktion. Aus diesem Grund erreicht die Spannung den Grenzwert des Netzgeräts und die Stromstärke kann nicht bei 2 Ampere gehalten werden. Ein optimales Zeitintervall kann identifiziert werden, um die Elektroden als Anode und Kathode in 30 Minuten (hier angewendete Verweildauer) zu aktivieren: 120-300 s.

Polaritätsumschaltung als Mechanismus für die Reinigung der Anode

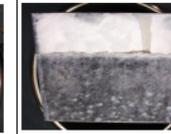
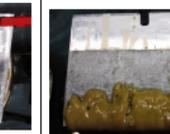
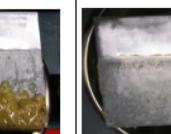
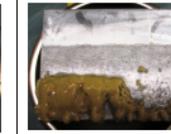
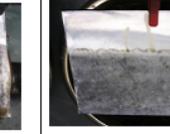
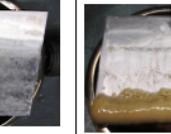
Zeitintervall [Sekunden]	60	120	300	600	900
Elektrode, die letzte Minuten als Anode oder Kathode diente:	Anode				
					
	Kathode				
					
Bildquelle: TLB					

Abbildung 6.44: Ergebnisse zur Reinigung der Elektroden durch Polaritätsumschaltung

Nach jedem Versuch werden Anoden und Kathoden fotografiert. Ziel ist es zu bestimmen, ob die Elektroden gereinigt werden und sauber bleiben. Die Abbildung 6.44 stellt die Bilder von den Elektroden am Ende jedes Versuchs dar. Für jeden Versuch wird eine Anode und eine Kathode gezeigt. Diese sind die Elektroden, die als letztes als Anode bzw. Kathode dienten. Jede Elektrodenplatte wird mit einer roten oder schwarzen Klammern gezeigt. Die Klammer stellen die erste Funktion jeder Elektrodenplatte dar.

Das Erreichen des Ziels hängt vom Zeitintervall ab:

- Bei geringen Zeitintervallen (60-120 s) wird das Ziel erreicht: beide Elektroden werden elektrisch gereinigt.
- Bei Zeitintervallen ab 300 s zeigen beide Elektrodenplatten unterschiedliche Tendenzen. Die Elektrode, die als erstes als Anode diente (rote Klammer), bleibt sauber und zeigt keine Bentonitschicht. Die Elektrode, die als erstes als Kathode diente (schwarze Klammer), wird nicht 100 % gereinigt. Eine lange Dauer (ab 300s) der Anoden-Phase an der Elektrode, die mit der Kathodenfunktion anfängt, erschwert die Reinigung dieser Elektrode.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Elektrode, die mit der Anodenfunktion anfängt, durch elektrische Reinigung unabhängig vom Zeitintervall gereinigt wird. Im Gegensatz dazu wird die Elektrode, die mit Kathodenfunktion anfängt, nur bei niedrigen Zeitintervallen gereinigt. Es kann ein optimales Zeitintervall festgestellt werden, um die Polaritätsumschaltung als Reinigungsmechanismus der Elektroden zu berücksichtigen: 60-120 s.

Effektivitätsparameter

Die Effektivität der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung wird mithilfe der drei Effektivitätsparameter dargestellt. Die Abbildung 6.45 stellt die Effektivitätsparameter dieser Versuchsreihe dar. Auf der x-Achse wird das Zeitintervall in Minuten und auf der y-Achse werden die Parameter in % angegeben. Rechts auf der x-Achse werden die Ergebnisse der

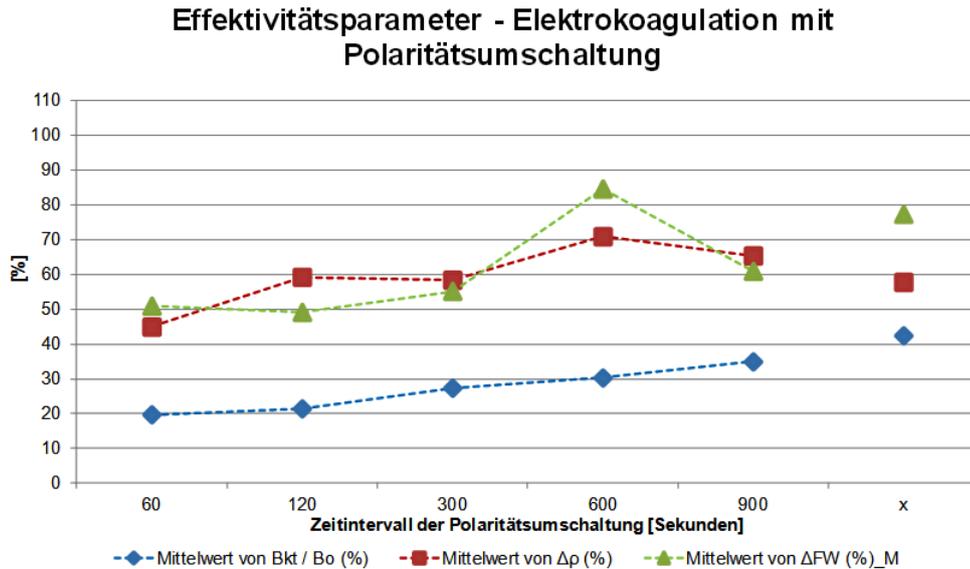


Abbildung 6.45: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: elektrische Reinigung

Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung als Referenz dargestellt. Diese sind mit einem „x“ gekennzeichnet.

Der **prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit** ($B_{kt}\%$) steigt mit zunehmendem Zeitintervall, d.h. die Polaritätsumschaltung beeinflusst negativ die Koagulation von Bentonit. Je kürzer das Zeitintervall bzw. je häufiger die Polaritätsumschaltung, desto weniger Bentonit koaguliert. Während die Versuche mit Zeitintervall 900 s einen $B_{kt}\%$ von knapp 35% zeigt, beträgt dieser Parameter bei der Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung über 40%.

Die Ergebnisse zur **Verringerung der Dichte der Restsuspension** zeigt eine ähnliche Tendenz; dieser Parameter steigt mit zunehmendem Zeitintervall. Im Bezug auf die Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung beeinflusst diese Umschaltung mit Zeitintervall bis 300 s diesen Parameter negativ. Bei den Versuchen mit Zeitintervall ab 600 s sind die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung besser als die ohne Polaritätsumschaltung. Während die Versuche ohne Polaritätsumschaltung eine Verringerung der Dichte von knapp 60% zeigen, beträgt dieser Parameter bei der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung und Zeitintervall 600 s über 70%. Die Verringerung der Dichte ist bei langen Zeitintervallen stärker bei der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung als bei der ohne Polaritätsumschaltung.

Die **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** folgt der gleichen Tendenz wie die Verringerung der Dichte; dieser Parameter steigt mit zunehmendem Zeitintervall. Hier ist zu betonen, dass der Versuch mit Polaritätsumschaltung und Zeitintervall 600 s eine Verringerung der Stabilität über 80% zeigt. Dieses Ergebnis überschreitet das von der Elektrokoagulation ohne Polaritätsumschaltung.

Zusammenfassend wird die Effektivität der Elektrokoagulation von der Polaritätsumschaltung beeinflusst. Im Allgemeinen übt die Polaritätsumschaltung einen negativen Einfluss auf die Effektivität aus. Nur die Versuche mit Polaritätsumschaltung und Zeitintervalle über 600 s erzielen bessere Ergebnisse bzgl. der Verringerung der Dichte und der Stabilität, als die ohne Polaritätsumschaltung.

Fazit

Die Spannungs- und Stromverläufe ergeben, dass das optimale Zeitintervall zur Aktivierung der Elektroden zwischen 120-300 s liegt.

Die elektrische Reinigung der Elektroden erfolgt abhängig vom Zeitintervall der Polaritätsumschaltung. Bei niedrigen Zeitintervallen (60-120 s), d.h. 30 und 15 Polaritätsumschaltungen pro 30 min, werden beide Elektroden elektrisch gereinigt. Im Vergleich dazu hängt die Reinigung der Elektroden bei der Elektrokoagulation mit Zeitintervallen von 300-900 s von der ersten Funktion jeder Elektrode ab. Dient eine Elektrode zuerst als Anode, wird sie gereinigt. Dient eine Elektrode zuerst als Kathode, bleibt ein Teil der Bentonitschicht an der Elektrodenoberfläche.

Die Effektivität der Elektrokoagulation wird von der Polaritätsumschaltung beeinflusst. Je nach Effektivitätsparameter und Zeitintervall ist der Einfluss unterschiedlich. Die Polaritätsumschaltung übt generell einen negativen Einfluss auf die Effektivität der Elektrokoagulation. Die Ergebnisse der Elektrokoagulation mit Polaritätsumschaltung und Zeitintervall ab 600 s sind zu denen ohne Polaritätsumschaltung vergleichbar.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Polaritätsumschaltung als elektrische Reinigung der Anode dienen kann sowie dass das Zeitintervall der Polaritätsumschaltung eine große Rolle bei der Reinigung und der Effektivität der Elektrokoagulation spielt. Die Ergebnisse zeigen, dass die drei Ziele unterschiedlich optimale Zeitintervalle zeigen:

- Effektivität der Elektrokoagulation ergibt ein optimales Zeitpotential von 600-900 s
- Effektivität der Aktivierung der Elektroden ergibt ein optimales Zeitintervall von 120-300 s
- Effektivität der Reinigung ergibt ein optimales Zeitpotential von 60 - 120 s.

Da die optimalen Zeitintervalle nicht gleich sind, muss man Prioritäten hinsichtlich der Effektivität der Elektrokoagulation, der Aktivierung der Elektroden oder der Reinigung setzen.

6.2.3 Verweildauer

Ziel dieser Versuchsreihe ist, den Einfluss der Verweildauer der Reaktion auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen. In dieser Versuchsreihe ist die Stromstärke von 2 Ampere, der Elektrodenabstand von 6,5 cm und das Volumen von behandelter Suspension von 2 Liter. Dabei wird Zelle B angewendet. Die Verweildauern der Reaktion von 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 und 90 Minuten werden untersucht. Die Tabelle 6.13 stellt die Parameter dieser Versuchsreihe dar.

Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code zeigt hauptsächlich die Verweildauer der Reaktion in min. Zum Beispiel: der Code B-VD-15 stellt den Versuch dar, bei dem die Reaktion der Elektrokoagulation 15 Minuten lang läuft.

Hier werden keine Spannungsverläufe detailliert analysiert, da die elektrischen Parameter konstant bleiben wie in Versuchsreihe EMAS-Zelle B. Die Spannungsverläufe sehen wie an dem vorherigen Test B-2A-6,5cm (EMAS-Zelle B) aus, die Spannungs- und Stromprofile sind je nach Verweildauer kürzer oder länger.

Da die physikalischen Eigenschaften der Suspension (Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit) im Laufe der Reaktion steigen, ist es in dieser Versuchsreihe von Bedeutung, diese zu analysieren. Das Ziel ist zu bestimmen, ob diese Parameter linear steigen. Außerdem sind die

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Verweildauer		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm^2]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	5 bis 90
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	B_{kt} einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-

Tabelle 6.13: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Verweildauer der Elektrokoagulation

Endwerte dieser physikalischen Parameter ebenso wichtig, da die Restsuspension und das getrennte Wasser nach der Elektrokoagulation als Abwasser behandelt werden soll, indem sie entsorgt bzw. in das ursprüngliche Gewässer oder in die Kanalisation eingeleitet wird. Hier werden die Endwerte der physikalischen Parameter je nach Verweildauer eingegangen. Anschließend werden die Effektivitätsparameter eingegangen.

Physikalische Parameter

Hier wird der Einfluss der Verweildauer auf die physikalischen Parameter Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit analysiert. Die Werte der jeweiligen genannten Parameter vor der Reaktion sind ungefähr 20 °C, 9,6 und 980 $\mu S/cm$.

Die Abbildung 6.46 stellt die Endwerte der physikalischen Parameter von Versuchen mit unterschiedlicher Verweildauer dar. Die x-Achse zeigt den Code der Versuche, in dem die Verweildauer aufgetragen ist. Die primäre y-Achse zeigt den physikalischen Parameter Temperatur [°C] und pH-Wert [-], die sekundäre y-Achse zeigt den Leitfähigkeit [$\mu S/cm$].

Im Folgenden werden die Verläufe der drei physikalischen Parameter analysiert:

- **Temperatur:** Die Temperatur steigt linear im Laufe der Reaktion an. Bis 25 Minuten ist der Anstieg gering, die Temperaturwerte liegen im Bereich (21 bis 25 °C). Ab 25 Minuten Verweildauer betragen die Endwerte der Temperatur über 30 °C. Der Temperaturanstieg der Restsuspension nach der Elektrokoagulation ist bis zu einer Verweildauer von 60 min relevant, aber nicht gefährlich. Erst ab der Verweildauer 90 Minuten überschreitet die Endtemperatur der Suspension 40°C. Eine Restsuspension mit Endtemperatur über 40°C könnte ein potentielles Problem zur direkten Entsorgung oder Einleitung im ursprünglichen Gewässer oder in der Kanalisation sein.
- **pH-Wert:** Die Zunahme des pH-Wertes im Laufe der Reaktion sieht unterschiedlich aus. Der pH-Wert am Ende der Reaktion liegt im Bereich 10,5 bis 11,6. Hier ist zu betonen,

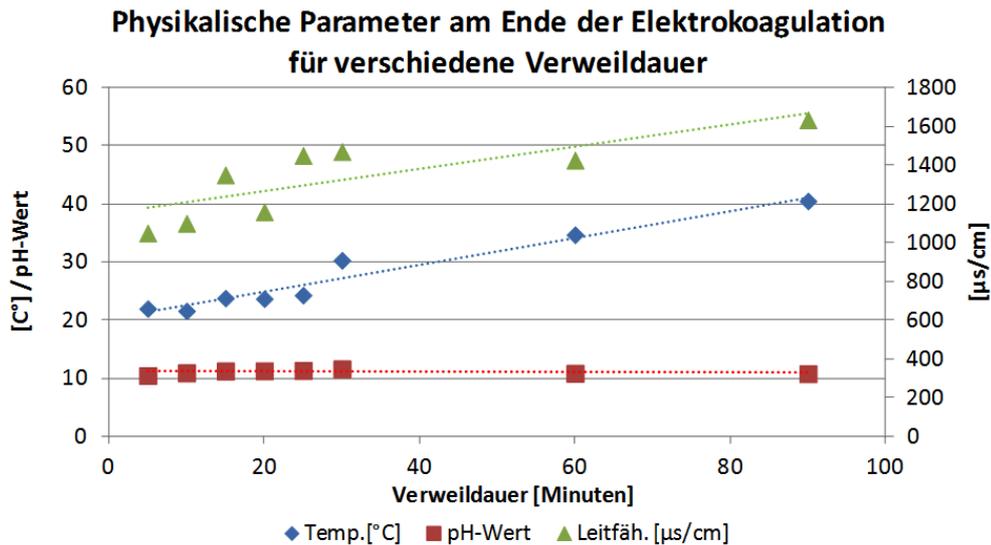


Abbildung 6.46: Physikalische Eigenschaften der Suspension, Versuchsreihe: Verweildauer

dass die Bentonitsuspension vor der Reaktion schon einen hohen pH-Wert (ca. 9,00) hat. Der Anstieg des pH-Werts ergibt kein potentiell Problem, wenn die Restsuspension mit einem pH-Wert unter 12,00 in der ursprünglichen Quelle eingeleitet wird.

- **Leitfähigkeit:** Die Steigerung der Leitfähigkeit im Laufe der Reaktion ist nahezu linear. Die Endwerte der Leitfähigkeit liegen zwischen 1000 und 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, was ebenfalls keinem Risiko zur Einleitung der Restsuspension in die ursprünglichen Quelle entspricht.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Verweildauer auf die physikalischen Parameter stark einwirkt. Aussicht der Entsorgungsbedingungen der gebrauchten Bentonitsuspensionen stellt diese Zunahme der Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit nach der Elektrokoagulation mit einer Verweildauer unter 60 min kein Umweltrisiko dar.

Effektivitätsparameter

Die Abbildung 6.47 stellt die Ergebnisse zur Effektivität der Elektrokoagulation für verschiedene Verweildauern dar. Die x-Achse zeigt die Verweildauer in Minuten und die y-Achse zeigt die 3 Effektivitätsparameter in Prozent.

Die Verweildauer hat einen großen Einfluss auf die Effektivität der Elektrokoagulation. Die Tendenz ist: je länger die Reaktion, desto effizienter die Destabilisierung und die Trennung des Bentonits. Diese Tendenz ist nicht für jeden Parameter linear.

Die Ergebnisse zeigen aber, dass der Parameter $B_{kt}\%$ nicht linear im Laufe der Zeit steigt, d.h. die Effektivitätsparameter werden nicht immer größer. Die Zunahme des koagulierten Bentonits verhält sich wie eine Asymptote, die zu 40 % tendiert. Zwischen 5 und 10 Minuten ist die Zunahme deutlich stärker als ab 25 Minuten, ab dem der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit konstant bleibt. Aufsicht dieser Ergebnisse erreicht die Elektrokoagulation nach 25 Minuten den maximalen prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit von ca. 40 %.

Die Zunahme der **Verringerung der Dichte** im Laufe der Reaktion ist linear bis zu einer Verweildauer von 30 Minuten, ab der der Parameter über 70 % beträgt. Ab dieser Verweildauer wird dieser Parameter nicht mehr von der Verweildauer beeinflusst und bleibt konstant. Im Bezug

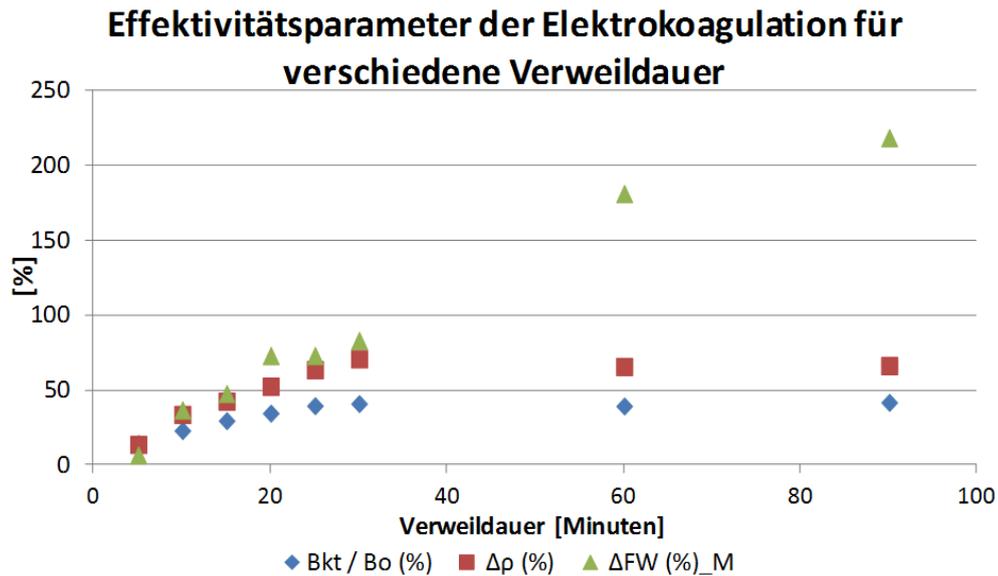


Abbildung 6.47: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Verweildauer

auf die Verringerung der Dichte erreicht die Elektrokoagulation nach 30 Minuten den maximalen Wert (ca. 70%).

Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen zeigt die **Verringerung der Stabilität der Restsuspension** ganz andere Tendenzen. Dieser Parameter zeigt eine lineare Steigerung bis zur Verweildauer 60 Minuten. Ab diesem Punkt ist die Steigerung nicht mehr komplett linear. Die Elektrokoagulation nach 90 min zeigt eine Verringerung der Stabilität der Restsuspension von über 200 %. Das bedeutet, dass die Filtratwasserabgabe der Restsuspension nach dem Filterpresseversuch die von der frischen Suspension gegenüber beträgt.

Fazit

Die Verweildauer der Elektrokoagulation spielt im untersuchten Bereich von 5 bis zum 30 Minuten eine große Rolle auf den Erhöhung der Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit sowie auf die Effektivitätsparameter. Die Zunahme aller drei physikalischen Parameter ist zwar relevant, aber die Endwerte ergeben kein Umweltproblem, wenn die Restsuspension entsorgt oder in die ursprüngliche Quelle eingeleitet wird.

Die Verweildauer hat zwar einen großen Einfluss auf die Effektivitätsparameter, aber die Steigerung der Parameter im Laufe der Reaktion sind nicht immer linear. Von starker zu leichter Zunahme werden die Effektivitätsparameter so geordnet: Verringerung der Stabilität der Restsuspension, Verringerung der Dichte und prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit. Die Elektrokoagulation nach 25-30 Minuten erreicht unter diesen Bedingungen die maximalen Werte für die Effektivitätsparameter ($B_{kt}\%$ und $\Delta\rho\%$: 40 % bzw. 70 %).

Die Verringerung der Stabilität der Restsuspension stagniert sich nicht im untersuchten Bereich (5 bis 90 min).

Die Ergebnisse zeigen 25-30 Minuten als optimale Verweildauer der Elektrokoagulation von Bentonitsuspension bzgl. der Trennung von Bentonit und der Verringerung der Dichte. Wenn die Hauptaufgabe der Elektrokoagulation nur die Destabilisierung der Suspension wäre, könnte eine längere Verweildauer berücksichtigt werden. Hier ist der Einfluss der Verweildauer auf den Energieverbrauch zu betrachten: je länger die Reaktion, desto höher der Energieverbrauch.

6.2.4 Zusammenfassung

Der Einfluss der Betriebsart auf die Elektrokoagulation wird hinsichtlich des Strömungszustands in der Zelle sowie die Mechanismen zur Reinigung der Elektroden untersucht.

Die kontinuierliche, turbulente bzw. laminare Strömung wird durch die Versuche KTZR (Zelle A und Rührer), KTSP (Zelle A und Pumpe) und „laminare Strömung“ (Zelle C mit Pumpe) untersucht.

Um den Einfluss der kontinuierlichen Strömung auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen, werden die Versuche mit kontinuierlicher Strömung mit denen im Ruhezustand verglichen.

Verglichen mit dem Ruhezustand führt lediglich die Versuchsreihe KTZR zu einer höheren Effektivität der Elektrokoagulation. Dies ist ausschließlich bei einem Elektrodenabstand von 1,5 cm der Fall. KTZR erzielt ebenfalls niedrigere Spannungswerte gegenüber dem Ruhezustand.

Im Gegensatz dazu führt die Versuchsreihe KTSP zu keiner Verbesserung der Leistung der Elektrokoagulation.

Eine laminare Strömung führt offensichtlich zu einer Erhöhung der Effektivität der Elektrokoagulation hinsichtlich aller drei Effektivitätsparameter. Die besten Ergebnisse liefern die Versuche unter kontinuierlicher laminarer Strömung mit Durchflussraten von 5 bis 6 l/min. Der laminare Strömungszustand wird daher bevorzugt.

Zwei Mechanismen zur Vermeidung der Anlagerung des Bentonits an der Elektrodenoberfläche werden untersucht. Bei den Mechanismen handelt es sich um mechanische bzw. elektrische Reinigung.

Die Integration von mechanischer Reinigung durch ein Reinigungs- (R) und/oder Filtrationssystem (R-BE) in die Elektrokoagulationszelle sowie die Berücksichtigung einer Verbindung mehrerer Zellen (R-BE-AW) können, im Vergleich zu einer einfachen Zelle, zu einer höheren Leistung der Elektrokoagulation führen. Die Zeitintervalle der Reinigung spielen bei der Verbesserung der Elektrokoagulationsleistung eine große Rolle. Die Ergebnisse zeigen generell, dass je häufiger die Anode gereinigt wird, ein Anstieg der Effektivitätsparameter zu verzeichnen ist und demnach die Leistung der Elektrokoagulation steigt.

Aus den Ergebnissen der Versuche mit elektrischer Reinigung der Elektroden geht hervor, dass die Polaritätsumschaltung als elektrische Reinigung der Elektroden dienen kann. Das Zeitintervall der Polaritätsumschaltung spielt bei der Reinigung und der Effektivität der Elektrokoagulation eine große Rolle.

Die Ergebnisse zeigen, dass die drei Ziele unterschiedlichen optimalen Zeitintervallen zeigen:

- Effektivität der Elektrokoagulation ergibt ein optimales Zeitintervall von 600 - 900 s
- Effektivität der Reinigung ergibt ein optimales Zeitintervall von 60 - 120 s

Da die optimalen Zeitintervalle nicht gleich sind, muss man die Priorität entweder auf die Effektivität der Elektrokoagulation oder auf die Reinigung der Elektroden setzen.

Die Matrix Best-Combination fasst die besten Ergebnisse der Versuchsreihe zum Aufbau und zur Betriebsart sowie ihre Parameter zusammen.

6.3 Zwischenergebnisse: Best-Combination-Matrix

In der Best-Combination Matrix (Abb. 6.48, 6.49 und 6.50) sind die besten Ergebnisse zur Effektivität der Elektrokoagulation zusammengefasst. Diese Matrix berücksichtigt die folgenden Versuchsreihen:

- Aufbau
 - EMAS-A
 - EMAS-B
 - Anzahl an Elektroden (Monopolar-Elektroden)
- Betriebsart
 - KTSR
 - KTSP
 - Laminare Strömung
 - Mechanische Reinigung
 - Elektrische Reinigung

Die Versuchsreihe Verweildauer wird in der Best-Combination nicht berücksichtigt.

Versuchsreihe	Code	B_{kt} %	Bandbreite B_{kt} %	$\Delta\rho$ %	Bandbreite $\Delta\rho$ %	ΔFW %	Bandbreite ΔFW %
Mech. Reinigung	B_R05_BE_	51,00	> 47%	88,64	> 81,8 %	83,64	48-155%
Mech. Reinigung	B_R10_BE_	49,00		81,82		80,91	
Mech. Reinigung	B_R10_BE_AW	47,80		81,82		80,91	
Mech. Reinigung	B_R05_BE_AW	47,80		82,22		95,45	
EMAS -B	2A_Stahl_6,5cm	45,20	42-45 %	54,18	44-54 %	48,18	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_1,5cm_P	45,00		48,08		155,45	
Monoplar-E.	B_2EP_1A_2,5cm_P	44,20		47,73		66,36	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_2,5cm_P	43,80		61,36		128,18	
Monoplar-E.	B_2EP_1A_1,5cm_P	43,00		46,81		82,73	
Laminare Str.	C_2A_LS4,2	42,93		44,00		73,64	

Abbildung 6.48: Best-Combination Matrix für den Parameter B_{kt} %.

Die Best-Combination Matrix 6.48 präsentiert die besten Ergebnisse des Parameters B_{kt} %. Um diesen Parameter zu maximieren, wird Zelle B mit mechanischer Reinigung der Anode (B_{kt} % > 47,8) bevorzugt. Weitere Modalitäten der Betriebsart, wie der Einsatz von Monopolar-Elektroden mit Parallelschaltung, erzielen Werte für B_{kt} % im Bereich von 43 - 45 %. Hier ist es zu berücksichtigen, dass der Versuch mit laminarer Strömung von 4,2 l/min in den Top-Ten der besten Ergebnisse für B_{kt} % liegt.

Die Best-Combination Matrix 6.49 zeigt die besten Ergebnisse des Parameters $\Delta\rho$ %. Um diesen Parameter zu maximieren, wird Zelle B mit mechanischer Reinigung der Anode ($\Delta\rho$ % > 81,8) bevorzugt. Weitere Modalitäten, wie der Einsatz von elektrischer Reinigung mit Zeitintervallen von 600 und 900 s, der Einsatz von Monopolar-Elektroden mit Parallelschaltung sowie einer laminaren Strömung erzielen Werte für $\Delta\rho$ % im Bereich von 58 - 70 %. Hier wird betont, dass der Versuch 2A-Stahl-2,5 cm vom EMAS-A in den Top-Ten der besten Ergebnissen für $\Delta\rho$ % liegt.

Versuchsreihe	Code	B _{kt} %	Bandbreite B _{kt} %	Δρ %	Bandbreite Δρ %	ΔFW %	Bandbreite ΔFW %
Mech. Reinigung	B_R05_BE_	51,00	>47%	88,64	> 81,8%	83,64	49-128%
Mech. Reinigung	B_R05_BE_AW	47,80		82,22		95,45	
Mech. Reinigung	B_R10_BE_	49,00		81,82		80,91	
Mech. Reinigung	B_R10_BE_AW	47,80	81,82	80,91			
Elek. Reinigung	600	30,27	21-43%	70,83	58-70%	84,55	
Elek. Reinigung	900	34,90		65,31		60,91	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_2,5cm_P	43,80		61,36		128,18	
EMAS -A	2A_AI_2,5cm	31,20		60,95		52,62	
Elek. Reinigung	120	21,40		59,18		49,09	
Laminare Str.	C_2A_RZc	40,80		58,49		82,73	

Abbildung 6.49: Best-Combination Matrix für den Parameter Δρ%

Versuchsreihe	Code	B _{kt} %	Bandbreite B _{kt} %	Δρ %	Bandbreite Δρ %	ΔFW %	Bandbreite ΔFW %
Monoplar-E.	B_2EP_2A_2,5cm_S	38,00	33-51%	56,25	48-88%	188,18	> 128%
Monoplar-E.	B_2EP_2A_1,5cm_P	45,00		48,08		155,45	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_2,5cm_P	43,80		61,36		128,18	
Laminare Str.	C_2A_RZd	40,00		56,00		96,36	
Mech. Reinigung	B_R05_BE_AW	47,80		82,22		95,45	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_1,5cm_S	38,80		58,14		93,64	
Laminare Str.	C_2A_RZb	38,60		53,33		93,64	
Monoplar-E.	B_2EP_2A_2,5cm_S	42,20		54,72		84,55	
Elek. Reinigung	600	30,27		70,83		84,55	
Mech. Reinigung	B_R05_BE_	51,00		88,64		83,64	

Abbildung 6.50: Best-Combination Matrix für den Parameter ΔFW%

Die Best-Combination Matrix 6.50 zeigt die besten Ergebnisse des Parameters ΔFW%. Um diesen Parameter zu maximieren, wird Zelle B mit Monopolar-Elektroden (ΔFW% > 128) bevorzugt. Weitere Modalitäten, wie der Einsatz von elektrischer und mechanischer Reinigung mit Zelle B und die Elektrokoagulation im Ruhezustand mit Zelle C erzielen Werte für ΔFW% im Bereich von 83-96 %.

6.4 Einfluss der Wetterbedingungen

Ziel des Forschungsprojekts ist, die Elektrokoagulation als Trennmethode für gebrauchte Bentonitsuspensionen anzuwenden. Die Elektrokoagulation sollte danach in die aktuelle Separationsanlage integriert werden. Diese wird üblicherweise am Baustellengelände aufgebaut. Unter Berücksichtigung der Bedingungen auf dem Baustellengelände stellt sich die Frage, ob diese Bedingungen den Prozess der Elektrokoagulation beeinflussen. Die Anlage kann unter kritischen meteorologischen Bedingungen, z.B bei sehr niedrigen Temperaturen, betrieben werden.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: System- und Suspensionstemperatur		
	Elektrokoagulation: Best-Combinations		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm^2]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-
Suspensionsparameter	Bentonittyp	[-]	W
	Konzentration	[%]	2,5
	Aufladungstyp	[-]	-
	Aufladungskonzentration	[g/l Susp.]	-
	Temperatur	[°C]	5, 10, 15

Tabelle 6.14: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe System- und Suspensionstemperatur

Diese Versuchsreihe hat das Ziel, den Einfluss der Wetterbedingungen auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen. Als kritischer Faktor der Wetterbedingungen wird die Temperatur angenommen. Die Baustellentemperatur wird simuliert, indem die System- und die Suspensionstemperatur variiert wird. Die Temperaturen werden mithilfe einer Kühlkammer geschaffen. Die ganze Elektrokoagulationsapparatur wird in der Kühlkammer gebaut. In ihr wird die Suspension 24 Stunden quellen gelassen und nach der Quellzeit die Elektrokoagulation durchgeführt. Die Kühlkammer gehört zum Lehrstuhl für Baustofftechnik von der Ruhr-Universität Bochum und stand unserem Team für kurze Zeit zur Verfügung.

Das Versuchsprogramm umfasst 6 Elektrokoagulationstest in der Kühlkammer. Die Temperatur der Kühlkammer wird auf 5, 10 und 15 °C (Systemtemperatur) eingestellt. Für jeden Versuch wird ebenfalls die Suspensionstemperatur am Versuchsanfang gemessen. Im Folgenden werden die Versuche mit den entsprechenden System- und Suspensionstemperatur vorgestellt.

- 2 Versuche in der Kühlkammer unter 5 °C . Suspensionstemperatur: 4,6-9,3 °C
- 2 Versuche in der Kühlkammer unter 10 °C. Suspensionstemperatur: 11,8-15,7 °C
- 2 Versuche in der Kühlkammer unter 15 °C. Suspensionstemperatur: 16,5-20,2 °C

Die Ergebnisse der Elektrokoagulation unter normalen Bedingungen im TLB Labor (20-22 °C) werden mit den in der Kühlkammer geführten Versuchen verglichen. Die Parameter der Elektrokoagulation werden in der Tabelle 6.14 dargestellt. Der Elektrokoagulationsversuch kommt aus der Best-Combination (B-2A-Al-6,5cm).

Folgende Aspekte werden analysiert:

- Wirkung der Temperatur auf die elektrischen Parameter
- Wirkung der Temperatur auf die Effektivität der Elektrokoagulation

Spannungs- und Stromverläufe

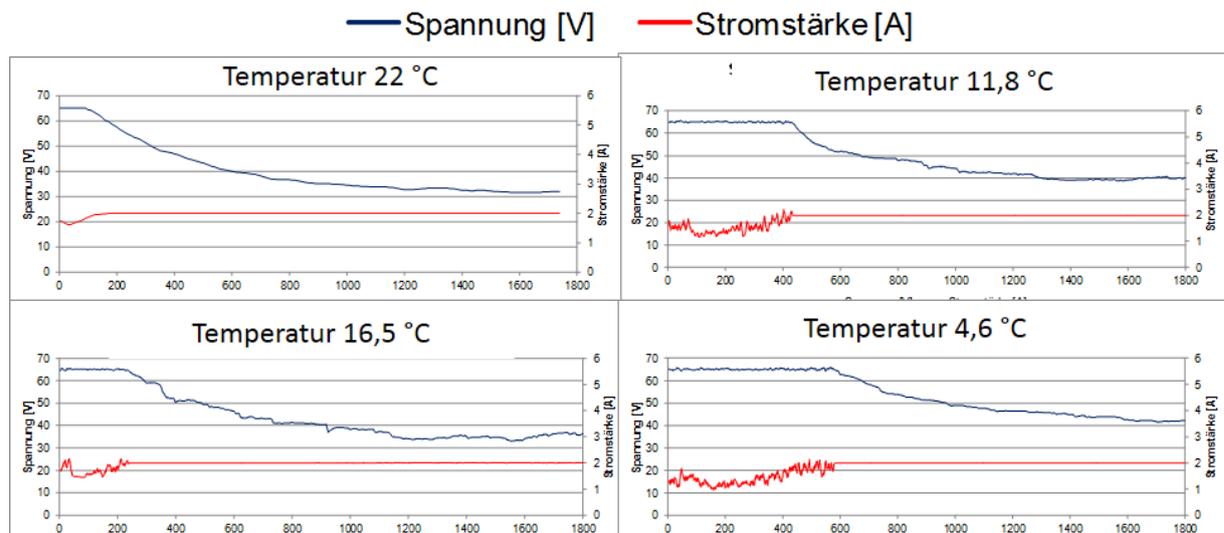


Abbildung 6.51: Spannungsverläufe der Elektrokoagulation für verschiedene System- und Suspensionstemperatur

Die Spannungs- und Stromprofile werden mithilfe der Abbildung 6.51 analysiert. Die Abbildung besteht aus 4 Diagrammen. Jedes Diagramm stellt die Profile der Spannung (blaue Linie) und der Stromstärke (rote Linie) bei der Elektrokoagulation unter einer bestimmten Temperatur dar. Es werden die folgenden Untersuchungen dargestellt:

- Versuch im Labor unter Umgebungstemperatur (22 °C)
- Versuch in der Kühlkammer unter 15 °C . Suspensionstemperatur: 16,5 °C
- Versuch in der Kühlkammer unter 10 °C. Suspensionstemperatur: 11,8 °C
- Versuch in der Kühlkammer unter 5 °C. Suspensionstemperatur: 4,9 °C

In der Abbildung wird die Verweildauer in Sekunden auf der x-Achse, die Spannung in Volt auf der primären y-Achse und die Stromstärke in Ampere auf der sekundären y-Achse angegeben.

Zwei Effekte werden erkannt:

- Spannungsspitzen
- Erreichen der Stromstärke von 2 Ampere

Im Allgemeinen fängt die Reaktion mit der maximalen Spannung und einer Stromstärke kleiner als 2 Ampere an. Das Phänomen bezieht sich auf das erforderliche Überpotential, um die Schutzschicht der Aluminiumelektroden zu zerstören. Anschließend werden 2 Ampere erreicht und die Stromstärke bleibt konstant. Im Laufe der Verweildauer nimmt die Spannung ab.

Ein zu berücksichtigender Aspekt ist, wann das Erreichen der 2 Ampere statt findet. Dabei spielt die Temperatur eine große Rolle. Wenn die Temperatur niedrig ist, beträgt die Spannung längere Zeit den maximalen Wert von 65 V und die Stromstärke von 2 Ampere wird später erreicht. Während beim Versuch unter 22 °C 2 Ampere nach ca. 100 s erreicht werden, findet das Erreichen der 2 Ampere beim Versuch unter 4,6 °C nach ca. 5900 s statt. Niedrige Temperaturen üben einen negativen Einfluss auf die elektrische Leistung der Elektrokoagulation aus, da die Reaktion langsamer stattfindet.

Dieses Phänomen lässt sich mithilfe der Kollisionstheorie erklären. Diese Theorie beschäftigt sich mit der mechanischen Beschreibung des Ablaufes von chemischen Reaktionen und Elektrodenprozessen. Die Kollisionen zwischen Teilchen besorgen Energie. Ab einer bestimmten Menge an Energie fängt die Reaktion an. Ein anderer Aspekt ist die Quote von Kollisionen in einem bestimmten Zeitraum (Reaktionsgeschwindigkeit): je mehr erfolgreiche Kollisionen, desto schneller die Reaktion. Die Temperatur spielt bei der Reaktionsgeschwindigkeit eine große Rolle. Die Temperatur beeinflusst positiv die Teilchenbewegung. In ähnlicher Weise besorgen niedrige Temperaturen weniger Teilchenbewegung. Je niedriger die Temperatur, desto weniger Teilchenbewegung, weniger erfolgreiche Kollisionen und niedriger Reaktionsgeschwindigkeit.

Beim galvanischen Prinzip arbeitet die Elektrokoagulation mit einer festen Stromstärke (2 Ampere). Bei niedrigen Temperaturen bedeuten 2 Ampere eine zu hohe Reaktionsgeschwindigkeit. Das elektrochemische System reagiert mit einer Erhöhung der Spannung. Wenn die maximale Spannung des Netzgeräts (65 V) erreicht wird, reagiert das System mit einer Verringerung der Stromstärke. Aus diesem Grund werden 2 Ampere später erreicht, wenn die Temperatur niedriger ist. Dies hat zur Folge, dass die Elektrokoagulation unter niedrigen Temperaturen langsamer stattfindet und mit galvanischem Prinzip schwer durchzuführen ist.

Effektivitätsparameter

Die Abbildung 6.52 stellt die Ergebnisse zur Effektivität der Elektrokoagulation dar. Auf der x-Achse wird die Suspensionstemperatur in [°C] und auf der y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben.

Die Temperatur übt einen positiven Einfluss auf den **prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit** aus. Das Verhältnis zwischen Temperatur und diesem Parameter ist linear. Unter 15 °C beträgt der prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit unter 40%. Diese Tendenz bedeutet, dass bei der Elektrokoagulation unter niedriger Temperatur weniger Bentonit koaguliert und getrennt werden kann.

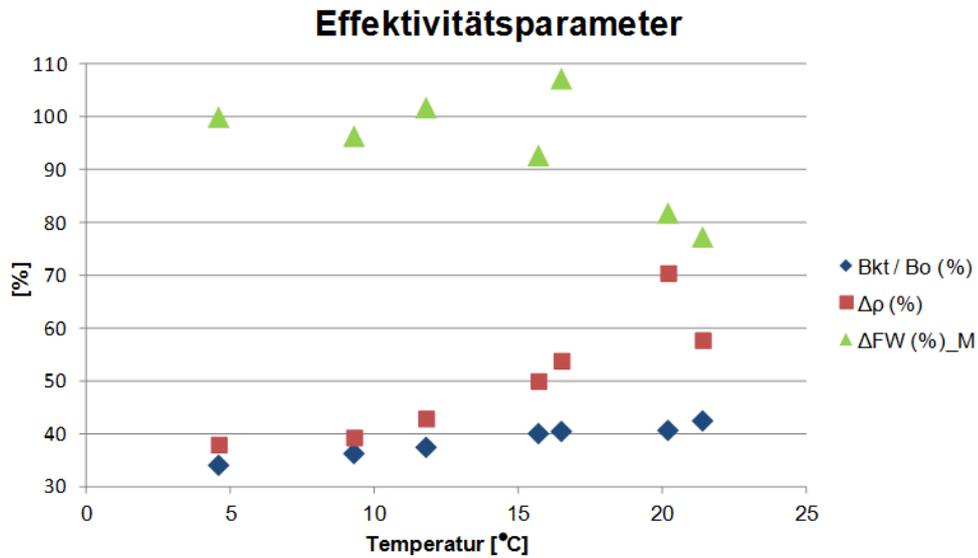


Abbildung 6.52: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: System- und Suspensionstemperatur

Der Parameter **Verringerung der Dichte der Restsuspension** folgt einer ähnlichen Tendenz. Dieser Parameter nimmt bei niedriger Temperatur ab. Unter 15 °C beträgt die Verringerung der Dichte unter 45% und unter 10 °C beträgt die Verringerung der Dichte unter 40%.

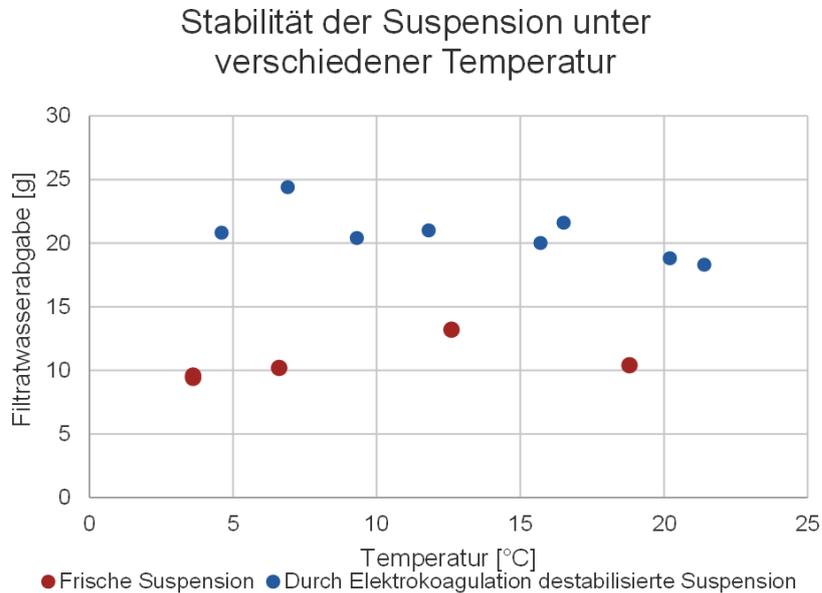


Abbildung 6.53: Stabilität der Suspension, Versuchsreihe: System- und Suspensionstemperatur

Im Vergleich dazu üben niedrige Temperaturen einen positiven Einfluss auf die Destabilisierung der Bentonitsuspension. Die **Verringerung der Stabilität** der Restsuspension nimmt mit zunehmender Temperatur ab, d.h. bei niedriger Temperatur wird die Suspension durch die Elektrokoagulation instabiler als bei höheren Temperaturen. Werte über 100% treten bei den Versuchen unter 11,8 und 16,5 °C auf. Die absoluten Werte der Filtratwasserabgabe aus der

Filterpresse werden in der Abbildung 6.53 dargestellt. Auf der x-Achse wird die Temperatur in °C und auf der y-Achse wird die Masse der Filtratwasserabgabe in g angegeben. Zwei Datenreihen werden in der Abbildung dargestellt: die Stabilität der frischen Suspension und die Stabilität der durch Elektrokoagulation destabilisierten Suspension. Die Ergebnisse zur Stabilität der frischen Suspension zeigen, dass die Filtratwasserabgabe mit wechselnder Temperatur keine erhebliche Änderung ergibt. Im Gegensatz dazu lässt sich eine Tendenz bei den Ergebnissen der Stabilität der durch Elektrokoagulation destabilisierten Suspension erkennen. Mit abnehmender Temperatur steigt die Masse der Filtratwasserabgabe leicht.

Fazit

Die Wetterbedingungen auf der Baustelle, wo die Separationsanlage steht, können die elektrische Leistung und die Effektivität der Elektrokoagulation beeinflussen. Als kritischer Faktor der Wetterbedingungen auf der Baustelle wird die Temperatur angenommen.

Bei niedrigen Temperaturen sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit. Dies hat zur Folge, dass eine Stromstärke von 2 Ampere nicht innerhalb der ersten 2 Minuten erreicht wird. Zum Beispiel werden 2 Ampere beim Versuch unter 4,6 °C nach 5900 s. Dieses Phänomen erschwert die Elektrokoagulation unter galvanischem Prinzip, wobei die Stromstärke konstant gehalten werden soll.

Die niedrigen Temperaturen beeinflussen die drei Effektivitätsparameter unterschiedlich. Der prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit und die Verringerung der Dichte werden von den niedrigen Temperaturen negativ beeinflusst. D.h. je niedriger die Temperatur, desto weniger Bentonit koaguliert und weniger verringert sich die Dichte der Restsuspension. Im Gegensatz dazu üben die niedrigen Temperaturen einen positiven Einfluss auf die Destabilisierung der Suspension aus, d.h. mit abnehmender Temperatur steigt leicht die Masse der Filtratwasserabgabe.

Es lässt sich zusammenfassen, dass insbesondere die winterlichen Wetterbedingungen auf der Baustelle auf die elektrische Leistung und die Effektivität der Elektrokoagulation einwirken. Die niedrigen Temperaturen sind nur bei der Destabilisierung der Suspension vorteilhaft.

6.5 Einfluss der Eigenschaften der Bentonitsuspension

Die Einflüsse der Eigenschaften auf die Elektrokoagulation der Bentonitsuspension werden anschließend bestimmt. Dafür werden die folgende Parameter in den folgenden Bandbreiten untersucht:

- Bentonittyp: W und S-130
- Suspensionskonzentration: W 2,5-4,0 % und S-130 8,5%
- Aufladung: Labor und Baustelle

Eine aufgeladene Bentonitsuspension bezieht sich auf eine gebrauchte Bentonitsuspension bestehend aus der selben Suspension und aus abgebautem Boden. Gebrauchte Bentonitsuspension wird im Labor simuliert, indem Suspension W 2,5 % mit 200 g/l Sand, Schluff oder Ton aufgeladen wird. Echte Proben von gebrauchten Bentonitsuspensionen werden ebenfalls untersucht.

Insgesamt werden die folgenden Versuchsreihe durchgeführt:

- Konzentration der Suspension mit Bentonit W

- Aufladung aus dem Labor
- Aufladung aus der Baustelle

Die Parameter der Elektrokoagulation beziehen sich auf die Best-Combinations. Die folgenden Versuche und Elektrokoagulationsparameter werden angewendet:

- Zelle B, Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand, Al-2A-6,5cm
- Zelle B, Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand, Al-2A-6,5cm, 4 Monopolar-Elektroden mit Parallelschaltung
- Zelle B, Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand, Al-2A-6,5cm, mecanische Reinigung der Anode R05-BE

6.5.1 Konzentration von Bentonit W

In den vorherigen Versuchsreihen wird Bentonitsuspension W 2,5% verwendet. In dieser Versuchsreihe wird die Konzentration der Suspension mit dem Bentonit W untersucht. Ziel ist, der Einfluss der Konzentration der Suspension auf die Effektivität der Elektrokoagulation zu bestimmen.

Die zu untersuchenden Konzentrationen sind die Folgenden: 2,5 bis 4,0 %. Die Tabelle 6.15 stellt die Parameter der Elektrokoagulation dieser Versuchsreihe dar.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Konzentration der Suspension		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	B_{kt} einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-
Suspensionsparameter	Bentonittyp	[-]	W
	Konzentration	[%]	2,5 bis 4,0
	Aufladungstyp	[-]	-
	Aufladungskonzentration	[g/l Susp.]	-
	Temperatur	[-]	Umgebungstemperatur

Tabelle 6.15: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Konzentration der Suspension

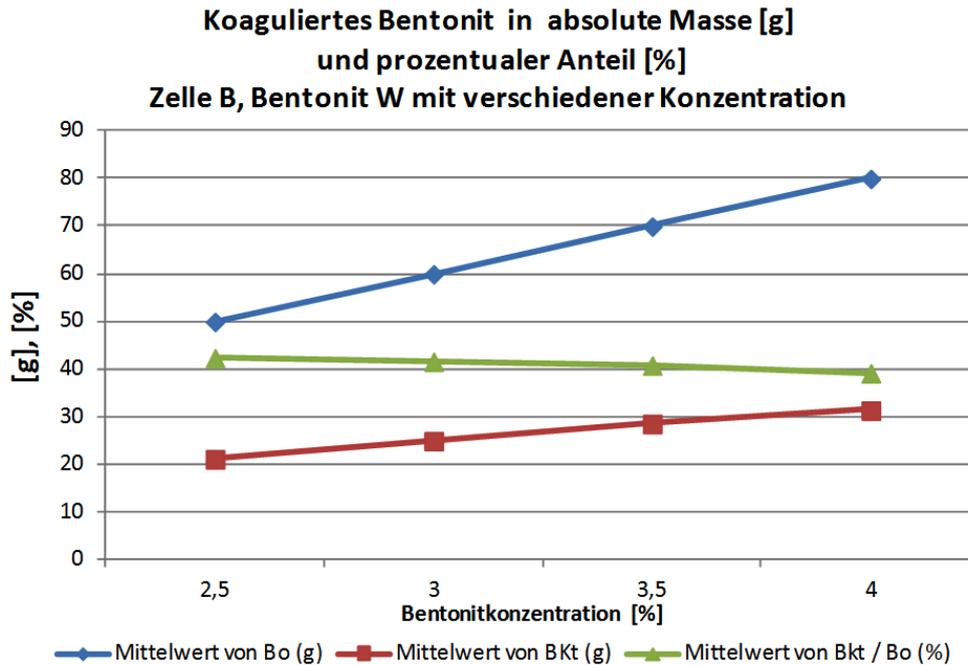


Abbildung 6.54: Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Konzentration

Anschließend werden die Ergebnisse der Elektrokoagulation vorgestellt. Dafür werden die folgenden Parameter analysiert:

- B_0 und B_{kt} in g
- B_{kt} in %
- $\Delta\rho$ und ΔFW in %

Effektivitätsparameter

In der Abbildung 6.54 geht es um das koagulierte Bentonit. Dieser Parameter wird in Prozent ($B_{kt}\%$) bzgl. der Trockensubstanz der Suspension vor der Elektrokoagulation (B_0) in g und in absoluter Masse (B_{kt}) in g dargestellt. Die absolute Masse der Trockensubstanz wird außerdem dargestellt. Auf der x-Achse wird die Konzentration der Suspension in % und auf der y-Achse werden alle drei Parameter B_0 , B_{kt} in g und $B_{kt}\%$ angegeben. Die blaue Markierung bezieht sich auf die Trockensubstanz von 2 Litern Suspension. Die Konzentration und die Trockensubstanz haben ein direktes Verhältnis. Daher nimmt die Konzentration mit zunehmender Konzentration linear zu. Die roten und grünen Markierungen stellen die Masse an koaguliertem Bentonit bzw. den prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit dar. Während die Masse an koaguliertem Bentonit mit zunehmender Konzentration ansteigt, nimmt der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit ab. Hier ist zu erkennen, je höher die Trockensubstanz ist, desto größer ist die Masse an koaguliertem Bentonit. Das Verhältnis zwischen den zwei Parametern ist aber nicht linear, da der prozentuale Anteil nicht konstant bleibt. Der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit bleibt in der Bandbreite ca. 40%, nimmt jedoch leicht mit zunehmender Konzentration ab.

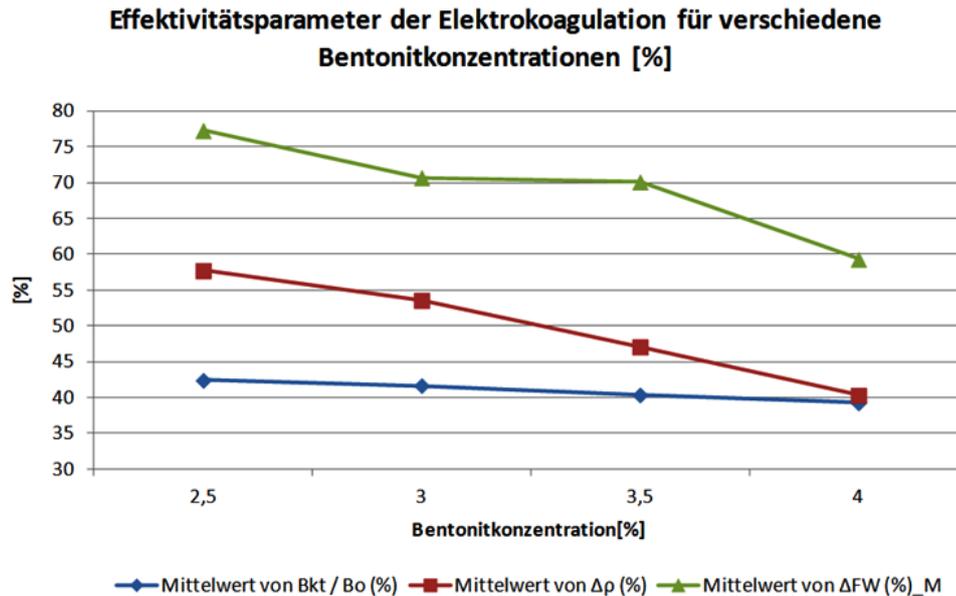


Abbildung 6.55: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Konzentration

Die Abbildung 6.55 stellt alle drei Haupteffektivitätsparameter dar: B_{kt} %, Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension. Ähnlicherweise wird die Konzentration in % auf der x-Achse und die Effektivitätsparameter auf der y-Achse in % angegeben. Die Parameter Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension folgen der gleichen Tendenz: sie sinken mit zunehmender Konzentration der Suspension. Ein Anstieg der Konzentration von 1,5% ergibt eine Abnahme von ca. 17 % des Parameters Verringerung der Dichte der Restsuspension bzw. von ca. 19% des Parameters der Verringerung der Stabilität der Restsuspension.

Fazit

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass hochkonzentrierte Suspensionen eine vergleichbare Effektivität der Elektrokoagulation bzgl. des prozentualen Anteils an koagulierte Bentonit zeigen, obwohl die absolute Masse an koagulierte Bentonit mit zunehmender Konzentration ansteigt. Die Tendenz zur Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension ist anders. Beide Parameter sinken mit zunehmender Konzentration der Suspension.

6.5.2 Aufladung aus dem Labor

Im Labor aufgeladene Bentonitsuspension simuliert die gebrauchte Bentonitsuspension und wird in dieser Versuchsreihe durch Elektrokoagulation untersucht. Ziel ist, die Eignung der Elektrokoagulation als Trennmethode für gebrauchte Bentonitsuspensionen zu untersuchen.

Um diese Suspension im Labor zu simulieren, wird die Bentonitsuspension W 2,5 % mit den unterschiedlichen Materialien Sand, Schluff und Ton aufgeladen.

- Der Sand SILIGRAN von der Firma Euroquarz zählt als Aufladung. SILIGRAN wird als Quarzkies gezeichnet und hat die folgenden Korngrößenverteilung: 0,063 - 0,25 mm.
- Der Schluff kommt aus einer Probenentnahme in Haufwerk Lottental in Bochum. Die Probenentnahme wurde am 11.10.2010 geführt und bisher im Labor vom Lehrstuhl für

Grundbau der Ruhr-Universität Bochum gelagert. Der Ton besteht aus Kaolin M von der Firma ERBSLÖH.

- Kaolin ist ein aus natürlichen Roh-tonen gemalenes und getrocknetes Gestein. Die Abbildung 6.58 stellt die drei Aufladungen Sand, Schluff und Kaolin dar. Weitere Eigenschaften aller drei Materialien befinden sich im Anhang.

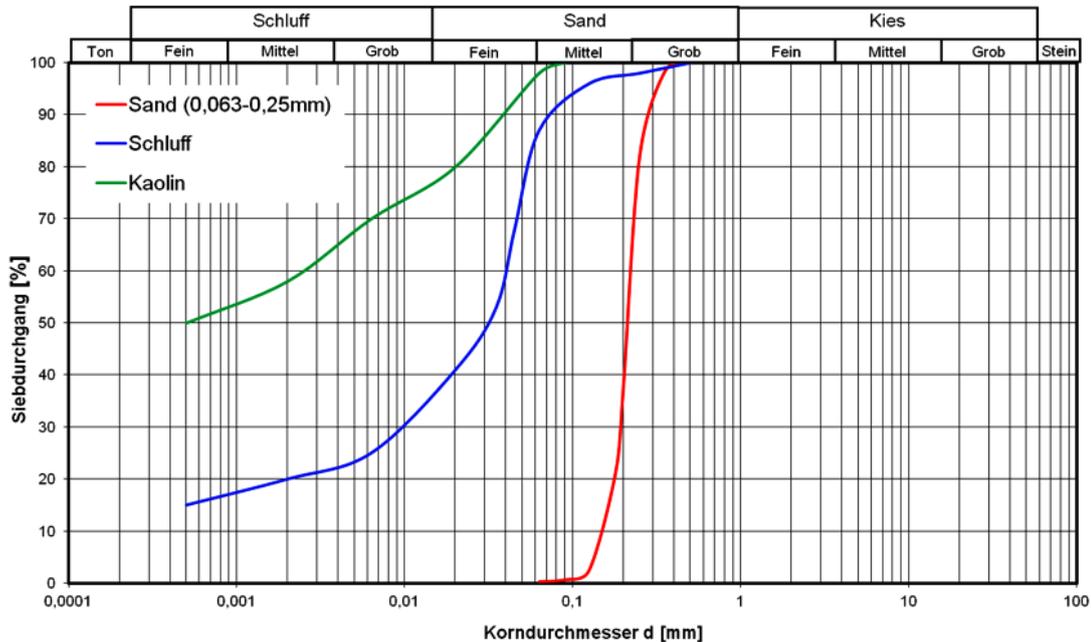


Abbildung 6.56: Korngröße der Aufladung (Sand, Schluff und Kaolin)

Die Abbildung 6.56 liefert Information über die Korngrößenverteilung der drei Materialien. Aus der Abbildung geht hervor, dass das Material SILIGRAN zum Kies- und Sandbereich gehört. Es kann festgestellt werden, dass SILIGRAN 0,063 - 0,25 mm ein Grobsand ist. Die nächste Aufladung je nach Korngröße ist der Schluff. Das Kaolin liegt links im Korngrößenverteilungsdiagramm und ist am feinsten.

Die Konzentration der Aufladung ist konstant für jedes Material: eine Konzentration von 200 g/l Suspension wird angewendet. D.h. es werden 3 unterschiedliche aufgeladene Suspensionen gemischt. Jede Konzentration für einen Versuch.

- Suspension W 2,5% plus 200 g/l Sand
- Suspension W 2,5% plus 200 g/l Schluff
- Suspension W 2,5% plus 200 g/l Ton-Kaolin

Die Mischung erfolgt mithilfe eines Rührers für Dispersionen unter 2000 Umdrehung pro Minute. Die Rührzeit beträgt 5 Minuten. Unabhängig von der Aufladung entsteht eine sehr homogene Mischung, wobei die Suspension nicht entmischt und die Bodenpartikel in Suspension bleiben und nicht sedimentieren. Die Abbildung 6.57 zeigt die Mischungen in Messzylindern. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Mischung sehr stabil und homogen ist. Da die drei Mischungen die gleiche Konzentration von Aufladung enthalten, ist ihre Dichte sehr ähnlich, ca. $1,120 \text{ g/cm}^3$.



Abbildung 6.57: Aufgeladene Suspension im Labor

Die Elektrokoagulation wird mit den Parametern in der Tabelle 6.16 durchgeführt. Zusätzlich wird die Effektivität der Elektrokoagulation je nach Aufladung bestimmt und mit der Effektivität der Elektrokoagulation der Bentonitsuspension W 2,5 % ohne Aufladung verglichen.

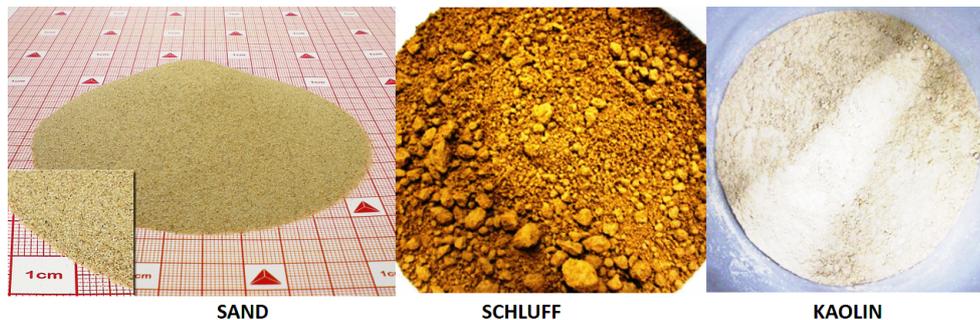


Abbildung 6.58: Aufladungsmaterial: Sand, Schluff und Kaolin

Nach der Elektrokoagulation werden die Effektivitätsparameter bestimmt.

Effektivitätsparameter

Die Abbildung 6.59 stellt die Ergebnisse der Elektrokoagulation dar. Auf der x-Achse werden die unterschiedlichen Versuche angegeben, zuerst die Referenz (W 2,5% ohne Aufladung) und im folgenden die drei Versuche mit Sand, Kaolin bzw. Schluff. Auf die y-Achse werden die Effektivitätsparameter in % angegeben. Beim Parameter Prozentualer Anteil an koagulierte Bentonit muss berücksichtigt werden, dass das getrennte Material nicht nur Bentonit, sondern

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Aufladung aus dem Labor		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-
Suspensionsparameter	Bentonittyp	[-]	W
	Konzentration	[%]	2,5
	Aufladungstyp	[-]	Sand, Schluff und Kaolin
	Aufladungskonzentration	[g/l Susp.]	200
	Temperatur	[-]	Umgebungstemperatur

Tabelle 6.16: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Aufladung aus dem Labor

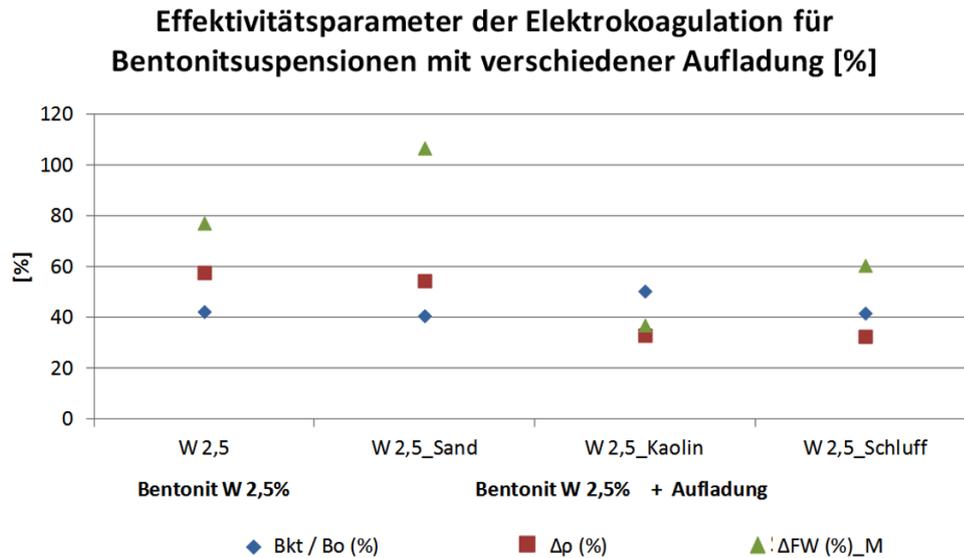


Abbildung 6.59: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Aufladung aus dem Labor

Bentonit und Aufladung ist. Der **prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit** beträgt ca. 40% für den Referenzversuch, die Werte dieses Parameter bleiben in dieser Bandbreite für die Versuche mit Aufladung aus Sand und Schluff. Beim Versuche mit Aufladung aus Kaolin steigt sich der Parameter bis zum ca. 50%.

Der Parameter **Verringerung der Dichte** der Restsuspension dagegen erfolgt in dem Fall von Versuchen mit Aufladung unabhängig von der Aufladung eine Senkung. Der Referenzwert zeigt eine Verringerung der Dichte von ca. 58%. Dagegen beträgt dieser Parameter für die Versuche mit Aufladung einen niedrigeren Wert. Insbesondere ist der Wert bei den Versuchen mit Kaolin und Schluff niedrig (ca. 33%), was eine öffentliche Senkung der Effektivität hinsichtlich dieses Parameters feststellt.

Bei der **Verringerung der Stabilität** der Restsuspension ist die Tendenz je nach Aufladung ganz unterschiedlich. Der Versuch mit Aufladung aus Sand überschreitet das Referenzergebnis (ca. 78%) bis zum Erreichen von 100%. Dagegen beträgt die Verringerung der Stabilität bei den Versuchen mit Kaolin und Schluff unter 40% bzw. 60%.

Die Abbildung 6.60 stellt für jeden Versuch sowohl den prozentualen in % als auch den absoluten Anteil an koagulierte Bentonit in g dar. Bentonit* besteht aus Bentonit und Aufladung. Auf der Abbildung werden die verschiedenen Versuchen auf der x-Achse angegeben. Die primäre y-Achse zeigt den prozentualen Anteil in % und die sekundäre y-Achse den absoluten Anteil in g. Aus der Abbildung geht hervor, dass der absolute Anteil an koagulierte Bentonit bei den Versuchen mit Aufladung größer ist als der beim Referenzversuch. Durch die Elektrokoagulation von Bentonitsuspension mit Aufladung beträgt der absolute Anteil mehr als 150 g. Beim Versuch mit Kaolin wird ein absoluter Anteil von über 200 g erreicht. Bei der Analyse der Ergebnisse der $B_{kt}\%$ muss betont werden, dass der prozentuale Anteil an koagulierte Bentonit zwar ungefähr in der Bandbreite 40 - 50 % bleibt, aber der absolute Anteil an koagulierte Bentonit im Vergleich zum Referenzwert steigt.

Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die aufgeladene Suspension zwar geeignet

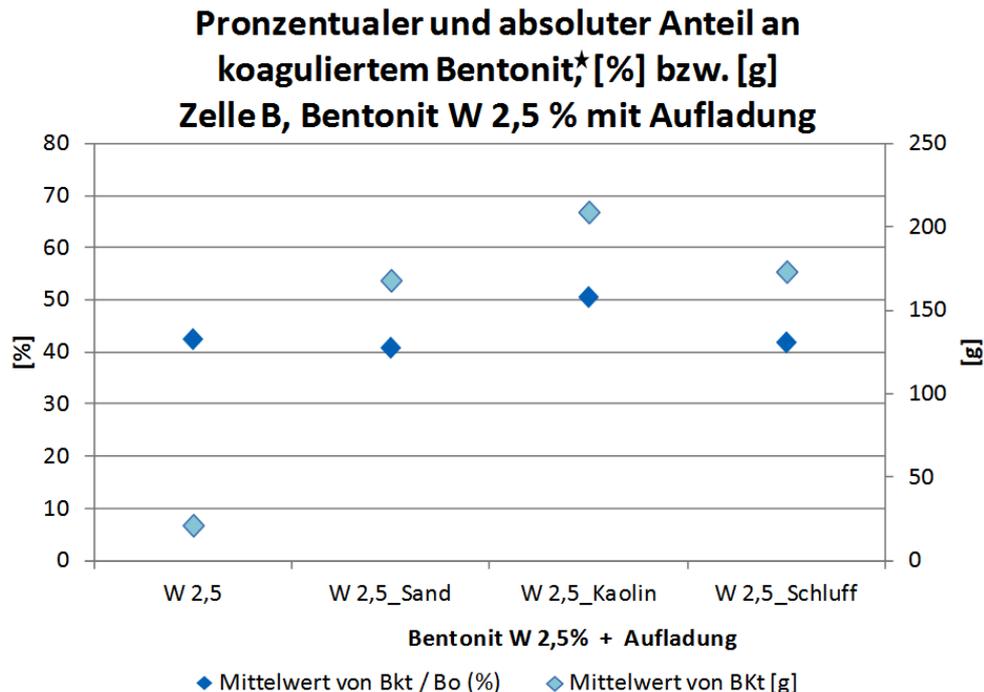


Abbildung 6.60: Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Aufladung aus dem Labor

für die Elektrokoagulation ist, je nach Natur der Aufladung die Effektivität jedoch größer oder kleiner als beim Referenzversuch ohne Aufladung ist. Hinsicht des prozentualen Anteils an koagulierte Bentonit ist die Elektrokoagulation genau so effektiv für frische wie für aufgeladene Suspension. Die Aufladung Kaolin verursacht sogar eine Erhöhung der Effektivität im Bezug auf diesen Parameter. Die Ergebnisse zum absoluten Anteil an koagulierte Bentonit zeigen, dass bei der Elektrokoagulation mit aufgeladener Suspension mehr Masse an Bentonit und Aufladung getrennt wird. Die Ergebnisse zur Verringerung der Dichte der Restsuspension ergeben, dass die Aufladung die Effektivität der Elektrokoagulation negativ beeinflusst. Eine ähnliche Tendenz ist bei den Ergebnissen zur Verringerung der Stabilität zu erkennen. In diesem Fall bildet der Versuch mit Sand eine Ausnahme: die Aufladung mit Sand verstärkt die Destabilisierung der Suspension, d.h. die Suspension mit Sand wird leichter instabil.

6.5.3 Aufladung aus der Tunnelbaustelle in Danzig, Polen

Der zweite Schritt zur Untersuchung aufgeladener Bentonitsuspension ist, Elektrokoagulation von echter gebrauchter Bentonitsuspension durchzuführen. Dafür hat der Kooperationspartner Herrenknecht AG die Probenentnahme von gebrauchter Bentonitsuspension aus der Tunnelbaustelle in Danzig organisiert. Die Probenentnahme fand am 11.07.2013 statt.

In der Tunnelbaustelle in Danzig (Polen) wird das Bentonit S 130 von der Hersteller EN-VIGEO (Slowakei) verwendet. Dieser ist ein weißliches Bentonit, dessen Suspension ebenfalls weißlich ist. Einige Eigenschaften werden im Produktblatt vorgestellt sowie im TLB-Labor bestimmt. Die Tabelle 6.17 stellt diese Eigenschaften dar. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Dichte direkt im Labor bestimmt wurde. Eine Suspension mit Bentonit S 130 und Konzentration 8,5% hat eine Dichte von $1,05 \text{ g/cm}^3$, die die Dichte im Produktblatt bestätigt.

Die Proben werden aus der Bentonitmischanlage und aus verschiedenen Stufen der Sepa-

Eigenschaften	aus dem Produktblatt	aus dem TLB-Labor
Konzentration [%]	-	≈8,5
Dichte [g/cm^3]	<1,10	1,05
Marsh Viskosität [s]	32-50	43
pH	9-11	9,77

Tabelle 6.17: Eigenschaften des Bentonits S-130

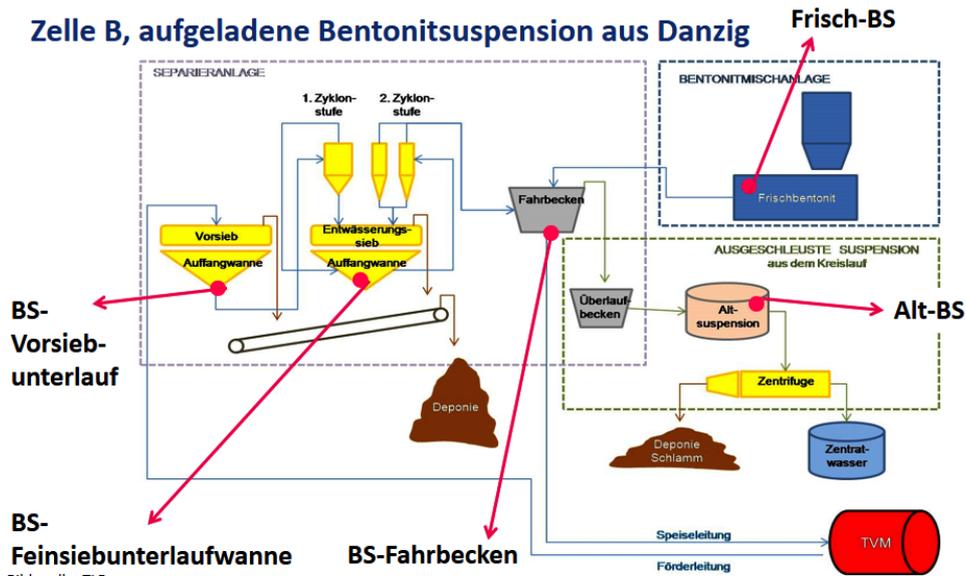


Abbildung 6.61: Probenentnahme von gebrauchter Bentonitsuspension aus der Separationsanlage, Danzig

rationsanlage entnommen. Die Abbildung 6.61 stellt diese Stufen dar, aus denen die Proben entnommen wurden.

- Die erste Probe wurde aus der Bentonitmischanlage entnommen. Diese ist die frische Bentonitsuspension (als frisch-BS gekennzeichnet), nach dem Mischen und vor die Anwendung zur Ortsbruststützung. Der Rest der Proben kommt aus der Separationsanlage.
- Die Probe BS-Vorsieb-Unterlauf wird aus dem Unterlauf des Vorsiebs entnommen. Diese Suspension wurde zur Ortsbruststützung verwendet und zurück zur Separationsanlage geführt. Nach der Fahrt durch das Vorsieb werden die groben Bodenpartikel der Aufladung entfernt und die gebrauchte Suspension kommt in die Unterlaufwanne.
- Eine weitere Probe BS-Feinsiebunterlaufwanne besteht aus der Suspension nach der Entfernung von feinen Partikel mittels der ersten Zykonenstufe.
- Die dritte Probe (als BS-Fahrbecken gekennzeichnet) aus der Separationsanlage wurde aus dem Fahrbecken entnommen. Die feinen Partikel wurden mittels der zweiten Zykonenstufe entfernt. Diese Suspension wird entweder zurück zum Bentonitkreislauf oder zur Feinseparation geführt.
- Die letzte Probe kommt aus dem Altsuspensionstank und wird als Alt-BS gekennzeichnet.

Im Folgenden wird die Trockensubstanz jeder Probe in g/l Suspension dargestellt. Im Bezug auf diese Trockensubstanz wird der Parameter „Prozentualer Anteil an koaguliertem Bentonit“ bestimmt. In dieser Versuchsreihe bezieht sich das „koagulierte Bentonit“ ebenfalls auf koaguliertes Bentonit plus koagulierte Aufladung.

- Frisch-BS: 85,2 g/l
- Vorsieb-BS: 153,6 g/l
- Feinsieb-BS: 177,6 g/l
- Farhbecken-BS: 152,2 g/l
- Alt-BS: 181 g/l

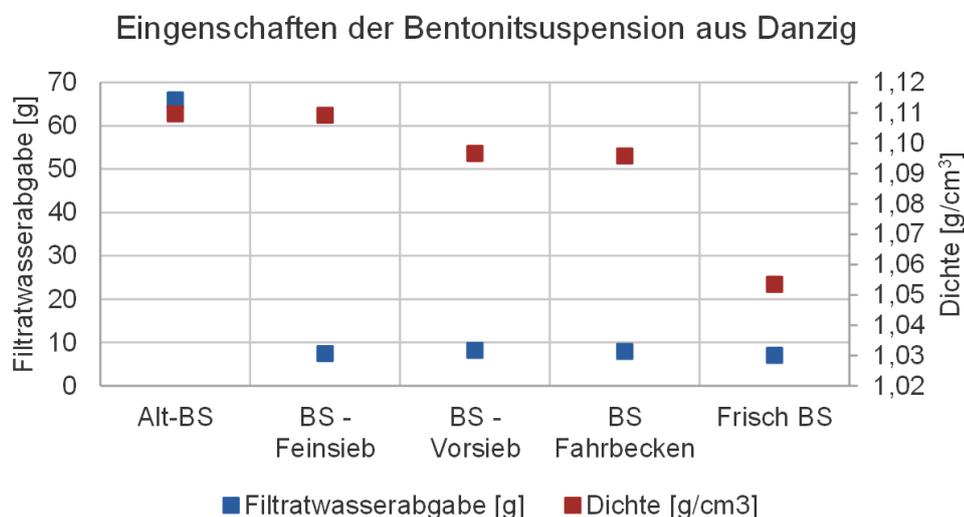


Abbildung 6.62: Eigenschaften der gebrauchten Bentonitsuspension aus Danzig

Dichte und Stabilität nach Filterpresse der unterschiedlichen Proben werden bestimmt und anhand der Abbildung 6.62 dargestellt. Auf der x-Achse werden die unterschiedlichen Proben angegeben. Auf der primären y-Achse (Links) wird Filtratwasser in g angegeben. Die sekundäre y-Achse zeigt die Dichte in g/cm^3 .

Die Ergebnisse aus der Abbildung 6.62 zeigen, dass alle Proben gleich stabil sind, d.h. gleiche Masse des Filtratwassers zeigen (ca. 22g). Eine Ausnahme bildet die Probe Alt-BS, die eine Masse des Filtratwassers ca. 80 g beträgt. Es ist zu vermuten, dass die Suspension im Altsuspensionstank mithilfe von Polymere destabilisiert wird. Daher die hohe Masse des Filtratwassers und der starke, penetrante Geruch. Die Dichte der Suspension unterscheidet sich von der Dichte am Anfang (frisch-BS) und den aufgeladenen Suspensionen (Rest der Proben). Sie steigt deutlich von 1,05 bis über 1,09 g/cm^3 . Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die drei Proben BS-Vorsieb, BS-Feinsieb und BS-Fahrbecken sehr ähnliche Eigenschaften haben und sich von der frisch-BS und Alt-BS deutlich unterscheiden.

Eine weitere Charakterisierung der Probe wird durchgeführt. Beobachtungen liefern beispielsweise Information über die Farbe der aufgeladenen Suspension und den Inhalt an Bodenpartikel. Die drei Proben BS-Vorsieb, BS-Feinsieb und BS-Fahrbecken sind farblich gleich und



Abbildung 6.63: Aufgeladene Suspension aus Danzig, Vorsieb-BS

alle drei enthalten kleine schwarze Bodenpartikel (Abb. 6.63). Die Probe Alt-BS hat ein ganz anderes Aussehen, die Suspension ist vollständig entmischt, d.h. am oberen Teil des Probeneimers befindet sich eine dicke geschwärmte Wasser Schicht und am unteren Teil des Probeneimers befindet sich die Suspension. Diese Probe hat einen durchdringenden Geruch von Abwasser. Dieser kann darauf hindeuten, dass diese Suspension mit Polymeren destabilisiert wurde.

Die Proben werden außerdem im Siedlungswasserlabor an der Ruhr-Universität Bochum analysiert. Die Ergebnisse liefern Information über die folgenden Parameter: pH, Leitfähigkeit, Trübung, AFS (abfiltrierbare Stoffe), TDS (Total dissolved solids) und CSB (chemischer Sauerstoffbedarf). Die Trübung stellt die quantitative Bestimmung der Konzentration feinverteilter, kolloidaler Teilchen in Flüssigkeiten oder Gasen dar. Ihre Einheit ist FNU. Die AFS sind die Sink-, Schweb- und Schwimmstoffe. Die TDS stellen die Gesamtheit aller gelösten anorganischen und organischen Stoffe dar. Zum Schluss ist das CSB ein Maß für die Summe aller organischen Verbindungen im Wasser.

Die Analysen sollten möglichst frühzeitig nach der Probenentnahme erfolgen. Da die Probenentnahme in Polen stattfand und die Proben an der Ruhr-Universität Bochum einige Tage später angeliefert wurden, wird diese Voraussetzung nicht getroffen.

Die Tabelle 6.18 stellt die Ergebnisse dar. Die Tabelle zeigt außerdem Referenzwerte für Rohrabwasser und für Trinkwasser. Die Ergebnisse zeigen, dass der pH-Wert im Laufe der Separationsstufe zunimmt und die Alt-BS einen pH-Wert von ca. 12 annimmt. Die Ergebnisse zur Trübung und zu den AFS sind deutlich höher als das Referenzwert für Rohrabwasser. Bei den Trübungswerte beträgt der Referenzwert 100-2 000 FNU. Im Vergleich dazu betragen die Proben von aufgeladener Suspension bis zu ca. 940 000 bis 1 300 000 FNU. Die Tendenz für den Parameter AFS ist ähnlich: während der Referenzwert für Rohrabwasser 0,3 bis 0,5 g/l beträgt, steigen die Werte für aufgeladene Suspensionen bis zu 166 g/l. Abschließend sind die Ergebnisse zur CSB zu analysieren. Die CSB der Proben von aufgeladener Suspension zeigen CSB-Werte zwischen 200 und 300 mg/l, im Unterschied dazu beträgt der Referenzwert bis zum 600 mg/l. Die CSB von Rohrabwasser verdoppelt die von den Proben von aufgeladener

Probe	pH	Leitfähigkeit]	Trübung	AFS	TDS	CSB
Einheit	-	[mS/cm]	[FNU]	[g/l]	[mg/l]	[mg/l]
Frisch-BS	9,3	3,17	28 500	84	2050	-
Fahrbecken-BS	7,6	2,18	1 320 000	156	1970	310
Alt-BS	11,9	2,55	940 000	166	1650	200
Ref. Rohrabwasser	-	-	100-200	0,3-0,5	-	400-600
Ref. Trinkwasser	7,0	0,05-0,1	0,02-0,5	-	≤ 300	-

Tabelle 6.18: Chemische Analyse der Proben aus Danzig

Suspension. Nichtsdestotrotz kann festgestellt werden, dass die Proben sehr vielen organischen Verbindungen enthalten.

In dieser Versuchsreihe werden die 5 Proben durch Elektrokoagulation untersucht. 3 Elektroagulationsversuche aus den Best-Combination wurden ausgewählt und für jede Probe durchgeführt. Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code bezieht sich auf die Suspension und eine der folgenden Elektrokoagulationsversuche:

- EK: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand 6,5 cm.
- EK R05-BE: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand 6,5 cm. Jede 5 Minuten wird die Anode gereinigt und das koagulierte Bentonit eingesammelt.
- EK Monopolar: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand 6,5 cm. 4 Monopolar-Elektroden werden mit Parallelschaltung angewendet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Elektrokoagulation der aufgeladenen Suspension aus Danzig durch Diagramme vorgestellt.

Effektivitätsparameter

Die folgenden Parameter werden analysiert:

- B_{kt} in g und in %
- $\Delta\rho$ in%
- ΔFW in%

Die Abbildung 6.64 stellt das koagulierte Bentonit dar. Hier besteht das koagulierte Bentonit nicht nur aus Bentonit, sondern auch aus Aufladung. Trotzdem wird es in dieser Versuchsreihe immer über koaguliertes Bentonit gesprochen. Auf der x-Achse werden die unterschiedlichen Versuche mit den verschiedenen Proben angegeben. Auf der y-Achse werden der **prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit** in % und der **absolute Anteil an koaguliertem Bentonit** in g angegeben. Die diskontinuierlichen Linien stellen die maximalen Werte beide Parameter für die Versuche aus den Best-Combinations. Diese Werte dienen als Referenz.

Versuchsparameter	Elektrokoagulationszelle: B		
	Versuchsreihe: Aufladung aus Danzig		
Elektrodenparameter	Elektrodenabstand	[cm]	6,5
	Aktive Anodenoberfläche	[cm ²]	212
	Material	[-]	Al
	Anzahl an Elektroden	[-]	2
	Schaltung	[-]	-
Elektrische Parameter	Stromstärke	[A]	2
Betriebsparameter	Strömungszustand	[-]	Ruhe-Zustand
	Strömung	[-]	Nein
	Strömungssystem	[-]	-
	Verweildauer	[min]	30
Anodenreinigung	Typ	[-]	-
	Zeitintervall	[min]	-
	$B_k t$ einsammeln	[-]	-
	Anode wechseln	[-]	-
Suspension	Bentonittyp	[-]	W
	Konzentration	[%]	2,5
	Aufladungstyp	[-]	- , Vorsieb, Feinsieb, Fahrbecken und Alt
	Aufladungskonz.	[g/l Susp.]	-
	Temperatur	[-]	Umgebungstemperatur

Tabelle 6.19: Parameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe Aufladung aus Danzig

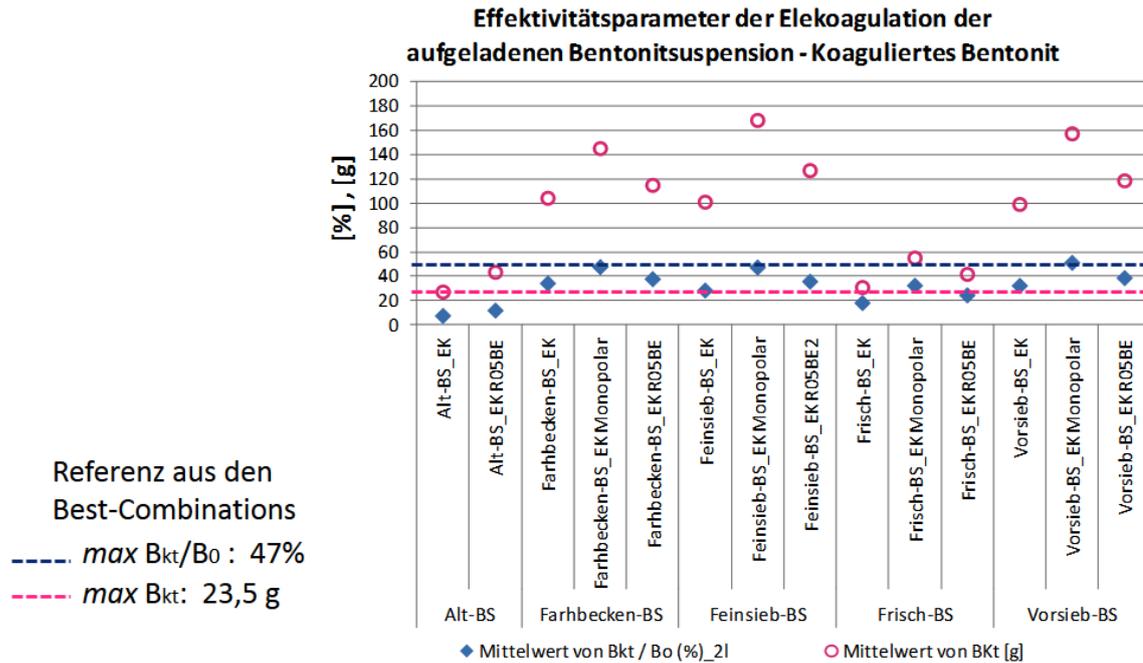


Abbildung 6.64: Ergebnisse zum koagulierten Bentonit, Versuchsreihe: Aufladung aus Danzig

Die Elektrokoagulation der frischen Bentonitsuspension aus Danzig ergibt, dass zwar ein geringeren prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit, aber eine höhere Masse an koaguliertem Bentonit getrennt wird als beim Versuch B-Al-2A-6,5cm mit Suspension W 2,5% ohne Aufladung.

Im Gegensatz dazu erreicht die Elektrokoagulation der aufgeladenen Suspension (Vorsieb, Feinsieb und Fahrbecken) mit Monopolar-Elektroden den prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit aus den Best-Combinations (ca. 50%). In diesen Fällen betragen die absoluten Massen an koaguliertem Bentonit über 140 g, was signifikant über dem Referenzwert (knapp 30 g) liegt. Die anderen Modalitäten von Elektrokoagulation ergeben nicht so gute Ergebnisse im Bezug auf $B_{kt}\%$, aber die absolute Masse an koaguliertem Bentonit liegt immer über 100 g.

Die Suspension Alt-BS erfährt keine Trennung von koaguliertem Bentonit, der prozentuale Anteil an koaguliertem Bentonit ist deutlich geringer als der Referenzwert. Obwohl die absolute Masse leicht über das Referenz liegt. Es kann festgestellt werden, dass kaum Stoff aus der Alt-BS durch Elektrokoagulation getrennt wird.

Die weiteren Effektivitätsparameter werden auf der Abbildung 6.65 dargestellt. Auf der x-Achse werden die unterschiedlichen Versuche mit den verschiedenen Proben angegeben. Auf der y-Achse werden die Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension in % angegeben. Die diskontinuierlichen Linien stellen die maximalen Werte beider Parameter für die Versuche aus den Best-Combinations (B-Al-2A-6,5cm mit W 2,5%) dar. Diese Werte dienen als Referenz.

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Ergebnisse der Elektrokoagulation der Suspension aus Danzig deutlich unter den Referenzwerten liegen. Die geringsten Werte für beide Parameter liefert die Elektrokoagulation mit Alt-BS. Die höchste Verringerung der Dichte der Restsuspension (über 20%) zeigt die Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden mit Vorsieb-BS, Feinsieb-BS, Fahrbecken-BS und Frisch-BS. In dem Fall der Verringerung der Stabilität der Restsuspension zeigen Werte über 30% die Versuche der Elektrokoagulation mit Monopolar-

Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation der aufgeladenen Bentonitsuspension - Verringerung der Dichte und der Stabilität

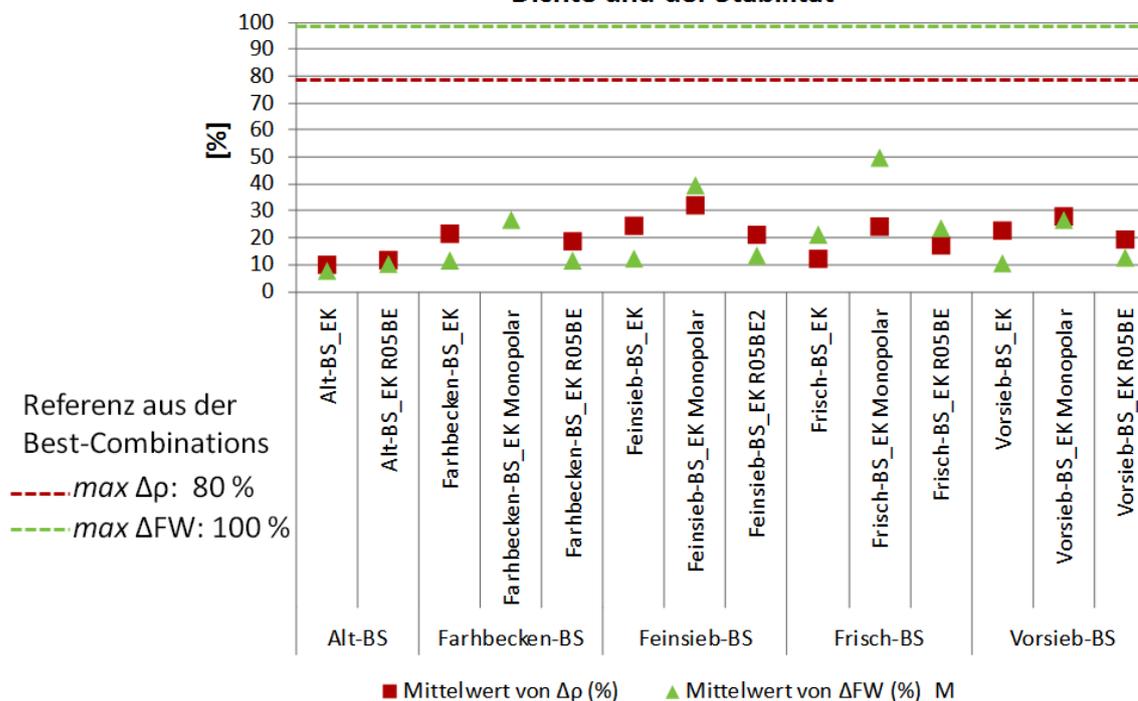


Abbildung 6.65: Effektivitätsparameter der Elektrokoagulation, Versuchsreihe: Aufladung aus Danzig

Elektroden sowie Feinsieb-BS und Frisch-BS.

Fazit

Als Haupttendenz der Elektrokoagulation von gebrauchten Bentonitsuspensionen lässt sich die Eignung dieser Methode als Trennmethode für Bentonit und Aufladung erkennen. Beide Substanzen werden gleichzeitig getrennt und lassen sich nicht voneinander unterscheiden. Die Elektrokoagulation ergibt einen ähnlichen prozentualen Anteil an koaguliertem Bentonit sowohl für die W 2,5 % aus dem Best-Combinations als auch für die aufgeladene Suspension aus Danzig. Die absolute Masse an koaguliertem Bentonit ist aber größer, wenn die Trockensubstanz der Suspension größer ist. D.h. je höher die Trockensubstanz, desto größer die Masse an koaguliertem Bentonit.

Im Bezug auf die anderen Effektivitätsparameter sind die Tendenzen ganz anders. Eine höhere Trockensubstanz bedeutet eine höhere Stabilität der Suspension. Daher ist diese schwieriger zu destabilisieren. Aufgrund dieses Aspekt zeigen die Ergebnisse der Filterpresse zur Verringerung der Stabilität eine sehr geringe Effizienz bei der Destabilisierung der Suspension. Ähnlich sind die Ergebnisse zur Verringerung der Dichte. Sie sind niedriger bezüglich der Ergebnisse der Elektrokoagulation mit W 2,5% Suspension ohne Aufladung.

6.5.4 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Suspensionskonzentration durch die Elektrokoagulation ergibt, dass hochkonzentrierte Suspensionen vergleichbare Effektivitäten der Elektrokoagulation bzgl. des pro-

zentualen Anteils an koagulierte Bentonit zeigen. Die absolute Masse an koagulierte Bentonit steigt jedoch mit zunehmender Konzentration an. Die Tendenz hinsichtlich der Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension ist verschieden. Beide Parameter verringern sich mit zunehmender Konzentration der Suspension.

Bei den Untersuchungen von gebrauchten Bentonitsuspensionen durch Elektrokoagulation wird betont, dass sich der Parameter $B_{kt}\%$ auf den prozentualen Anteil an koagulierte Bentonit und koagulierter Aufladung bezieht.

Die Elektrokoagulation von im Labor simulierter gebrauchter Bentonitsuspension zeigt, dass die aufgeladene Suspension für die Elektrokoagulation geeignet ist. Verglichen mit dem Referenzversuch ohne Aufladung, unterscheidet sich die Effektivität bei Versuchen mit Aufladung. Hinsichtlich des prozentualen Anteils an koagulierte Bentonit ist die Elektrokoagulation für frische sowie für aufgeladene Suspension gleich effektiv. Die Aufladung Kaolin verursacht sogar eine Erhöhung der Effektivität im Bezug auf diesen Parameter. Die Ergebnisse zum absoluten Anteil an koagulierte Bentonit (Masse) zeigen, dass bei der Elektrokoagulation mit aufgeladener Suspension eine hohe Masse (über 50 g) an Bentonit und Aufladung getrennt wird. Die Ergebnisse zur Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension ergeben, dass die Aufladung die Effektivität der Elektrokoagulation negativ beeinflusst.

Die Untersuchungen der Elektrokoagulation mit gebrauchten Bentonitsuspensionen aus der Tunnelbaustelle in Danzig (Polen) zeigen die Eignung dieser Methode als Trennmethode für Bentonit und Aufladung. Die Elektrokoagulation ergibt einen Ähnlichen Anteil an koagulierte Bentonit, sowohl für die W 2,5 % als auch für die aufgeladene Suspension aus Danzig. Die absolute Masse an koagulierte Bentonit ist jedoch größer (über 100 g), wenn die Trockensubstanz der Suspension größer ist. D.h. je höher die Trockensubstanz, desto größer die Masse an koagulierte Bentonit. In Bezug auf die anderen Effektivitätsparameter sind die Tendenzen sehr verschieden. Eine höhere Trockensubstanz bedeutet eine niedrige Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension. Eine Ausnahme bildet die Suspension BS-Alt, die durch Elektrokoagulation nicht getrennt bzw. destabilisiert werden kann.

Kapitel 7

Auswirkungen der Elektrokoagulation

Die Elektrokoagulation wirkt auf die verschiedenen Elemente des Elektrokoagulationsversuchs wie Suspension und Elektroden ein.

Die Suspension verliert nach der Elektrokoagulation teilweise die Stabilität (Restsuspension). Dies wird durch die Ergebnisse der Filterpresse bestätigt, wobei die Stabilität der Restsuspension durch die Filtratwasserabgabe bestimmt wird. Die Stabilität einer Suspension kann ebenfalls durch den so genannten Absetzversuch bestimmt werden. Dieser Versuch basiert auf dem Prinzip der Sedimentation, d.h. er bestimmt die Fähigkeit einer Suspension zum Sedimentieren.

Die Wirkung der Elektrokoagulation auf die Stabilität der Restsuspension wird durch 2 Absetzversuchsreihen untersucht.

Weitere Wirkungen der Elektrokoagulation beziehen sich direkt auf die chemischen Vorgänge der Elektrolyse. Während der Elektrolyse entstehen Gase. Diese Gase werden im Folgenden gemessen und theoretisch berechnet. Während der Elektrolyse wird ebenfalls die Anode aufgelöst: der Massenverlust der Anode wird gemessen und theoretisch berechnet.

7.1 Auswirkung auf die Stabilität der Restsuspension - Absetzversuch-

Neben der Filterpresse kann die Stabilität einer Suspension durch den Absetzversuch bestimmt werden. Dieser basiert auf der Sedimentation, d.h. das Absinken des Bentonits allein durch Schwerkraft.

Zwei Versuchsreihen werden durchgeführt. Die erste beschäftigt sich mit der Stabilität der Restsuspension nach der Best-Combination Elektrokoagulationsuntersuchungen. In der zweiten Versuchsreihe geht es um die Bestimmung der Stabilität der Restsuspension nach Elektrokoagulation mit unterschiedlicher Verweildauer.

7.1.1 Absetzversuch der Restsuspension aus der Best-Combination

Ziel dieser Versuchsreihe ist die Untersuchung der Stabilität der Restsuspension nach der Elektrokoagulation durch Absetzversuche. Jeder Versuch wird mithilfe eines Codes identifiziert. Der Code bezieht sich auf die folgenden Versuche (Best-Combination):

- EK: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand von 6,5 cm.

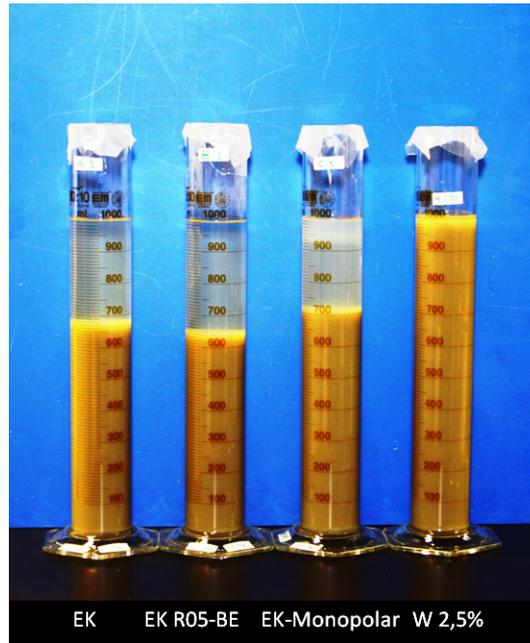


Abbildung 7.1: Absetzversuch der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Parametern

- EK R05-BE: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand von 6,5 cm. Jede 5 Minuten wird die Anode gereinigt und das koagulierte Bentonit eingesammelt.
- EK Monopolar: Elektrokoagulation in Zelle B mit Aluminiumelektroden, 2 Ampere und Elektrodenabstand von 6,5 cm. 4 Monopolar-Elektroden werden mit Parallelschaltung angewendet.

Die folgenden Ergebnisse der Absetzversuche werden durch Bilder und eine Absetzkurve sowie die Eigenschaften der Restsuspension und des getrenntes Wassers dargestellt.

Ergebnisse des Absetzversuchs

Die Versuchsergebnisse, am Ende der Absetzzeit und der Absetzkurve, werden im Folgenden mittels Bildern beschrieben.

Die Abbildung 7.1 zeigt die Messzylinder mit Restsuspension nach der Elektrokoagulation (EK, EK-R05-BE und EK-Monopolar) am Ende der Absetzdauer (1 Woche, 10080 Minuten). Als Referenz dient der Messzylinder mit reiner Bentonitsuspension W 2,5 %. Die Wasserschicht auf dem oberen Teil jedes Messzylinders ist in den Fällen der Restsuspension nach Elektrokoagulation deutlich abzulesen. Das Volumen an getrenntem Wasser überschritt 300 ml. Das Volumen an getrenntem Wasser aus der reinen Bentonitsuspension ist sehr gering.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Absetzversuches mithilfe einer Absetzkurve dargestellt (Abb. 7.2). Auf der x-Achse ist das Volumen von getrenntem Wasser in *ml*, auf der y-Achse ist die Zeit in Minuten angegeben. Die verschiedenen Kurven ergeben die Entwicklung der Befreiung von Wasser aus der Restsuspension im Laufe der Zeit. Als Referenz dient die Kurve von der Bentonitsuspension W 2,5 %, die nicht durch Elektrokoagulation behandelt wurde.

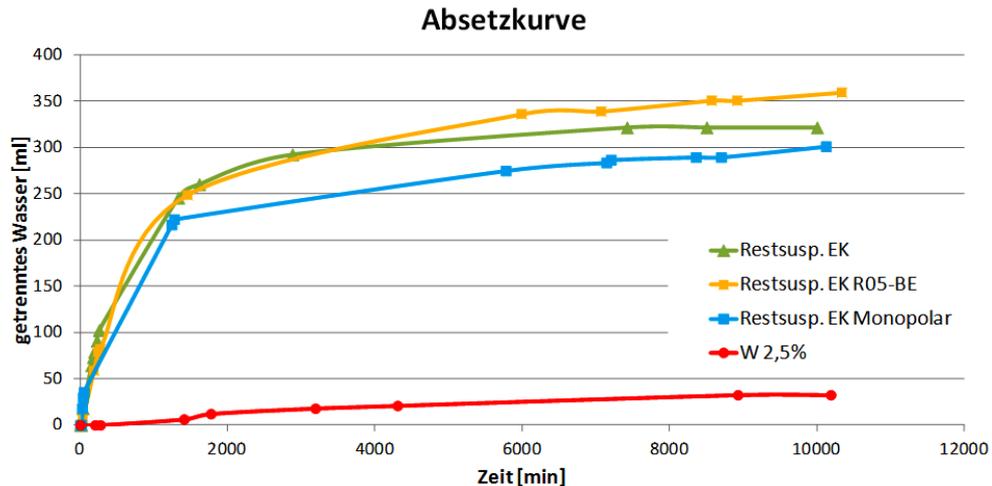


Abbildung 7.2: Absetzkurve der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Parametern

Das Volumen an getrenntem Wasser der durch Elektrokoagulation behandelten Bentonitsuspensionen ist deutlich höher als das der reinen Bentonitsuspension. Das getrennte Wasser von der Restsuspension erreicht nach der Absetzdauer über 300 ml. Die Restsuspension aus der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode zeigt sogar über 350 ml getrenntes Wasser. Im Gegensatz dazu ist die Dicke der Wasserschicht bei der reinen Suspension erst nach 1440 Minuten lesbar und nach einer Woche sind nur 32 ml Wasser an der oberen Teil des Meßzylinders zu sehen.

Die Absetzdauer spielt ebenfalls eine große Rolle. Die Restsuspension sedimentiert schneller als die reine Suspension und nach 1440 Minuten (einem Tag) hat sich in allen 3 Fälle über 200 ml Wasser abgesetzt. Ab den ersten 24 Stunden und nach 10080 Minuten (eine Woche) ist die Zunahme an getrenntem Wasser nicht so drastisch und dessen Volumen liegt dann über 300 ml. Besondere Ergebnisse zeigt der Absetzversuch der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode (EK R05-BE). Nach einem Tag beträgt das Volumen an getrenntem Wasser ca. 250 ml und nach einer Woche steigt es bis über 350 ml.

Aus dem Absetzversuch ergibt sich, dass sich durch die Elektrokoagulation ein großer Anteil an Wasser trennt. Außerdem ist die Zeit nach der Elektrokoagulation, insbesondere die ersten 24 Stunden, für die Destabilisierung der Restsuspension entscheidend.

Eigenschaften der Restsuspension: Messung der Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der Restsuspension wurde 8 Stunden lang nach der Elektrokoagulation gemessen. Die Messung wird mit dem Zetasizer Nano Z durchgeführt. Dieser Gerät ist speziell für die Messung des Zetapotenzials und der elektrophoretischen Mobilität in wässrigen Dispersionen. Es arbeitet unter dem Prinzip der Laser-Doppler-Mikro-Elektrophorese. Die Messwerte wurden alle 10 Minuten erfasst und gespeichert. Zwei verschiedene Suspensionsproben wurden untersucht:

- Probe 1: Reine Bentonitsuspension W 2,5 % vor der Elektrokoagulation. Die Messung wurde 24 Stunden nach der Mischung vorgenommen.
- Probe 2: Restsuspension nach Elektrokoagulation mit der Zelle B und den folgenden Parameter: Al-2A-6,5 cm.

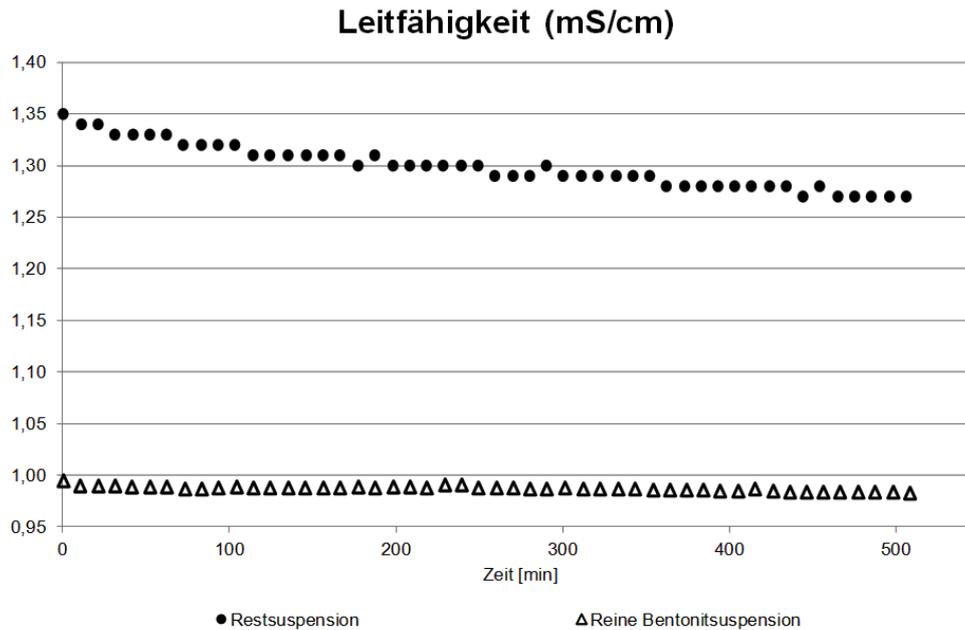


Abbildung 7.3: Leitfähigkeit der Restsuspension

Die Abbildung 7.3 zeigt die Leitfähigkeit jeder Probe. Auf der x-Achse ist die Zeit in Minuten und auf der y-Achse ist Leitfähigkeit in mS/cm angegeben. Die Restsuspension zeigt höhere Leitfähigkeitswerte als die reine Bentonitsuspension. Die Leitfähigkeit der reinen Bentonitsuspension liegt zwischen $0,983$ und $0,995 mS/cm$. Im Laufe der Zeit verringert sie sich um $0,012 mS/cm$. Im Gegensatz dazu zeigen die Resultate der Restsuspension nach der Elektrokoagulation eine stärkere Verringerung der Leitfähigkeit. Im Laufe der Messdauer sinkt sie von $1,350$ bis $1,270 mS/cm$. Die Variation ist in diesem Fall $0,080 mS/cm$.

Die Änderung der Leitfähigkeit im Laufe der Zeit ist ein Indikator für die Geschwindigkeit der Destabilisierung der Suspension. Je größer die Änderung ist, desto schneller wird die Suspension destabilisiert.

Es kann festgestellt werden, dass sich die Restsuspension im Laufe der ersten 8 Stunden nach Elektrokoagulation destabilisiert. Die während der Elektrokoagulation ausgelösten Komponenten aus der Anode verbinden sich langsam mit den Bentonitpartikeln, sodass sie instabil werden. Der Destabilisierungsprozess ist deutlich langsamer bei der reinen Bentonitsuspension, da keine ausgelösten Komponenten aus der Anode vorhanden sind.

Eigenschaften des getrennten Wassers

Das getrennte Wasser ist in den Fällen EK und EK-R05-BE klar und sauber. In dem Fall der Restsuspension nach Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden ist es weißlich und nicht so farblos und klar. Die Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden wird unter 2 Ampere pro Elektrodenpaar und niedriger Spannung durchgeführt. Mit 2 Elektrodenpaaren unter 2 Ampere wird doppelt so viel Aluminium ausgelöst. Unter bestimmten Bedingungen von Spannung und pH-Wert können Aluminiumkomponenten nicht stabil sein und dann aussäzen. In dem Fall von Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit Monopolar-Elektroden entsteht eine hohe Menge an Aluminium, sodass das Medium (Restsuspension) mit diesen Komponenten gesättigt ist. Aus diesem Grund ist das getrennte Wasser weißlich.

Nach der Elektrokoagulation	EK	EK-R05-BE	EK-Monopolar
Restsuspension			
pH-Wert	11,19	11,72	10,67
Leitfähigkeit [$\mu S/cm$]	1461	2200	1260
Nach 24h	EK	EK-R05-BE	EK-Monopolar
Wasser			
pH-Wert	11,12	12,06	11,11
Leitfähigkeit [$\mu S/cm$]	1239	2280	1252
Nach 1 Woche	EK	EK-R05-BE	EK-Monopolar
Wasser			
pH-Wert	11,19	11,69	11,33
Leitfähigkeit [$\mu S/cm$]	1236	1800	1302

Tabelle 7.1: Eigenschaften der Restsuspension und des Wassers nach der Elektrokoagulation.

Die Eigenschaften des getrennten Wassers wurden nach 24 Stunden und nach einer Woche bestimmt. Die Tabelle 7.1 stellt die Eigenschaften des getrenntes Wasser, pH-Wert und Leitfähigkeit, dar. Sie führt ebenfalls den pH-Wert und die Leitfähigkeit der Restsuspension sofort nach der Elektrokoagulation auf. Bei dem Absetzversuch von frischer Bentonitsuspension W 2,5 % ist den Anteil an getrenntem Wasser so gering, dass es nicht herausgezogen werden konnte. Deswegen sind diese Werte in der Tabelle nicht vorhanden.

Es kann festgestellt werden, dass die Eigenschaften des Wassers nach 24 Stunden und nach einer Woche ähnlich sind. Die pH-Werte und Leitfähigkeitswerte des getrennten Wassers und die von der Restsuspension sofort nach Elektrokoagulation sind ähnlich. Trotz der Ähnlichkeit der Werte kann festgestellt werden, dass die Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit Reinigung der Anode den höchsten pH-Wert und Leitfähigkeitswert zeigt.

Fazit

Die Sedimentation der Restsuspension nach der Elektrokoagulation wird wie folgt beschreiben: die Bentonitpartikel setzen sich auf dem Boden ab und das freie Wasser bleibt im oberen Teil des Meßzylinders.

Die Sedimentation findet unter einer bestimmten Geschwindigkeit statt. Deswegen wurde nicht nur das Volumen an getrenntem Wasser und abgesetztem Bentonit, sondern auch die Absetzdauer (Absetzkurve) gemessen.

Die Absetzdauer spielt in der Sedimentation von Restsuspension nach der Elektrokoagulation eine große Rolle. Nach der Elektrokoagulation befinden sich in der Suspension Al-Komponenten. Sie können sofort oder nach einer bestimmter Zeit mit den Bentonitpartikel reagieren. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die ersten 24 Stunden nach der Elektrokoagulation entscheidend sind: ca. 20 % des Volumens der Restsuspension trennt sich als klares Wasser. Nach einer Woche trennt sich ca. 30 % des Volumens der Restsuspension als klares Wasser ab. Als Referenz dienen die Ergebnisse des Absetzversuchs mit reiner Bentonitsuspension: nach einer Woche trennt sich ca. 3 % des Volumens der Suspension als klares Wasser ab.

Die Geschwindigkeit der Sedimentation kann mithilfe der Messung der Leitfähigkeit ermittelt werden. Die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit hängt unter anderem von der Anzahl der Ionen ab.

Bei der Messung mit dem Zetasizer wurde die Leitfähigkeit der Restsuspension alle 30 Minuten nach der Elektrokoagulation erfasst. Die Leitfähigkeit nimmt im Laufe der 8 Stunden um $0,080 \text{ mS/cm}$ ab, d.h. die Anzahl an Ionen sinkt. Während dieser Zeit findet die Verbindung zwischen Bentonitpartikel und Al-Komponenten statt. Je mehr Al-Ionen mit dem Bentonit kombiniert werden, desto weniger freie Ionen befinden sich in der Suspension und die Leitfähigkeit ist niedriger. Als Referenz dient die Verringerung der Leitfähigkeit der reinen Bentonitsuspension: im Laufe der 8 Stunden nimmt sie $0,012 \text{ mS/cm}$ ab.

Die Messung der Eigenschaften des Wassers ergeben keine deutliche Änderung nach der Elektrokoagulation.

7.1.2 Absetzversuch vs. Verweildauer

In diesem Absetzversuch wird die Stabilität der Restsuspension der Elektrokoagulation mit unterschiedlichen Verweildauern bestimmt. Die hier untersuchten Restsuspensionen gehören zum Versuch B-Al-2A-6,5cm (Best-Combination) und Verweildauer von 1 bis 30 min. Jeder Versuch wird mithilfe der Verweildauer identifiziert. 25 Versuche wurden insgesamt durchgeführt.

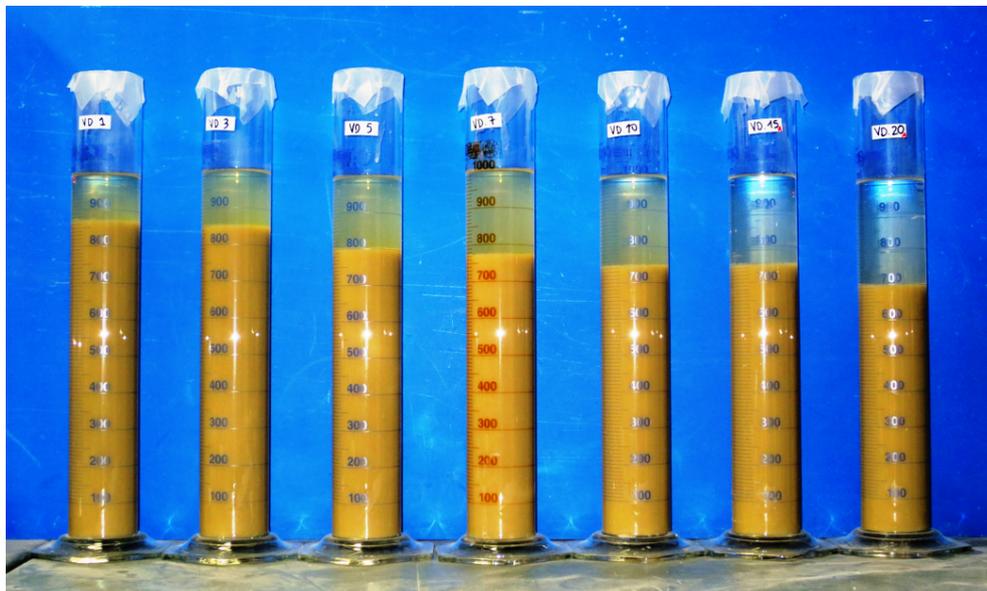


Abbildung 7.4: Absetzversuch der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Verweildauer.

Die Abbildung 7.4 zeigt 7 Messzylinder mit Restsuspension aus den unterschiedlichen Elektrokoagulationsversuchen mit den Verweildauern von 1, 3, 5, 7, 10, 15 und 20 min nach einer Absetzdauer von einer Woche. Diese Abbildung zeigt, dass die Stabilität der Restsuspension von der Verweildauer der Elektrokoagulation abhängt. Das dabei getrennte Wasser steigt mit zunehmender Verweildauer an. Die Messzylindern für Verweildauer 1 und 3 min ergeben ca. 150 ml freies Wasser. Im Gegensatz dazu zeigt der für Verweildauer 20 min ca. 300 ml freies Wasser.

Die vollständige Versuchsreihe zeigt jedoch eine leichte Variabilität der Ergebnisse. Die Abbildung 7.5 stellt diese Variabilität der Ergebnisse dar. Auf der y-Achse wird das Volumen an getrenntem Wasser nach dem Absetzdauer in ml und auf der x-Achse die Verweildauer in min angegeben. Darüber hinaus werden die Ergebnisse mithilfe von grünen und roten Punkten dargestellt. Im Gegensatz zu den grünen Punkten stehen die roten Punkte für fehlerhafte

Absetzversuch vs. Verweildauer

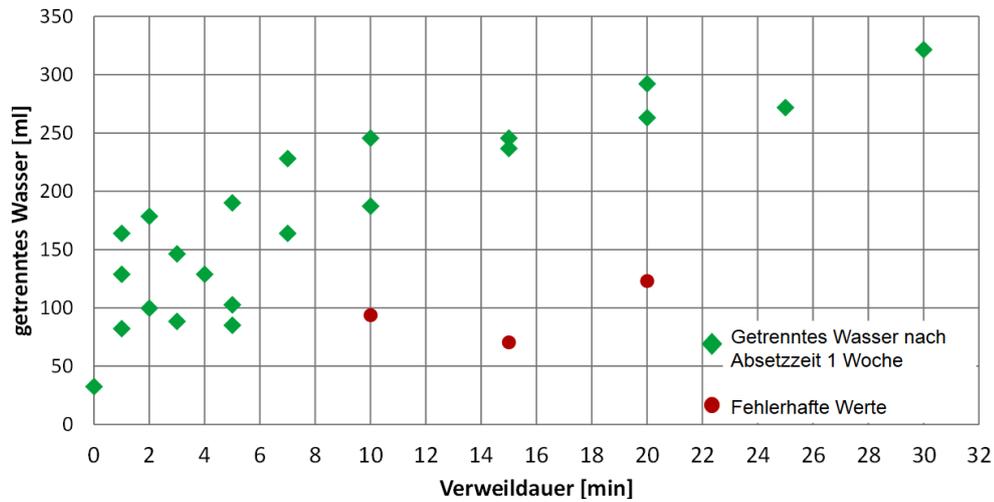


Abbildung 7.5: Ergebnisse des Absetzversuches der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit verschiedenen Verweildauer.

Versuchsergebnisse. Die Fehler in den Ergebnissen werden höchstwahrscheinlich von der ungenauen Kennzeichnung der Messzylinder verursacht. Trotz der Variabilität der Ergebnisse kann die oben erwähnte Tendenz erkannt werden. Der Abbildung lässt sich entnehmen, dass nur die Elektrokoagulation mit langer Verweildauer (über 20 min) die Bentonitsuspension W 2,5% stark destabilisieren kann. D.h. die Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit Verweildauer höher als 20 min ergibt ein Volumen an getrenntem Wasser, das größer als 250 ml ist.

Absetzversuch vs. Verweildauer pH-Wert und Leitfähigkeit des Wassers

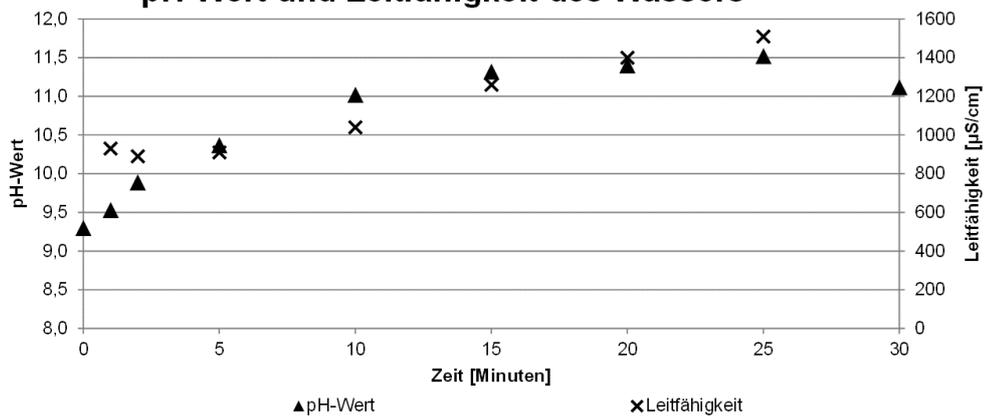


Abbildung 7.6: pH-Wert und Leitfähigkeit der Restsuspension beim Absetzversuch

Die physikalischen Eigenschaften der Restsuspension bzw. des getrenntes Wassers - Leitfähigkeit, Temperatur und pH-Wert - werden ebenfalls gemessen (Abb. 7.6). Auf der x-Achse wird die Verweildauer in min, auf der y-Achse (links) wird der pH-Wert und auf der y-Achse (rechts) wird die Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ angegeben. Es lässt sich eine deutliche Tendenz zur Steigerung der physikalischen Eigenschaften erkennen: je länger die Verweilzeit, desto höher die physikalischen Parameter. Der pH-Wert steigt von Verweildauer 3 min bis Verweildauer 25

min um ca. 2,2 von 9,3 auf 11,5. Ähnlich ist dies im dem Fall der Leitfähigkeit, die gleichmäßig, bei einer Verweildauer von 3 min bis 30 min, von $900 \mu S/cm$ auf $1500 \mu S/cm$ ansteigt.

Als Haupttendenz lässt sich erkennen, dass die Verweildauer eine große Rolle bei der Stabilität der Restsuspension spielt. Die Verweilzeit beeinflusst nicht nur die Effektivitätsparameter, sondern auch die Fähigkeit der Restsuspension von allein zu entmischen und ihre physikalischen Parameter.

7.2 Bestimmung des Massenverlusts der Anode

Die wirtschaftliche Auslastung der Elektrokoagulation hängt zum Teil von der Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile der EK-Zelle ab. Die Umtauschhäufigkeit der Anode ist in dieser Hinsicht sehr wichtig. Durch den Massenverlust der Anode nach jeder Elektrokoagulation und anhand von physikalischen und chemischen Vorgängen des Elektrokoagulationsprozesses kann die Umtauschhäufigkeit der Anode abgeschätzt werden. Grundlagen für diese Abschätzung ist die Bestimmung des Massenverlustes der Anode nach jeder Elektrokoagulation in Abhängigkeit von der Elektrokoagulationsdauer und dem durchgeflossenen Strom. Diese wird sowohl praktisch durch Messungen als auch theoretisch mithilfe von physikalischen Gesetzen bestimmt.

Berechnung der abgeschiedenen Masse m der Aluminiumanode bei der Elektrokoagulation

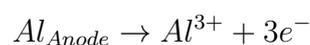
Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Strom, Material und Verbrauch der Anode sowie der Elektrokoagulationszeit gelten folgende physikalische Gesetze der Elektrolyse: Faraday'sches Gesetz.

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot N_A \cdot e} \quad (7.1)$$

Die Gleichung 7.1 entspricht dem ersten Faraday'sche Gesetz. Hiermit ist es möglich, die abgeschiedene Masse m für eine bestimmte elektrische Ladung Q zu errechnen.

Für die Berechnung werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Anodenmaterial.
 - Aluminiumplatten aus der Werkstatt der Ruhr-Universität Bochum
 - Zusammensetzung: unbekannt. Aluminium als Werkstoff wird meist als Metalllegierung verwendet. Je nach gewünschten Eigenschaften (Zerspannbarkeit, Verformbarkeit, Beständigkeit, usw.) ist der Anteil an reinem Aluminium unterschiedlich. Häufige Begleitstoffe sind: Magnesium, Kupfer, Mangan, Blei, Silizium, Zink, und Bismut in sehr geringen Anteilen (0,2-5%).
 - Annahme für die Berechnung: Anode besteht aus 100% Aluminium
- Elektrokoagulationsdauer, $t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$
- Stromstärke, $I = 2 \text{ A}$
- Reaktionsgleichung an der Anode: Oxidation



Die Berechnung lautet:

$$\begin{aligned} m(\text{Al}) &= \frac{M(\text{Al}) \cdot I \cdot t}{z(\text{Al}) \cdot F} = \\ &= \frac{26,9815[\text{g/mol}] \cdot 2[\text{A}] \cdot 1800[\text{s}]}{3 \cdot 96490[\text{As/mol}]} = \\ &= 335,556 \cdot 10^{-3}[\text{g}] \approx 336[\text{mg}] \end{aligned}$$

Nach dem Faraday'schen Gesetz werden 0,336 g Aluminium für 30 min Elektrokoagulation und 2 A aus der Anode abgeschieden.

Messung der abgeschiedenen Masse m der Aluminiumanode bei der Elektrokoagulation

Für die Messung wurden 2-3 Anoden gewogen und daraus ein Mittelwert gebildet. Ebenso wurden die Anoden vor und nach Elektrokoagulationsversuche mehrmals gewogen. Eine mittlere Massendifferenz wurde ausgerechnet.

- Mittlere Elektrokoagulationsdauer t : 30 [min]
- m_{Anode} : 200 [g]
- Δm : 0,430 [g]
- Massenverlust: 0,215 [%]

Somit wurde nach 30 min Elektrokoagulation ein Massenverlust von 430 mg beobachtet. Dies entspricht ca. 0,2 % der gesamten Anodenmasse.

Zwischen den gemessenen Massenverlust der Anode und dem berechneten, erwarteten Massenverlust nach 30 min Elektrokoagulation gibt es eine Massendifferenz von ca. 0,1 g. Dies entspricht einem Fehler vom berechneten Wert von ca. 20% in Bezug auf den gemessenen Wert. Die genauere Zusammensetzung der Anode ist unbekannt. Somit besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass andere Metalle aus der Anode mit abgeschieden wurden, die diese 20% Abweichung darstellen und in der Rechnung nicht berücksichtigt werden konnten. Solange es sich um das gleiche Anodenmaterial handelt, ist diese Abschätzung für den Massenverlust der Anode gut geeignet. Zu erwarten wäre damit eine Abweichung von ca. 20% mehr als der errechneten Massenverlust. Ändert sich die Zusammensetzung der Anode, so kann die gleiche Untersuchung durchgeführt werden und die Abweichung vom erwarteten Wert ermittelt werden. Für bessere Abschätzungen muss die genauere Zusammensetzung des Anodenmaterials bekannt sein.

Fazit

Die Ergebnisse zur Messung und Berechnung des Massenverlusts der Anode während der Elektrokoagulation Al-2A-6,5cm und 30 min sind die Folgenden:

- $\Delta m_{\text{Messung}}$: 0,430 [g]
- $\Delta m_{\text{Berechnung}}$: 0,336 [g]

Die Auswirkung des Massenverlusts auf die Betriebsstunden können wie folgt errechnet werden:

- Anodenverbrauch (Al-2A-6,5cm, Verweildauer: 1h): 0,860 g \rightarrow 0,430 g/h
- Anodenmasse Zelle B: 200 g
- Wie oft muss die Anode in der Zelle B ersetzt werden?
 \rightarrow Intervall zur Anodenersetzung: $200/0,43 = 465$ h
 \rightarrow Je dicker die Anode ist, desto größer wird das Intervall zur Anodenersetzung.

7.3 Bestimmung der entstehenden Gase

Bei der Durchführung der Elektrokoagulation von Bentonitsuspension entstehen Wasserstoff- und Sauerstoffgas. Die Menge an freigesetzten Gasen stellt unter bestimmten Arbeitsbedingungen ein Risiko für die Arbeitnehmer dar. Um geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, soll mit einer abschätzbaren Berechnung und anschließender Messung des Gasvolumens das Ausmaß der Gefahren in Bezug auf die Lage des Arbeitsplatzes festgestellt werden.

Die Betrachtung der Menge der bei der Elektrokoagulation freigesetzten Gase ist sehr wichtig. Sauerstoffgas ist in der Anwesenheit von einer bestimmter Luftkonzentration an Wasserstoffgas ein starkes Oxidationsmittel und somit sehr gefährlich und explosionsfreudig.

Flammenpunkt, Luftkonzentration, Zündpunkt, Einfluss auf die Gesundheit und Umwelt sowie die allgemeinen Sicherheitshinweise und Schutzmaßnahmen bei Umgang mit diesen Gasen sind wichtige Parameter für die Auswertung der Gefahren bei der Durchführung des Versuches.

Für die Bestimmung des Volumens an Gasen wird zuerst anhand physikalischer Gesetze näherungsweise eine allgemeine Formel für die Berechnung aufgestellt. Anschließend wird das berechnete Volumen durch eine pneumatische Messung überprüft.

Die Arbeitsbedingungen sind auch relevante Parameter, um die Gefahr gut einschätzen zu können. Hier spielen die Lage, Größe, Ausstattung und Belüftung des Arbeitsplatzes u.a. Schutzausrüstung der Mitarbeiter eine große Rolle.

Eigenschaften von Wasserstoff [Fey08]

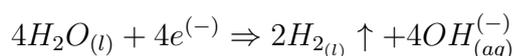
- Wasserstoff kann sich beim Ausströmen entzünden, z. B. durch elektrostatische Vorgänge, insbesondere bei hohen Drücken
- Zur Zündung ist lediglich eine sehr geringe Zündenergie erforderlich, z. B. durch die Reibung von Wassertröpfchen an Wasserstoffgasteilchen oder durch Ableitung der elektrostatischen Ladung von Kleidung
- Beim Ausströmen entsteht eine sehr hohe Geräuschbelastung (Hoher Pfeifton)
- Die unsichtbare Flamme ist über 2000 Grad C heiß und kann in Abhängigkeit vom Ausströmdruck Längen von bis zu 30 m haben; dabei gibt sie nur eine geringe Wärmestrahlung ab. Es besteht deswegen die Gefahr, dass man sich ihr unbewusst zu sehr nähert
- Der Zündbereich von 4-78 Volumen % in Luft ist sehr groß.
- Wasserstoff durchmischt sich intensiv und schnell mit Luft
- Wasserstoff hat ein spontanes Ausbreitungsverhalten im ganzen zur Verfügung stehenden Raum, vor allem an der Decke, da er wesentlich leichter ist als Luft

Berechnung der entstehenden Gase [Voi13]

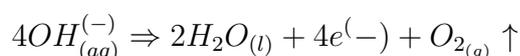
Während der Elektrolyse von Wasser werden Wasserstoff- und Sauerstoffgas freigesetzt. Die Entstehung dieser Gase in einem gleichen System, ohne dass sie getrennt werden, könnte zu einer Knallgasreaktion führen. Aus diesem Grund ist es wichtig, das Volumen des freigesetzten Gase, insbesondere das des Wasserstoffs annähernd zu bestimmen.

Die Wasserelektrolyse in einem alkalischen Medium ohne Zugabe der Bentonitsuspension wird durch folgende Vorgänge beschrieben: [Mor10]

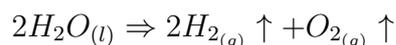
Kathode:



Anode:



Gesamtreaktion:



Mit dem zweiten Faraday'schen Gesetz und der stoffmengenbezogenen Zustandsgleichung für Gase lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem fließenden Strom und der theoretisch erzeugten Gasmenge des Elektrolyseurs herstellen. Das Gasvolumen lässt sich wie folgt berechnen:

$$V = \frac{I \cdot t \cdot R \cdot T}{z \cdot F \cdot p} \quad (7.2)$$

Im folgenden werden die Ergebnisse je nach Stromstärke und Verweildauer der Elektrokoagulation dargestellt:

- Versuch mit 1 Ampere, 30 Minuten:

- $V(H_2)=0,227$ l

- $V(O_2)=0,113$ l

- Versuch mit 2 Ampere, 30 Minuten:

- $V(H_2)=0,454$ l

- $V(O_2)=0,227$ l

Es ist zu erkennen, dass das Volumen an Wasserstoff- und Sauerstoffgas unter Standardbedingungen nur von der Strommenge sowie von der Laufzeit der Elektrolyse abhängt. Je länger die Elektrolyse abläuft bzw. je mehr Strom zugeführt wird, desto mehr Gase entstehen.

Alle Versuche werden im IAN (Gebäude der Ruhr Universität Bochum) auf der Ebene 02 durchgeführt. Es handelt sich um einen offenen Raum mit einem Volumen von ca. $3 \times 3 \times 5 \text{ m}^3$ mit einer kellerartigen Infrastruktur. Dort werden auch andere Versuche aus dem Bereich des Bauingenieurwesens durchgeführt

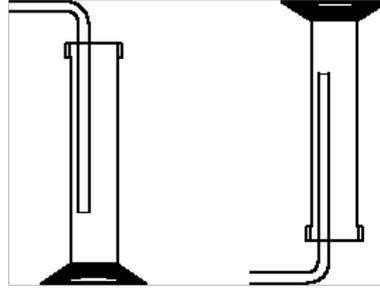


Abbildung 7.7: links: Auffangen eines Gases mit höherer Dichte als Luft; rechts: Auffangen eines Gases mit geringerer Dichte als Luft [Sei]

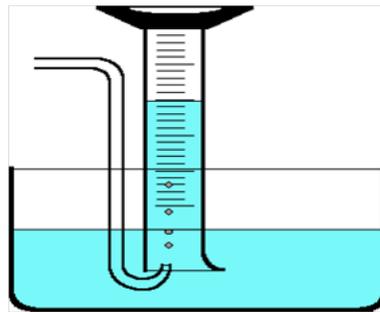


Abbildung 7.8: Pneumatisches Auffangen eines Gases [Sei]

Die Gefährlichkeit des freigesetzten Wasserstoffgases steigt mit seiner Konzentration in der Luft des Raumes wo sie freigesetzt wird und entsprechend auch von der Fläche dieses Raumes. Für die Durchführung eines Versuches (1-2 Ampere, 30 min) werden zwischen $0,0002-0,0006 \text{ m}^3$ Wasserstoffgas freigesetzt. Dies entspricht $0,0009 \%$ der Luftkonzentration des Raumes (45m^3)

Praktische Messung der freigesetzten Gase während der Elektrokoagulation von Bentonit-suspension

Zur Messung des Volumens eines Gases gibt es je nach physikalischen Eigenschaften des Gases verschiedene Möglichkeiten. Ist die Dichte des zu messenden Gases unter Atmosphärendruck geringer als die Luftdichte, so lässt sich das Volumen dieses Gases durch eine einfache pneumatische Messung bestimmen.

Unter „pneumatisch“ wird der Einsatz der Druckluft bei technischen Prozessen verstanden. Wasserstoff- und Sauerstoffgas werden bei der Elektrokoagulation von Bentonitsuspension freigesetzt. Beide Gase haben als Gemisch eine geringere Dichte als Luft und eignen sich damit gut für die pneumatische Messung zur Volumenbestimmung.

Prinzip: Pneumatisches Auffangen von Gasen

Soll das Volumen eines Gases bestimmt werden, kann es einfach in ein Reagenzglas oder in einen Standzylinder eingeleitet werden (Abbildung 7.7). Bei Gasen mit geringerer Dichte als Luft - zum Beispiel bei Wasserstoff - zeigt die Öffnung des Auffangbehälters nach unten. Bei Gasen mit größerer Dichte als Luft zeigt die Öffnung nach oben - zum Beispiel bei Sauerstoff oder Kohlenstoffdioxid.

Bei einer Volumenbestimmung ist zu berücksichtigen, dass Gase bei unterschiedlicher Temperatur und Druck verschiedene Raumgrößen einnehmen. Daher kann eine bestimmte Masse

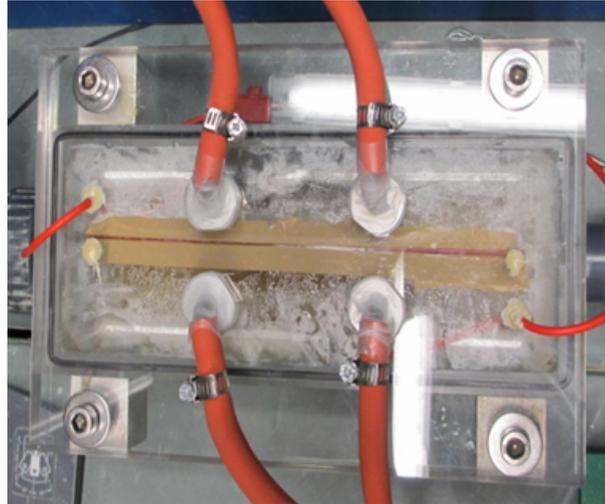


Abbildung 7.9: Deckel für Zelle B - Ansicht von Oben.

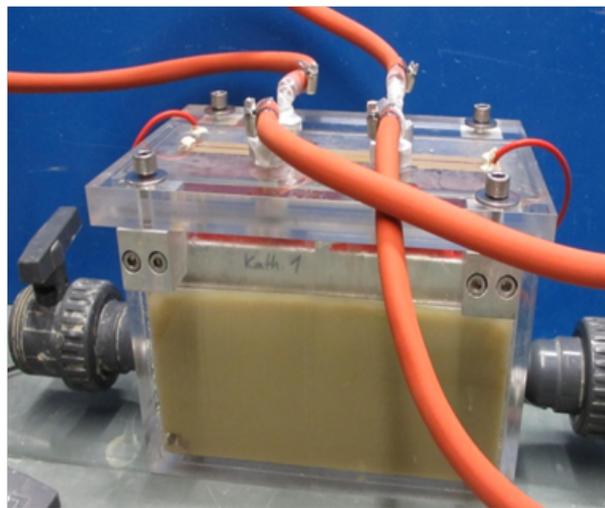


Abbildung 7.10: Zelle B mit eingebautem Deckel.

an Gas unterschiedliche Volumina besitzen. [Sei]

Eine einfache Form zum Messen von Gasvolumen stellt ein Messzylinder dar, der zum pneumatischen Auffangen von Gasen verwendet wird (siehe Abb. 7.8).

Versuchsaufbau

Für das Auffangen der Gase wurde einen Deckel für die Zelle B entworfen. Durch 4 Bohrungen und mithilfe von Glasröhrchen werden die entstehenden Gase in die Messzylinder zur Messung eingeleitet. (siehe. Abb.7.9 und 7.10).

Die Gase, die durch den Schlauch eingeleitet werden, werden in einem kopfüber stehenden Messzylinder aufgefangen. Sobald sich die Gase in den Messzylindern befinden, sinkt der Wasserspiegel aufgrund des Druckes. (Abb.7.9, 7.10 und 7.11)

Versuchsdurchführung

Es wurden folgende Messungen bei den angegebenen Bedingungen durchgeführt. Vor dem



Abbildung 7.11: Absenken des Wasserspiegels im Inneren des Messzylinders nach 30 min Elektrokoagulation von Bentonitsuspension.

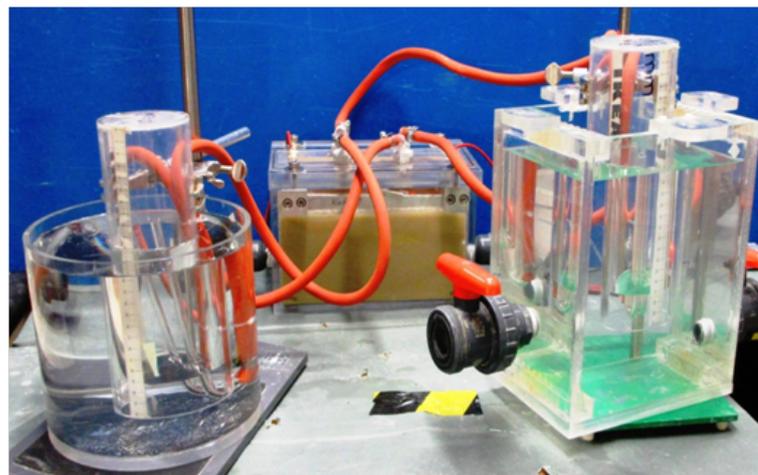


Abbildung 7.12: Gesamter Versuchsaufbau zur pneumatischen Messung der freigesetzten Gase bei der Elektrokoagulation.

Programm	Messungen	Verweildauer [min]	Messzylinder	Stromstärke
Versuch A	2	10	2	2A (mit E)
Versuch B	2	10	2	2A (ohne E)
Versuch C	2	10	1	2A (ohne E)
Versuch D	3	30	2	2A (ohne E)

Tabelle 7.2: Versuchsreihe für die Bestimmung des Gasvolumens während der Elektrokoagulation(EK) für 10 und 30 Minuten Elektrolyse sowie mit und ohne Stromeinstellung (E)

Start des Versuches wurden die Glasröhrchen, Gummischläuche und die Zelle auf Dichtungen überprüft. Der Stand des Wasserspiegels wurde vor und nach der Elektrokoagulation notiert.

Die abgelesene Differenz ΔL wurde anschließend in ml umgerechnet und mit dem ausgerechneten Volumen $V_{theoretisch}$ verglichen.

Die Tabelle 7.2 stellt das Versuchsprogramm dar. Bei der Stromstärke wird es „mit E“ und „ohne E“ definiert. E bedeutet Stromeinstellung. Der Versuch „mit E“ fängt erst an wenn eine konstante Stromstärke von 2A erreicht wird. Der Versuch „ohne E“ startet direkt beim Einschalten der Stromquelle (ca. bei $I=1,7$ A).

Auswertung

Zu jeder Versuchsreihe (A, B, C und D) wurde das theoretische Volumen mit den Bedingungen (Temperatur, Zeit, Stromstärke) jedes Versuches ausgerechnet und mit der Messung verglichen. Es wurde das gesamte Volumen, Wasserstoff und Sauerstoffgas als Mischung gemessen. Eine getrennte Messung war aufgrund des Versuchsaufbaus nicht möglich.

Bei der Versuchsreihe A lag das gemessene Volumen ca. 20% unter dem ausgerechneten theoretischen Volumen. Für die Versuchsreihe B nur noch 16% unter dem ausgerechneten Volumen. Im Gegensatz dazu lagen die gemessenen Volumen bei den Versuchsreihen C und D ca. 10-15% über dem theoretischen Wert.

Ergebnisse und Beobachtungen

- Die Temperatur der Zelle steigt je länger die Elektrokoagulation abläuft.
- Bei längerer EK-Dauer vergrößert sich das Volumen der freigesetzten Gase aufgrund der Temperaturerhöhung und Zeit.
- Je weniger Öffnungen die Zelle für das Einleiten des Gases hat, desto größer und genauer ist das gemessene Volumen.

Mögliche Fehlerquellen

- Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser. Die Löslichkeit von Sauerstoff bei 25 °C und einem Druck von 1 bar liegt bei 40 mg O_2 pro kg Wasser. [len] . Die Löslichkeit steigt mit abnehmender Temperatur und zunehmendem Druck. 40mg % O_2 pro kg Wasser entspricht ca. 31ml O_2 pro kg Wasser bei 25 grad. D.h., dass ein Teil des Sauerstoffgases nicht in die Messzylinder zur Messung gelangt sondern im Wasser gelöst wird.

- Unbekannte Temperatur in der Zelle und im Messzylinder. Aufgrund des Versuchsaufbaus kann die Temperatur in der Zelle sowie im Inneren des Messzylinders nicht gemessen werden. Dies folgt dazu, dass für die Berechnung des Gasvolumens keine genaueren Werte eingesetzt werden.
- Temperaturgradient zwischen Zelle Messzylinder und Umgebung. Während der EK steigt die Temperatur der Zelle proportional zu der Zeit. Dadurch, dass das Volumen der Gase Temperatur abhängig ist, vergrößert sich das Volumen nach 30 min deutlich mehr als nach 10 min EK.
- Gasverlust beim Einleiten des Gases. Je mehr Gummischläuchen und Öffnungen für das Einleiten des Gases verwendet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit eines Verlustes.

Fazit

Die Ergebnisse der praktischen Bestimmung des freigesetzten Gasvolumens während der Elektrokoagulation zeigen im Vergleich zu den theoretischen ausgerechneten Gasvolumen prozentuale Abweichungen zwischen 10 bis 20% je nach Versuchsbedingungen. Bei kurzer Elektrokoagulationsdauer (ca. 10 min) ist der Temperaturanstieg in der EK-Zelle gering und das gemessene Gasvolumen liegt unter dem berechneten Volumen. Bei längerer Elektrokoagulationsdauer liegt das gemessene Gasvolumen oberhalb der berechneten Volumen. Dieser Sprung kann durch die Thermische Zustandsgleichung idealer Gase nach dem ersten Gesetz von Gay-Lussac erklärt werden. Dies besagt, dass das Volumen idealer Gase bei gleichbleibendem Druck (isobare Zustandsänderung) und gleichbleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist.

Die Konzentration des gemessenen Wasserstoffgases in der Luft nach einer Elektrokoagulation von 30 min und 2A liegt bei ca. 0,0013% in Bezug auf dem Laborraum für die Durchführung eines EK-Versuches bei 20-25°C. Diese Konzentration liegt außerhalb des Zündbereiches (4 - 78 Volumen- % in der Luft). Es liegen damit keine Gefahren für die Mitarbeiter vor. Die allgemeinen Sicherheitshinweise und Schutzmaßnahmen des ATEX reichen für die Durchführung des Versuches aus.

Kapitel 8

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Idee des Projektes ist die Anwendung der Elektrokoagulation zur Destabilisierung und Trennung von gebrauchten Bentonitsuspensionen. Die relevanten Parameter der Elektrokoagulationszelle systematisch untersucht und ihre Bandbreite wird bestimmt. Der Aufbau und die Betriebsart der Zelle werden optimiert und weitere Parameter der Bentonitsuspension, wie z.B. Aufladung und Feststoffgehalt, werden mit der optimierten Zelle untersucht. Die folgenden Aspekte fassen den bevorzugten Aufbau einer Elektrokoagulationszelle zusammen:

- Eine würfelförmige Zelle wird bevorzugt, um die Strom- und Spannungsverteilung in der Zelle einheitlich zu halten.
- Elektroden aus Aluminium werden ausgewählt, da die Bentonitsuspension offensichtlich stärker destabilisiert wird als mit Elektroden aus Stahl.
- Stromstärke von 2A ist gegenüber 1A bevorzugt. Mit zunehmender Stromstärke steigt deutlich die Effektivität der Elektrokoagulation.
- Elektrodenabstand von 6,5 cm ist bevorzugt. Je höher der Elektrodenabstand, desto mehr Volumen von Suspension befindet sich zwischen Anode und Kathode, desto effektiver ist die Elektrokoagulation.
- Die Gewinnung von aktiver Elektrodenoberfläche durch den Einsatz von 4 Monopolar-Elektroden gegenüber dem Einsatz von 2 Standard-Elektroden ist offensichtlich vorteilhaft. Die Elektrokoagulation mit 4 Monopolar-Elektroden und Parallelschaltung erzielt eine relevante Erhöhung der Effektivität der Elektrokoagulation. Bei diesem Aufbau der Zelle ist zu berücksichtigen, dass der Elektrodenabstand zwischen 1,5 und 2,5 cm liegt.

Diese Parameter zum Aufbau der Zelle (Al-2A-6,5 cm bei Standard-Elektroden und Al-2A-1,5 bis 2,5 cm bei Monopolar-Elektroden) werden als Parameter der Best-Combination gekennzeichnet.

In den Versuchen zum Aufbau der Zelle wird eine einfache Betriebsart der Zelle angewendet: Ruhe-Zustand (ohne Durchflussströmung). Die Optimierung der Elektrokoagulationszelle wird mit der Untersuchung von weiteren Betriebsarten durchgeführt.

Als Betriebsartparameter werden den Strömungszustand und das Strömungssystem sowie das Reinigungssystem für die Elektroden und die Verweilzeit.

Zwischen den hier untersuchten Strömungszustände (Ruhe-Zustand und kontinuierliche, turbulente oder laminare Strömung) und Strömungssysteme (Rührer und Pumpe) werden Ruhe-Zustand und kontinuierliche laminare Strömung durch eine Pumpe bevorzugt. Die Elektrokoagulation unter laminarer Strömung mit einem Durchfluss von 5 bis 6 l/min ergibt eine Erhöhung der Effektivität gegenüber dem Ruhe-Zustand. Hinsicht der Implementierung der Elektrokoagulation in der Verfahrenstechnik der Separationsanlage ist die laminare als bevorzugte Strömung zu berücksichtigen.

Mechanische und elektrische Mechanismen zur Reinigung der Elektroden haben die Aufgabe, die Anlagerung von Bentonit an der Elektrodenoberfläche und die dementsprechende Verringerung der Effektivität der elektrochemischen Reaktion zu vermeiden. Bei der mechanischen Reinigung wird eine Elektrokoagulationszelle mit einem diskontinuierlichen Reinigungs- und Filtrationssystem simuliert. Die Untersuchungen der Elektrokoagulation mit mechanischer Reinigung ergeben eine deutliche Erhöhung der Effektivität, insbesondere bzgl. des getrennten Bentonits und der Verringerung der Dichte der Restsuspension.

Der Einsatz von der elektrischen Reinigung der Elektroden wird durch Polaritätsumschaltung durchgeführt. Die Polaritätsumschaltung dient als Reinigungsmechanismus der Elektroden, wenn die Zeitintervalle zwischen 60-120 s liegen. Unter diesen Bedingungen ist die Effektivität der Elektrokoagulation sehr gering. Im Gegensatz dazu ist die Effektivität mit Polaritätsumschaltung vergleichbar oder höher als die ohne Polaritätsumschaltung, wenn die Zeitintervalle zwischen 600-900 s liegen. Dabei werden die Elektroden nicht 100 % gereinigt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Betriebsart beide Elektroden aufgelöst werden und ersetzt werden müssen. Aus allem diesem Grunde wird die mechanische Reinigung gegenüber der elektrischen Reinigung bevorzugt.

Bei den vorherigen Versuchsreihen wird eine Verweildauer von 30 min eingesetzt. Weitere Verweildauern (5 bis 90 min) werden analysiert. Die Destabilisierung der Suspension ist linear zur Verweildauer. Die Trennfähigkeit der Elektrokoagulation und die Verringerung der Dichte der Restsuspension sind annähernd linear, aber sie stagnieren nach 30 min. D.h. eine längere Verweildauer führt nicht zu einer höheren Effektivität bzgl. dieser Parameter. Die Stabilität der Restsuspension nach der Elektrokoagulation mit unterschiedlicher Verweildauer wird durch Absetzversuche ebenfalls bestimmt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Destabilisierung mit zunehmender Verweilzeit steigt.

Die Optimierung der Elektrokoagulation durch die Zellenparameter wird mithilfe der Best-Combination Matrix zusammengefasst. Im Folgenden werden die relevanten Aspekte der Optimierung dargestellt.

- Elektrokoagulation im Ruhe-Zustand
 - Mit Standard-Elektroden: Al-2A-6,5 cm
 - Mit Monopolar-Elektroden: Al-2A-1,5 bis 2,5 cm und Parallelschaltung
- Elektrokoagulation unter laminarer Strömung
 - Al-2A-6,5 cm
 - Durchfluss: 5-6 l/min
- Weitere Aspekte zur Betriebsart:
 - Mechanische Reinigung

- Verweilzeit bis 30 min

Durch Absetzversuche wird die Stabilität der Restsuspension aus 3 Elektrokoagulationsversuche der Best-Combination bestimmt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Destabilisierung der Restsuspension gegenüber der von der frischen Suspension offensichtlich stärker ist. Dabei spielt die Absetzzeit eine große Rolle. Die ersten 24 Stunden nach der Elektrokoagulation sind entscheidend: ca. 20% des Volumens der Restsuspension trennt sich als klares Wasser.

Die Ergebnisse der bisher erwähnten Versuche bestätigen die Eignung der Elektrokoagulation zur Destabilisierung und Trennung von Bentonitsuspensionen.

Die Temperaturbedingungen in der Baustelle, wo die Separationsanlage liegt, können die Effektivität der Elektrokoagulation beeinflussen. Es lässt sich zusammenfassen, dass insbesondere die winterlichen Wetterbedingungen in der Baustelle die Effektivität der Elektrokoagulation negativ einwirken. Die niedrigen System- und Suspensionstemperaturen sind ausschließlich bei der Destabilisierung der Suspension vorteilhaft.

Die Ergebnisse der Optimierung der Zelle fließend zu den folgenden Versuchen, wobei den Einfluss der Suspensionseigenschaften auf die Effektivität der Elektrokoagulation bestimmt wird. Bei den bisher erwähnten Versuchsreihen setzen frische Bentonitsuspension W 2,5 % ein. Im Rahmen weiterer Versuche wird sowohl frische Suspension mit unterschiedlichen Konzentrationen als auch aufgeladene bzw. gebrauchte Bentonitsuspension eingesetzt.

Die Untersuchungen der Konzentration ergeben, dass mit zunehmender Konzentration die Leistung der Elektrokoagulation bezüglich der drei Effektivitätsparameter abnimmt.

Die Untersuchungen der Elektrokoagulation mit gebrauchten Bentonitsuspensionen (aus dem Labor und aus der Baustelle) bestätigen die Eignung der Elektrokoagulation als Trennmethode für gebrauchten Bentonitsuspensionen. Hier ist zu betonen, dass sowohl Bentonit als auch Aufladung koaguiert, d.h. der Parameter $B_{kt}\%$ bezieht sich auf koagulierte Substanz (Bentonit und Aufladung). Im Allgemeinen ist der prozentuale Anteil an koagulierter Substanz gleich für frische Suspension W 2,5 % und für gebrauchte Suspension. Der Einfluss der Aufladung auf die Verringerung der Dichte und der Stabilität der Restsuspension ist jedoch negativ.

Bei den Untersuchungen der Elektrokoagulation mit frischen bzw. gebrauchten Bentonitsuspensionen wird ein weiterer Effektivitätsparameter definiert: die absolute Masse an koagulierter Substanz. Bei diesen Versuchen ist zu betonen, dass die absolute Masse an koagulierter Substanz (B_{kt} in g) mit zunehmender Konzentration (g/l) bzw. Trockensubstanz (g /l) steigt. Die Ergebnisse Daher die Eignung der Elektrokoagulation Elektrokoagulation als Trennmethode für gebrauchten Bentonitsuspensionen.

Im Rahmen der AP1 der ersten Projektphase wird den Aufbau und die Betriebsart einer Elektrokoagulationszelle optimiert und die Eignung der Elektrokoagulation als Trennmethode für gebrauchten Bentonitsuspension bestimmt.

Neben den vorherigen Schlussfolgerungen sind weitere Auswirkungen der Elektrokoagulation wie die Massenverlust der Anode und die Entstehung von Gasen bei der Implementierung der Elektrokoagulation in die Verfahrenstechnik der Separation zu berücksichtigen.

Kapitel 9

Implementierung der Elektrokoagulation in die Verfahrenstechnik der Separation

Als Ergebnisse des Arbeitspaketes 2 (Design Verfahrenstechnik) folgt die Analyse des Verfahrensablaufs, Untersuchung möglicher Verfahrensvariante auf ihre Eignung, wie z.B. statisch oder durchströmt und eine Evaluation der Verfahrenstechnik zur Integration des Trennsystems in bestehende Verfahrensabläufe oder zum autarken Betrieb.

Auf der Basis der Ergebnisse des AP1 (Laboruntersuchungen) wurden die praxisrelevanten Einsatzmöglichkeiten der Elektrokoagulation in der Spülsauberung diskutiert und bewertet:

A Elektrokoagulation im Separationskreislauf integriert (rot)

z.B. Elektrokoagulation in den Unterlaufwannen zur Verbesserung des Trennschnittes der Zyklon

B Elektrokoagulation im ausgeschleusten Bereich, als eigene Phase des Separationssystems (blau)

z.B. Elektrokoagulation plus Dekanter

9.1 Evaluation der Einsatzbereiche der Elektrokoagulation

Für einen leistungsfähigen und sicheren Tunnelvortrieb im Mixschildverfahren ist eine qualitativ hochwertige Bentonitsuspension unabdingbar. Im laufenden Betrieb lädt sich die Bentonitsuspension unvermeidbar mit feinsten Feststoffpartikeln, welche vom Trennschnitt der Zyklone abhängen, auf. Mit steigender Projektdauer und Viskosität der Bentonitsuspension wird diese je nach Geologie langsamer oder schneller unbrauchbar.

Wie gut eine Bohrspülung letztendlich die an sie gestellten Anforderungen erfüllen kann, hängt von vielen physikalischen Eigenschaften ab. Diese Eigenschaften müssen regelmäßig überprüft werden. Bei einer Abweichung von den vorgegebenen Sollwerten können so frühzeitig korrigierende Maßnahmen eingeleitet werden. Um die relative Qualität oder Effektivität einer Bohrspülung zu messen, wurden verschiedene physikalische Eigenschaften als Orientierungsgröße festgelegt. Vor Bohrbeginn und während des laufenden Bohrbetriebes müssen diese Eigenschaften bestimmten Anforderungen entsprechen. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft wichtigste Parameter zur Untersuchung der Bentonitsuspensionen vor und während des Betriebes einer

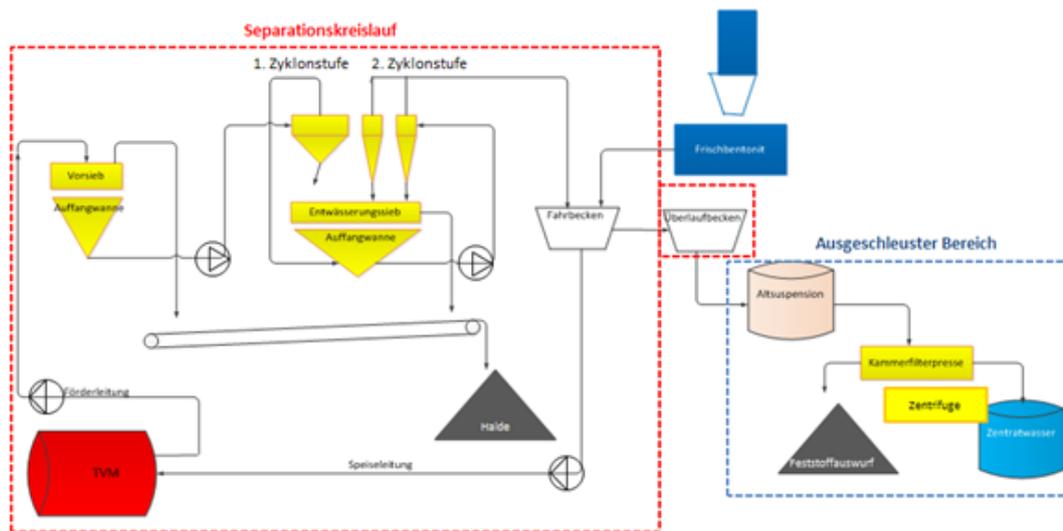


Abbildung 9.1: Fließschema der Spülsauberung mit Separationskreislauf und ausgeschleustem Bereich

TVM. Befinden sich gemessene Werte außerhalb vorgegebener Soll-Bereiche müssen Maßnahmen, wie ausschleusen der gebrauchten Bentonitsuspension und beimischen frischer Bentonitsuspension über die Bentonitmischanlage, ergriffen werden.

9.1.1 Elektrokoagulation im Separationskreislauf integriert

Folgende Tabelle zeigt mögliche Einsatzbereiche der im Separationskreislauf integrierten EK (roter Bereich).

- EK in Unterlaufwanne Zyklonkreislauf
- EK im Fahrbecken oder Überlaufbecken

EK in Unterlaufwanne Zyklonkreislauf

Ziel des Einsatzes einer EK in den Unterlaufwannen des Zyklonkreislaufes ist es, den Trennschnitt der Zyklonstufen zu verbessern und dem System feinste Feststoffe zu entziehen um die Qualität der Bentonitsuspension länger zu gewährleisten (s. Abbildung 9.2). Durch die Bildung größerer Agglomerate und die Koagulation der Feststoffpartikel durch die EK, wie in den Laborversuchen in AP 1 nachgewiesen, könnte dies ermöglicht werden. Im Zyklonkreislauf befinden sich Feststoffe mit Partikelgrößen ca. $\leq 0,5$ bis $\geq 0,03$ mm. Feststoffe $\geq 0,5$ mm trennt der Entwässerungssieb ab und wirft auf ein Förderband. Feinstpartikel $\leq 0,03$ mm gelangen über den Überlauf der 2. Zyklonstufe in das Fahrbecken und werden zurück zur TVM gepumpt.

EK in Fahrbecken, Überlaufbecken

Eine EK im Fahrbecken und / oder im Überlaufbecken könnte der steigenden Dichte der Bentonitsuspension und damit einer Qualitätsverschlechterung der Suspension entgegenwirken, da die feinsten Feststoffpartikel durch EK entzogen werden. Im Bereich des Fahrbeckens befinden sich nur noch Ton- und Schluffpartikel mit Korngrößen $\leq 0,03$ mm im System.

Requirements for the Bentonite

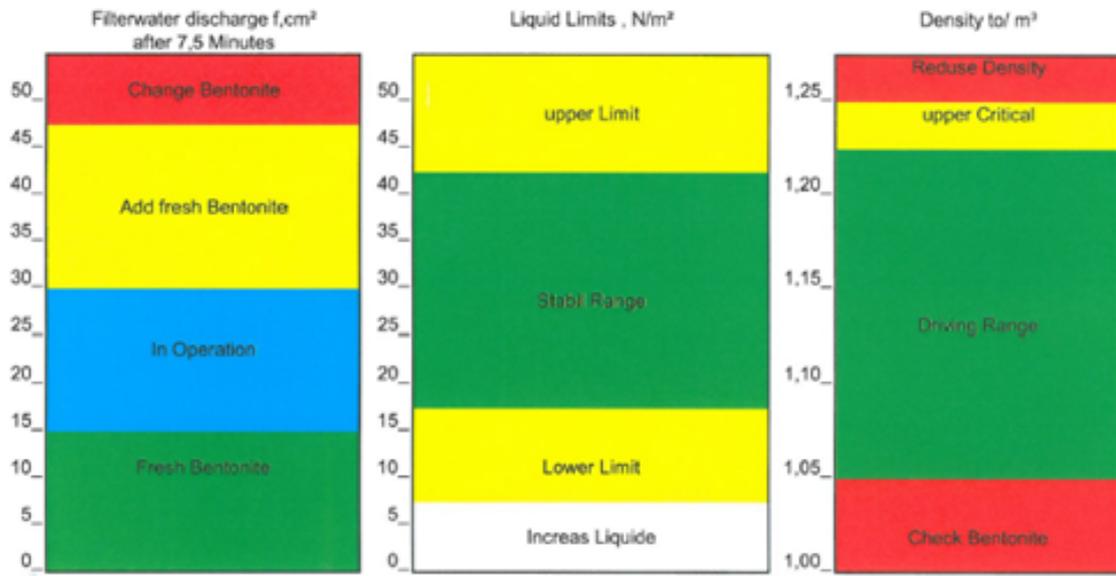


Abbildung 9.2: Arbeitsbereiche von Bentonitsuspensionen vor oder während dem Betrieb

Fazit zum Einsatz der EK im Separationskreislauf

Der Einsatz einer EK im Separationskreislauf (rot) muss insgesamt als unvorteilhaft bezeichnet werden. Entscheidend für den Einsatz im Systembetrieb ist, dass die Qualität der Bentonitsuspension nicht verschlechtert wird und eine sichere Stützung der Ortsbrust der TVM gefährdet wird. Die Laborversuche in AP1 und speziell der Absetzversuch nach EK haben gezeigt, dass eine Destabilisierung durch EK stattfindet, was den Aufbau eines Filterkuchens zur Stützung der Ortsbrust der TVM und einen sicheren Vortrieb auf Dauer unmöglich macht. Ebenfalls von Nachteil für eine effektive EK im Separationskreislauf sind die großen Fördergeschwindigkeiten von bis zu 3-4 m/s in den Rohrleitungen, zwischengeschaltete Kreiselpumpen mit bis 800 U/min was zusätzlich eine vorteilhafte laminare Strömung für EK unmöglich macht. Zudem könnten gebildete, größere Feststoffflocken eventuell wieder zerstört werden und der enorme Durchsatz nicht genügend Reaktionszeit gewährleisten. Des Weiteren befinden sich in der Bentonitsuspension, speziell im Zyklonkreislauf der Separationsanlage, auch Feststoffe mit Korngrößen außerhalb des Ton- und Schluffbereiches von $\leq 0,30 \mu m$ der elektrokoagulierte werden kann. Dies erschwert eine effektive EK.

9.1.2 EK im ausgeschleusten Bereich, als eigene Phase des Separationssystems

Folgende Tabelle zeigt mögliche Einsatzbereiche der EK im ausgeschleusten Bereich (blau).

- EK im Altsuspensionstank
- EK als eigenständiges System in Parallel- oder Reihenschaltung zum Altsuspensionstank
- EK mit Geotube zur Entwässerung

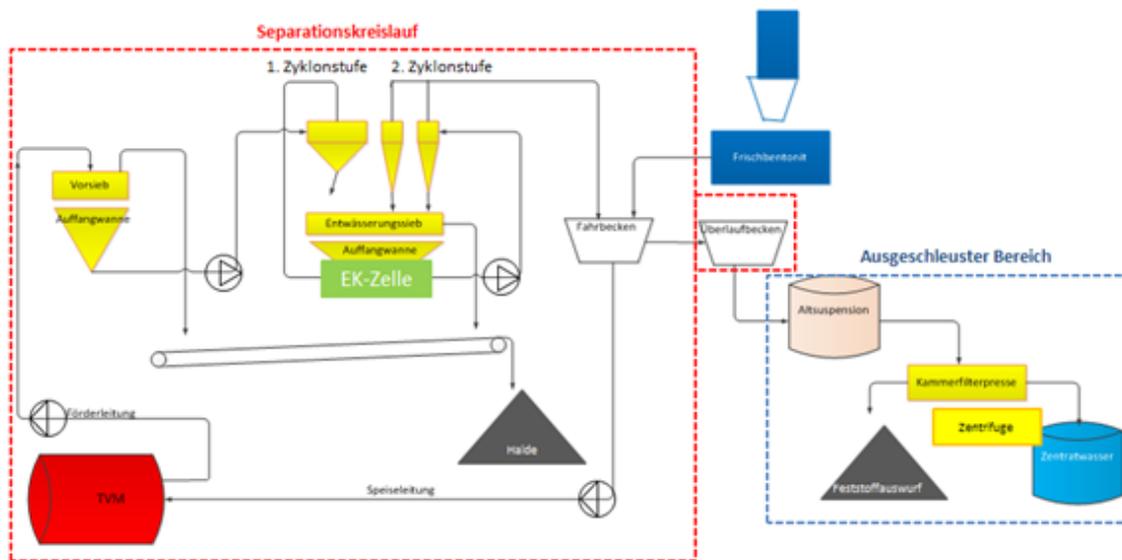


Abbildung 9.3: EK in Unterlaufwannen (Kreislauf 2. Zyklonstufe)

- EK in Kammerfilterpresse / vor Zentrifuge
- EK zur Aufbereitung des Waschwassers nach Reinigung des Siebauswurfs

EK im Altsuspensionstank

Eine EK im Altsuspensionstank bringt gleich mehrere positive Effekte mit sich. Einerseits bewirkt die EK eine Agglomeration feinsten Feststoffteilchen wodurch die nachgeschaltete Kammerfilterpresse oder Zentrifuge durch die Dichtesteigerung im unteren Bereich des Tanks effektiver arbeiten können. Ebenfalls kann davon ausgegangen werden, dass das häufig eingesetzte Flockungshilfsmittel (Bildung langkettiger Polymere) zur Steigerung der Entwässerungsleistung von Zentrifuge oder Kammerfilterpresse ganz oder teilweise eingespart werden kann.

Andererseits bewirkt die EK eine Destabilisierung der Bentonitsuspension wodurch ein enorm attraktiveres und umweltgerechteres Entsorgungssystem entstehen kann (siehe Fazit/Schlussfolgerung).

EK als eigenständiges System in Parallel-, Reihenschaltung zum Altsuspensionstank

Eine EK in Parallel- oder Reihenschaltung zum Altsuspensionstank bringt gleiche positive Effekte wie bereits im Altsuspensionstank beschrieben mit sich. Des Weiteren ergeben sich nun Vorteile durch die Trennung in ein eigenes, unabhängiges System, da nun der Puffer- als auch Reaktionsbehälter voneinander getrennt arbeiten kann. Als nachgeschaltete Systeme zur Entwässerung der koagulierten Suspension sind gleich mehrere Varianten denkbar. Wie bereits in A) beschrieben könnte beispielsweise eine weitere Zyklonstufe eingesetzt werden. Ebenfalls möglich ist ein nachgeschalteter Eindicktank (ähnlich Absetzversuch) welcher vorhandene Zentrifugen oder Kammerfilterpressen leistungssteigernd speist.

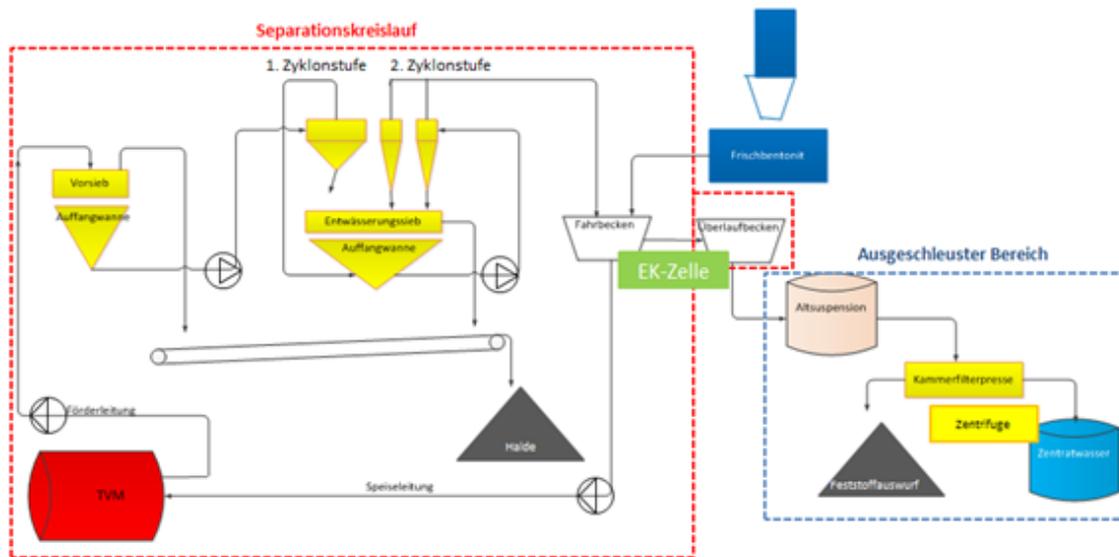


Abbildung 9.4: EK in Fahrbecken/ Überlaufbecken

EK mit Geotube zur Entwässerung

Eine weitere interessante Einsatzmöglichkeit der EK der Altsuspension als eigenständiges System ist die Nachschaltung und Entwässerung der koagulierten und destabilisierten Suspension mittels sogenanntem Geotube-Verfahren, welches bereits erfolgreich zur Entschlammung von Flussbeten oder Seen eingesetzt wird. Durch die in AP1 erwiesene Destabilisierung der Suspension wird dieser Einsatz erst ermöglicht. Hierdurch könnten die kostenintensiven Kammerfilterpressen oder Zentrifugen eingespart werden. Unter Geotube-Verfahren versteht man die Entwässerung mittels wasserdurchlässigen Textilsäcken unter Mithilfe des Eigengewichtes der Füllung. Im Anschluss können die Textilsäcke einfach ausgebaggert und der Feststoff deponiert werden.

EK in Kammerfilterpresse

Durch eine EK direkt in der Kammerfilterpresse, indem die Kammern der Filterpresse als Anode und Kathode ausgeführt sind, kann die Trennleistung der Presse durch die Agglomeration der feinen Ton- und Schluffteilchen im Körnungsbereich 0,03 mm verbessert und beschleunigt werden. Ebenfalls wird eine Einsparung des kostenintensiven Flockungshilfsmittels angepeilt.

EK zur Aufbereitung des Waschwassers nach Reinigung des Siebauswurfs

Ein weiterer möglicher Einsatz der EK ist zur Aufbereitung/ Reinigung des Waschwassers des Siebauswurfs der HSP. Durch das Anhaften von Bentonit und die Verschmutzung durch Schluff und Ton der Siebauswürfe erweist sich die Entsorgung oftmals als schwierig. Ein bereits gereinigter Auswurf auf den Halden wird zur Weiterverwendung bevorzugt.

Dies soll bei einem aktuellen Projekt der Herrenknecht AG eingesetzt werden und durch den Einsatz eines „Waschsiebes“ verwirklicht werden. In den bisherigen Planungen muss das anfallende Schmutzwasser entweder direkt entsorgt, oder über den Einsatz einer kleinen Zentrifuge aufwendig und kostenintensiv gereinigt werden zum erneuten Einsatz. Eine EK soll hierfür

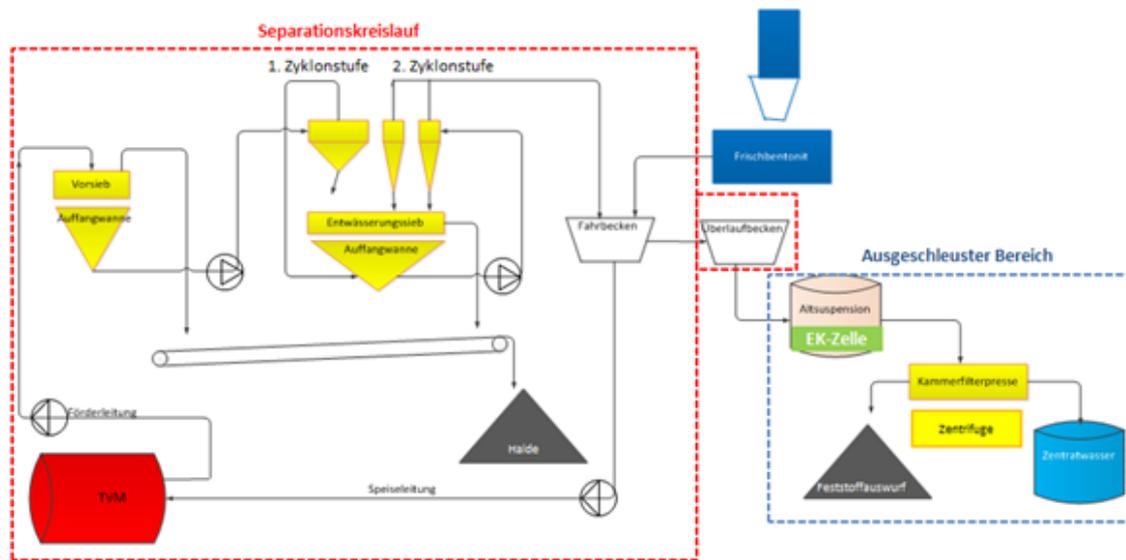


Abbildung 9.5: EK im Altsuspensionstank

Verwendung finden und das Schmutzwasser so aufbereiten, dass es erneut verwendet werden kann.

Fazit zum Einsatz im ausgeschleusten Bereich (blau)

Der Einsatz der EK im ausgeschleusten Bereich bietet effektivere und vielversprechende Einsatzmöglichkeiten, als ein Einsatz im direkten Separationskreislauf.

Die gebrauchte Bentonitsuspension mit feinsten Feststoffpartikeln $\leq 0,03$ mm kann hier effektiv behandelt werden. Mit der aktuellen Trenntechnik können diese Feinstfraktionen nur unter erhöhtem Separations- und Kostenaufwand, wie beispielsweise dem Einsatz von Polymermitteln zur Flockung (Flockungshilfsmittel), als Feststoffauswurf der Zentrifugen oder Kammerfilterpressen gewonnen werden. EK könnte diesen Einsatz an Polymer ganz oder teilweise ersetzen.

Ein weiterer Vorteil ist, dass der ausgeschleuste Bereich der EK ausreichend Behandlungszeit zum Erfolg ermöglicht. Zwar müssen gewisse Durchflussmengen, abhängig der Suspensionsdichte, zum Betrieb der Zentrifugen oder Kammerfilterpressen gewährleistet werden, allerdings sind diese Volumenströme nicht mit denen des Separationskreislaufes zu vergleichen. Auch werden die hohen Strömungsgeschwindigkeiten hier nicht benötigt.

Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Destabilisierung sowie den Ergebnissen des Absetzversuchs. Hierbei entstehen Möglichkeiten der direkten Entsorgung der Altsuspension über Entsorgungsbetriebe. In den folgenden Arbeitspaketen müssen die verschiedenen vorgestellten Einsatzmöglichkeiten des ausgeschleusten Bereichs nun genauer untersucht werden, um deren Eignung zu überprüfen.

Ein weiterer interessanter Aspekt, welcher bereits kurz in „1. EK im Altsuspensionstank“ erwähnt wurde, ergibt sich aus der Destabilisierung der Suspension durch EK.

Dadurch, dass die Bentonitteilchen destabilisiert werden, verliert die Suspension weitestgehend ihre Rheologischen Eigenschaften wie die Thixotropie, die für den Aufbau des Filterkuchens der TVM verantwortlich ist. Entsorgungsbetriebe haben vielfach mit diesem Effekt bei der Entsorgung zu kämpfen, da sich eine selbständige Entwässerung von Bentonitsuspensionen

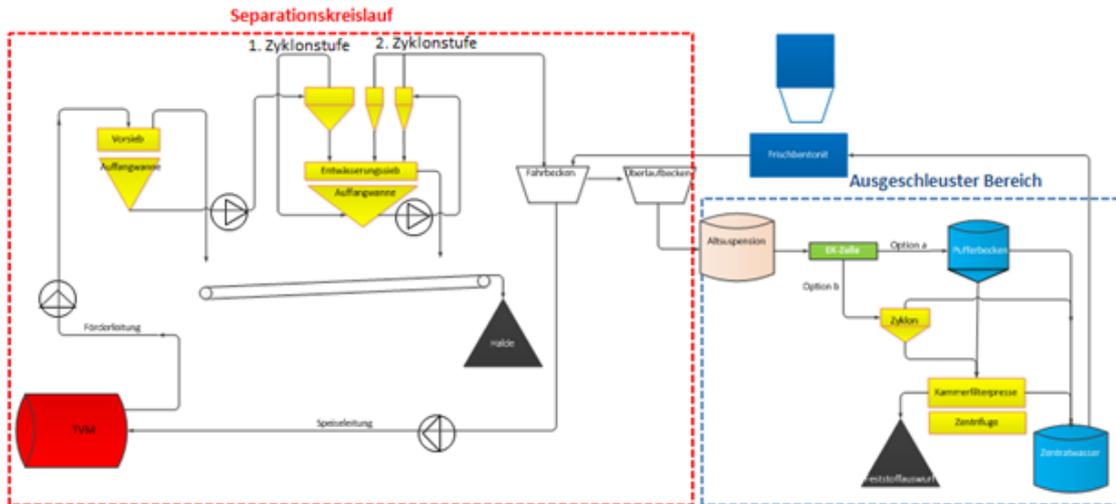


Abbildung 9.6: EK als eigenständiges System



Abbildung 9.7: Geotube-Verfahren

als schwierig und langwierig erweist. Des Weiteren unterscheidet sich die Gesetzgebung zur Entsorgung in vielen Ländern und Bundesländern. Daher rechnet sich der Einsatz von Zentrifugen und Kammerfilterpressen aktuell, da eine direkte Entsorgung des Altbentonits über Tankwagen regional beschränkt und durch die Entsorgungsklassen sehr kostenintensiv ist. Entsorgungskosten von bis zu 150 Eur./m^3 für Altbentonitsuspensionen sind keine Seltenheit und müssen in der nächsten Phase des Projekts bei der Ermittlung des ökologischen Nutzens berücksichtigt werden. Durch EK könnte sich die Entsorgungssituation entscheidend ändern und ein Vorteil für Betreiber der Separationsanlage und auch Entsorger darstellen.

Als weiteres Ziel des AP2 wurden die beiden Leistungsstufen der Elektrokoagulation analysiert.

- Destabilisierung der Bentonitsuspension
- Vollständige Trennung des koagulierten Bentonits zur Wiederverwendung

9.2 Analyse der Leistungsstufen der EK

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen in AP1 haben gezeigt, dass EK ein effektives Trennverfahren zur Destabilisierung von Bentonitsuspensionen darstellt. Diese Destabilisierung macht sich speziell in den beschriebenen Absetzversuchen im Labor deutlich. Die ursprüngliche Thixotropie der Bentonitsuspension wird durch EK weitestgehend aufgehoben und die Rheologischen Eigenschaften deutlich beeinflusst.

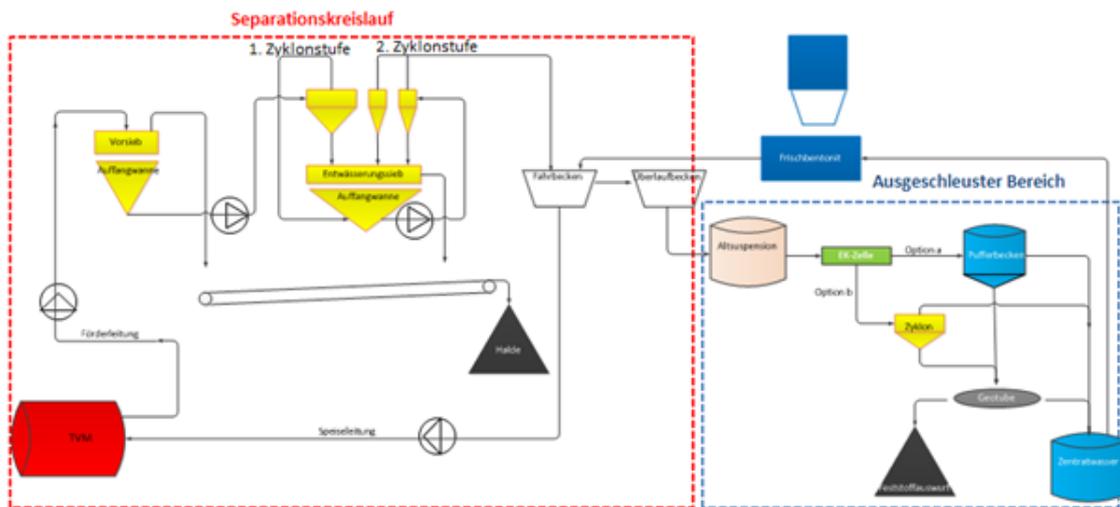


Abbildung 9.8: EK mit Geotube

In weiterführenden Versuchen mit einer mit Bodenpartikeln aufgeladenen Bentonitsuspension, aus der Baustellenpraxis, hat sich zudem gezeigt, dass sowohl Bentonit als auch die Aufladung (Schluff- und Tonpartikel) koagulieren und sich an der Anode anlagert oder im System absinkt.

EK ist somit ebenfalls ein effektives Trennverfahren für aufgeladene Bentonitsuspensionen, wie sie in der Baustellenpraxis angetroffen wird.

Diese Erkenntnisse, aus den Versuchen mit aufgeladenen Bentonitsuspensionen, erschweren die ursprüngliche Zielsetzung des Forschungsvorhabens zur vollständigen Trennung/ Rückgewinnung des koagulierten Bentonits zur Wiederverwendung. Trotz dessen, soll diese Zielsetzung weiterhin verfolgt und in weiteren Versuchen, parallel zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten bewertet und untersucht werden. Um diese koagulierten Bentonitpartikel von der Aufladung zu trennen, sind weitere Forschungen in der kommenden Projektphase notwendig.

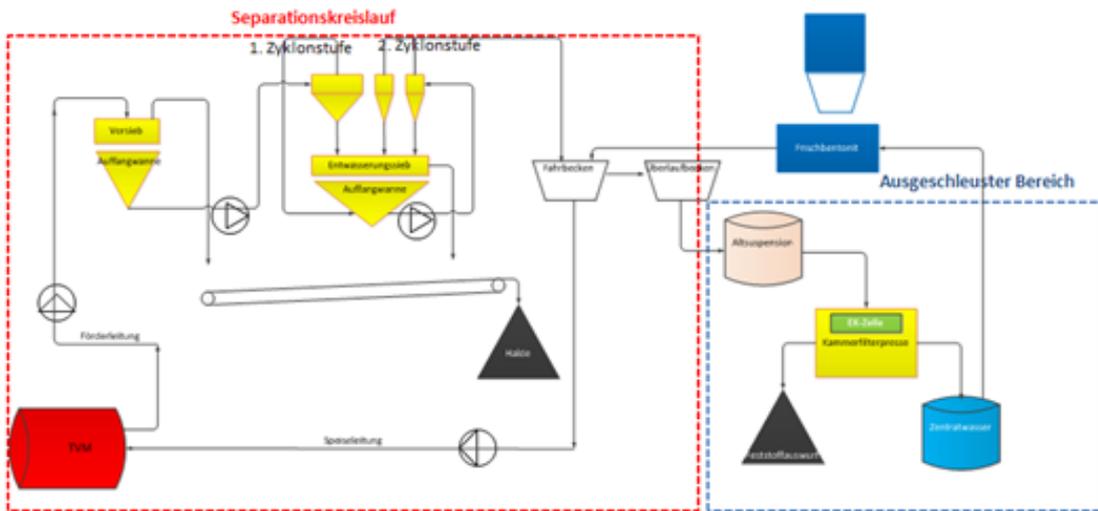


Abbildung 9.9: EK in Kammerfilterpresse

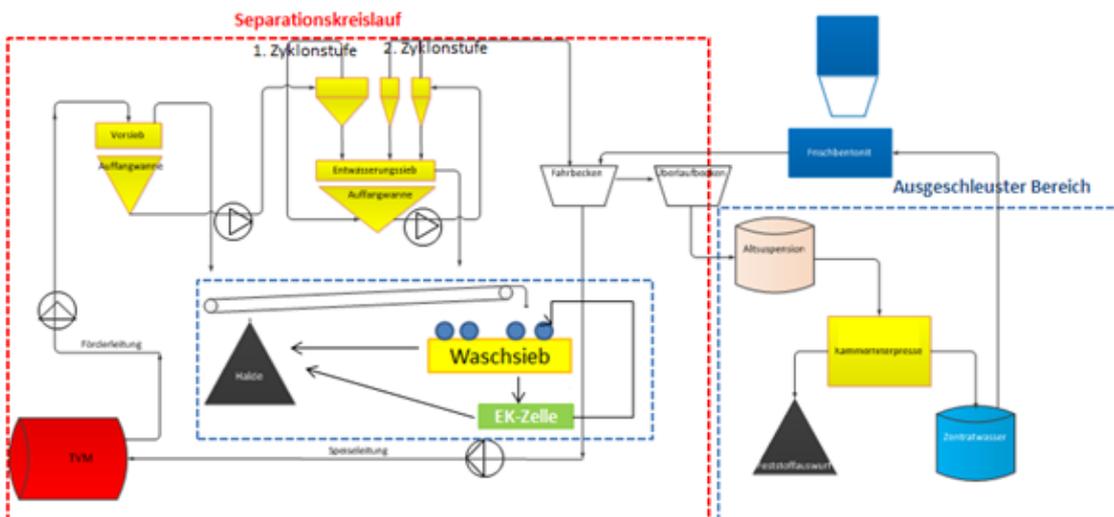


Abbildung 9.10: EK zur Aufbereitung des Waschwassers Siebauswurf

Kapitel 10

Ausblick

Die Zielstellung der zweiten Antragsphase ist die Überführung der Elektrokoagulationstechnik vom kleinen Labormaßstab in einen Maßstab, der die technischen Anforderungen der Tunnelvortriebs-Praxis erfüllt, wie. z.B. große Durchflussmengen, inhomogenes Bodenmaterial von feinkörnigem, „klebrigem“ Ton über Sande zu grobkörnigen Kiesen in der Suspension, etc. Es werden dabei grundsätzlich zwei Einsatzfälle für die Elektrokoagulationstechnik unterschieden. Im ersten Fall werden spezielle Elektrokoagulationszellen an definierten Punkte innerhalb des Separationskreislaufs zur Unterstützung der bestehenden Trenntechnik eingesetzt, wie z.B. bei Kammerfilterpresse und Hydrozyklonen (Abbildung 10.1). Das Optimierungspotential der Elektrokoagulationstechnik auf diese Trenntechniken können im Labor eigenständig untersucht werden. Im zweiten Fall wird die Elektrokoagulation als stand-alone Anlage die Trennung der verwendeten Suspension realisieren. Es gilt hierbei, den Anforderungen aus der Praxis hinsichtlich Verweildauer in der Zelle, Trennpotential in Abhängigkeit von der Einwirkzeit, erforderliche Durchflussmenge usw. gerecht zu werden.

Abbildung 10.1: Aufbau des Separationskreislaufs und Einbindung der Elektrokoagulationstechnik Unter Berücksichtigung und Umsetzung der wesentlichen Randbedingungen erfolgen die Konstruktion und der Bau eines kleinmaßstäblichen Praxisprototyp (AP 3). Mithilfe der Praxisprototypen werden anwendungsorientierte Laborversuche zum grundsätzlichen Nachweis der Eignung des Systems für die Baustelle und zur Untersuchung möglicher Optimierungspotentiale durchgeführt (AP 4). Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen fließen direkt in die Entwicklung und den Bau eines großmaßstäblichen Baustellen-Prototypen ein (AP 5). Dieser soll auf einer geeigneten Baumaßnahme sowohl im Parallelbetrieb zu dem bestehenden Separationsverfahren (AP 6) als auch eigenständig betrieben werden (AP 7). Abschließend soll eine wissenschaftliche Analyse die Einsätze aus den Praxistests unter technischen, verfahrenstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten bewerten (AP 8).

Zur Erfüllung dieser Zielstellung sind die Arbeitspakete AP 3, AP 4, AP 5 und AP 6 erforderlich. Diese bilden die Projektphase 2.

Im AP 3 erfolgen die Konstruktion und der Bau eines labortauglichen, kleinmaßstäblichen Praxisprototyp unter Berücksichtigung der wesentlichen Randbedingungen aus der Tunnelvortriebspraxis und den grundlegenden Erkenntnisse zur Elektrokoagulation aus der Projektphase 1. Mithilfe der Praxisprototypen werden anwendungsorientierte Laborversuche zum grundsätzlichen Nachweis der technischen Eignung des Systems für die Vortriebsbaustelle und zur Untersuchung möglicher Optimierungspotentiale durchgeführt (AP 4). Dabei werden beide Verfahrensvarianten „Unterstützung der bestehenden Separationstechnik“ und „Stand-alone Anlage“ dezidiert untersucht. Begleitend zu den Versuchsreihen mit den Praxisprototypen wird eine

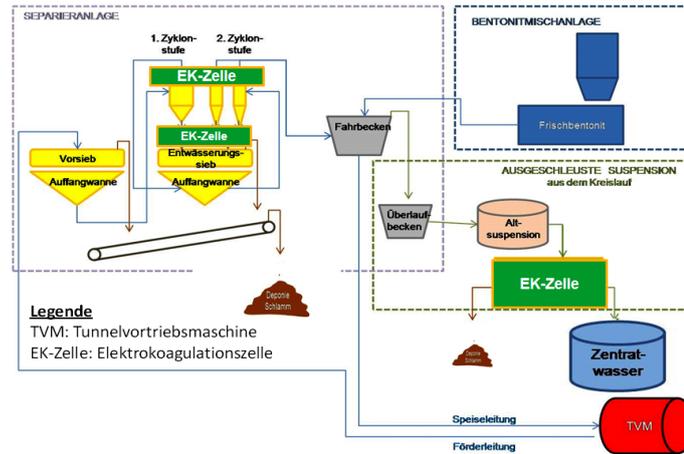


Abbildung 10.1: Aufbau des Separationskreislaufs und Einbindung der Elektrokoagulationstechnik.

Ökobilanzierung (AP 5) zur Bewertung der Auswirkungen des neu entwickelten Trennverfahrens auf die Umwelt durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen fließen direkt in die Entwicklung und den Bau eines großmaßstäblichen Baustellen-Prototypen ein (AP 6).

Dieser soll im Rahmen der Phase 3 auf einer geeigneten Baumaßnahme sowohl im Parallelbetrieb zu dem bestehenden Separationsverfahren (AP 7) als auch eigenständig betrieben werden (AP 8). Abschließend soll eine wissenschaftliche Analyse die Einsätze aus den Praxistests unter technischen, verfahrenstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten bewerten (AP 9). Die Phase 3 verdeutlicht an dieser Stelle den Weg einer vollständigen und konsequenten Umsetzung dieses ambitionierten Projekts.

Kapitel 11

Anhang

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	$\Delta\rho$ (%)	ΔFW (%)_M
EMAS-A	1A_Stahl_3,5cm	19,80	17,81	15,45
EMAS-A	1A_Stahl_4,5cm	20,40	18,28	13,64
EMAS-A	1A_Stahl_2,5cm	19,80	14,89	18,18
EMAS-A	1A_Stahl_1,5cm	18,80	13,86	7,27
EMAS-A	1A_Stahl_5,5cm	26,80	33,90	30,72
EMAS-A	1A_Stahl_6,5cm	27,80	43,20	34,04
EMAS-A	2A_Stahl_3,5cm	31,40	33,94	25,41
EMAS-A	2A_Stahl_0,5cm	14,60	11,29	15,46
EMAS-A	2A_Stahl_2,5cm	29,60	41,16	38,02
EMAS-A	2A_Stahl_1,5cm	24,00	36,12	22,76
EMAS-A	1A_Stahl_0,5cm	11,60		6,83
EMAS-A	1A_Al_3,5cm	18,40	16,55	34,55
EMAS-A	1A_Al_4,5cm	21,60	24,21	54,55
EMAS-A	1A_Al_2,5cm	17,00	16,17	31,82
EMAS-A	1A_Al_1,5cm	16,80	9,93	20,77
EMAS-A	1A_Al_5,5cm	26,00	48,43	20,11
EMAS-A	1A_Al_6,5cm	28,00	53,44	36,03
EMAS-A	2A_Al_3,5cm	31,40	57,74	46,65
EMAS-A	2A_Al_0,5cm	14,60	18,77	26,74
EMAS-A	2A_Al_2,5cm	31,20	60,95	52,62
EMAS-A	2A_Al_1,5cm	19,80	27,30	34,70
EMAS-A	1A_Al_0,5cm	12,00	4,96	5,51

Abbildung 11.1: Effektivitätsparameter EMAS A

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	$\Delta\rho$ (%)	ΔFW (%)_M
EMAS-B	2A_Stahl_6,5cm	45,20	54,18	48,18
EMAS-B	2A_Al_6,5cm	42,40	57,74	77,27
EMAS-B	2A_Stahl_5,5cm	39,20	48,63	49,09
EMAS-B	2A_Al_5,5cm	36,40	50,81	76,36
EMAS-B	2A_Stahl_4,5cm	35,80	29,35	37,27
EMAS-B	2A_Al_4,5cm	32,80	46,19	70,00
EMAS-B	2A_Stahl_3,5cm	32,00	34,64	66,37
EMAS-B	1A_Stahl_6,5cm	32,00	30,91	33,64
EMAS-B	1A_Stahl_5,5cm	30,80	26,49	31,82
EMAS-B	1A_Stahl_4,5cm	29,20	17,66	24,55
EMAS-B	2A_Al_3,5cm	29,00	43,20	68,13
EMAS-B	1A_Al_6,5cm	28,60	29,35	50,00
EMAS-B	1A_Al_5,5cm	28,20	28,08	42,73
EMAS-B	1A_Stahl_3,5cm	27,60	26,37	20,91
EMAS-B	1A_Al_4,5cm	27,40	23,09	42,73
EMAS-B	2A_Stahl_2,5cm	27,20	24,83	49,74
EMAS-B	2A_Al_2,5cm	26,20	30,24	57,62
EMAS-B	1A_Al_3,5cm	26,20	16,95	31,35
EMAS-B	2A_Stahl_1,5cm	25,80	23,64	31,35
EMAS-B	2A_Al_1,5cm	23,20	22,08	45,45
EMAS-B	1A_Stahl_2,5cm	22,60	15,12	17,34
EMAS-B	1A_Al_2,5cm	21,60	9,69	32,22
EMAS-B	1A_Al_1,5cm	20,60	0,00	26,09
EMAS-B	2A_Al_0,5cm	19,00	19,87	28,18
EMAS-B	1A_Stahl_1,5cm	19,00	0,00	12,08
EMAS-B	2A_Stahl_0,5cm	18,80	7,09	14,55
EMAS-B	1A_Al_0,5cm	14,80	4,51	15,45
EMAS-B	1A_Stahl_0,5cm	13,20	2,36	4,20

Abbildung 11.2: Effektivitätsparameter EMAS B

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	$\Delta\rho$ (%)	ΔFW (%)_M
Monopolar	B_2EP_2A_1,5cm_P	45,00	48,08	155,45
Monopolar	B_2EP_1A_2,5cm_P	44,20	47,73	66,36
Monopolar	B_2EP_2A_2,5cm_P	43,80	61,36	128,18
Monopolar	B_2EP_1A_1,5cm_P	43,00	46,81	82,73
Monopolar	B_2EP_2A_2,5cm_S	42,20	54,72	84,55
Monopolar	B_2EP_2A_1,5cm_S	38,80	58,14	93,64
Monopolar	B_2EP_2A_2,5cm_S	38,00	56,25	188,18
Monopolar	B_2EP_1A_2,5cm_S	36,00	42,00	80,91
Monopolar	B_2EP_1A_1,5cm_S	32,60	36,17	67,27
Monopolar	B_2EP_1A_2,5cm_S	32,00		68,18
Monopolar	B_1EP_2A_2,5cm	26,20	30,24	63,64
Monopolar	B_1EP_2A_1,5cm	23,20	22,08	45,45
Monopolar	B_1EP_1A_2,5cm	21,80	9,69	37,27
Monopolar	B_1EP_1A_1,5cm	20,60	0,00	30,91
Monopolar	B_1EP_1A_1,5cm	18,00	11,54	20,00

Abbildung 11.3: Effektivitätsparameter Monopolar-Elektroden Zelle B

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	$\Delta\rho$ (%)	ΔFW (%)_M
KTSR	1A_Alu_0,5	11,60	6,98	19,80
KTSR	1A_Alu_0,5	11,60	13,95	15,84
KTSR	1A_Alu_1,5	15,40	20,45	28,71
KTSR	1A_Alu_1,5	18,00	26,32	29,70
KTSR	1A_Alu_1,5	16,20	30,23	41,58
KTSR	1A_Alu_2,5	13,40	20,00	34,65
KTSR	1A_Alu_2,5	17,60	22,73	30,69
KTSR	1A_Alu_2,5	18,60	19,05	30,69
KTSR	1A_Alu_3,5	16,00	26,09	35,64
KTSR	1A_Alu_4,5	16,60	24,44	33,66
KTSR	1A_Alu_4,5	16,60	23,81	35,64
KTSR	1A_Alu_5,5	18,00	28,26	30,69
KTSR	1A_Alu_6,5	18,00	27,91	38,61
KTSR	2A_Alu_0,5	15,20	23,26	33,66
KTSR	2A_Alu_0,5	15,20	28,89	30,69
KTSR	2A_Alu_1,5	24,60	33,33	52,48
KTSR	2A_Alu_1,5	27,80	40,91	59,41
KTSR	2A_Alu_2,5	25,20	30,95	48,51
KTSR	2A_Alu_2,5	29,00	44,44	56,44
KTSR	2A_Alu_3,5	31,00	50,00	62,38
KTSR	2A_Alu_3,5	29,40	52,17	61,39
KTSR	1A_St_0,5	17,20	15,91	10,89
KTSR	1A_St_0,5	15,40	16,28	6,93
KTSR	1A_St_1,5	18,20	19,57	8,91
KTSR	1A_St_2,5	17,60	23,91	11,88
KTSR	1A_St_2,5	18,60	22,22	9,90
KTSR	1A_St_2,5	18,60	16,67	10,89
KTSR	1A_St_3,5	18,80	20,45	10,89
KTSR	1A_St_4,5	18,40	22,22	13,86
KTSR	1A_St_5,5	18,00	22,22	10,89
KTSR	1A_St_6,5	18,60	20,93	14,85
KTSR	2A_St_0,5	18,20	18,60	7,92
KTSR	2A_St_1,5	29,80	30,95	25,74
KTSR	2A_St_2,5	30,00	34,09	25,74
KTSR	2A_St_3,5	30,20	48,89	26,73

Abbildung 11.4: Effektivitätsparameter KTSR-Zelle A

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
KTSP	1A_Alu_0,5	5,60	13,33	10,89
KTSP	1A_Alu_1,5	6,93	13,33	11,88
KTSP	1A_Alu_1,5	7,07	11,36	8,91
KTSP	1A_Alu_2,5	10,67	17,78	4,95
KTSP	1A_Alu_2,5	9,60	15,56	6,93
KTSP	1A_Alu_3,5	10,00	15,56	5,94
KTSP	1A_Alu_4,5	11,33	21,74	9,90
KTSP	1A_Alu_5,5	12,40	19,05	9,90
KTSP	1A_Alu_6,5	14,13	18,60	9,90
KTSP	2A_Alu_0,5	12,67	22,22	20,79
KTSP	2A_Alu_0,5	8,27	16,28	15,84
KTSP	2A_Alu_1,5	16,40	31,11	26,73
KTSP	2A_Alu_1,5	16,67	27,91	28,71
KTSP	2A_Alu_2,5	18,53	28,89	27,72
KTSP	2A_Alu_2,5	18,53	33,33	28,71
KTSP	2A_Alu_3,5	18,27	37,78	27,72
KTSP	1A_St_0,5	9,07	13,64	0,99
KTSP	1A_St_1,5	10,27	16,28	2,97
KTSP	1A_St_1,5	11,87	21,74	0,99
KTSP	1A_St_2,5	11,47	13,95	0,99
KTSP	1A_St_3,5	11,73	13,95	0,00
KTSP	1A_St_4,5	13,20	20,00	2,97
KTSP	1A_St_5,5	13,20	22,22	0,99
KTSP	1A_St_6,5	14,00	23,91	1,98
KTSP	2A_St_0,5	17,33	26,09	7,92
KTSP	2A_St_1,5	17,60	27,27	16,83
KTSP	2A_St_2,5	19,60	32,61	11,88
KTSP	2A_St_3,5	20,53	33,33	14,85

Abbildung 11.5: Effektivitätsparameter KTSP-Zelle A

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)_2l	Δp (%)_2l	ΔFW (%)_M_2l
Lam. Strömung	C_2A_LS4,2	42,93	44,00	73,64
Lam. Strömung	B_2A_RZ	42,40	57,74	77,27
Lam. Strömung	C_2A_RZc	40,80	58,49	82,73
Lam. Strömung	C_2A_RZd	40,00	56,00	96,36
Lam. Strömung	C_2A_RZb	38,60	53,33	93,64
Lam. Strömung	C_2A_LS6b	36,93	53,85	70,00
Lam. Strömung	C_2A_LS3,2	36,93	40,00	64,55
Lam. Strömung	C_2A_LS2b	36,53	39,22	80,91
Lam. Strömung	C_2A_LS2c	35,60	43,40	60,00
Lam. Strömung	C_2A_LS6c	35,47	56,00	80,00
Lam. Strömung	C_2A_LS3,2b	35,33	37,25	73,64
Lam. Strömung	C_2A_LS3,2c	35,20	47,17	68,18
Lam. Strömung	C_2A_LS2	34,80	50,98	74,55
Lam. Strömung	C_2A_LS4,2c	34,53	45,28	68,18
Lam. Strömung	C_2A_LS5	34,53	46,94	78,18
Lam. Strömung	C_2A_LS5b	33,87	51,02	83,64
Lam. Strömung	C_2A_LS6	33,60	48,08	73,64
Lam. Strömung	C_2A_LS4,2b	33,60	40,00	70,00
Lam. Strömung	C_2A_LS2d	33,20	34,55	53,64
Lam. Strömung	C_2A_LS3,2d	32,67	52,73	74,55
Lam. Strömung	C_2A_LS5c	31,87	52,00	78,18
Lam. Strömung	C_2A_RZ	21,60	56,25	77,27

Abbildung 11.6: Effektivitätsparameter Laminare Strömung Zelle C

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
mech. Reinigung	B_	42,40	57,74	77,27
mech. Reinigung	B_R05_	37,20	65,22	115,45
mech. Reinigung	B_R10_	36,80	59,09	97,27
mech. Reinigung	B_R05_AW	38,00	53,33	85,45
mech. Reinigung	B_R05_BE_	51,00	88,64	83,64
mech. Reinigung	B_R10_AW	37,00	55,56	88,18
mech. Reinigung	B_R05_BE_AW	47,80	82,22	95,45
mech. Reinigung	B_R10_BE_AW	47,80	81,82	80,91
mech. Reinigung	B_R10_BE_	49,00	81,82	80,91
mech. Reinigung	B_	40,60	70,45	81,82

Abbildung 11.7: Effektivitätsparameter Mechanische Reinigung der Elektroden

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
Verweildauer	B_VD_05	14,00	13,33	6,36
Verweildauer	B_VD_10	22,60	33,33	36,36
Verweildauer	B_VD_15	29,20	42,22	47,27
Verweildauer	B_VD_20	34,20	52,17	72,73
Verweildauer	B_VD_25	39,20	63,27	72,73
Verweildauer	B_VD_30	40,60	70,45	82,73
Verweildauer	B_VD_60	39,00	65,38	180,91
Verweildauer	B_VD_90	41,40	66,00	218,18

Abbildung 11.8: Effektivitätsparameter Verweildauer

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
Temperatur	4,6	34,00	37,93	100,00
Temperatur	9,3	36,20	39,29	96,36
Temperatur	11,8	37,40	42,86	101,82
Temperatur	15,7	40,00	50,00	92,73
Temperatur	16,5	40,40	53,85	107,27
Temperatur	20,2	40,60	70,45	81,82
Temperatur	21,4	42,40	57,74	77,27

Abbildung 11.9: Effektivitätsparameter System- und Suspensionstemperatur

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
Temperatur	4,6	34,00	37,93	100,00
Temperatur	9,3	36,20	39,29	96,36
Temperatur	11,8	37,40	42,86	101,82
Temperatur	15,7	40,00	50,00	92,73
Temperatur	16,5	40,40	53,85	107,27
Temperatur	20,2	40,60	70,45	81,82
Temperatur	21,4	42,40	57,74	77,27

Abbildung 11.10: Effektivitätsparameter System- und Suspensionstemperatur

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
Konzentration	B_W_2,5	42,40	57,74	77,27
Konzentration	B_W_3	41,67	53,57	70,71
Konzentration	B_W_3,5	40,86		69,57
Konzentration	B_W_3,5_b	39,86	47,06	70,65
Konzentration	B_W_4	39,25	40,30	59,30
Konzentration	B_W_4,5	41,67	46,15	74,36
Konzentration	B_W_4,5_b	43,67	54,88	69,23

Abbildung 11.11: Effektivitätsparameter Konzentration der Suspension W

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	Δp (%)	ΔFW (%)_M
Aufladung Labor	W 2,5	42,40	57,74	77,27
Aufladung Labor	W 2,5_Sand	40,74	54,53	106,80
Aufladung Labor	W 2,5_Kaolin	50,46	33,06	37,04
Aufladung Labor	W 2,5_Schluff	41,78	32,65	60,61

Abbildung 11.12: Effektivitätsparameter Aufladung aus dem Labor

Versuchsreihe	Code	Bkt / Bo (%)	$\Delta\rho$ (%)	ΔFW (%)_M
Aufladung Danzig	Alt-BS_EK	7,51	10,22	8,04
Aufladung Danzig	Alt-BS_EK R05BE	11,99	11,92	10,55
Aufladung Danzig	Farhbecken-BS_EK	34,23	21,73	11,83
Aufladung Danzig	Farhbecken-BS_EK Monopolar	47,63		26,88
Aufladung Danzig	Farhbecken-BS_EK R05BE	37,71	18,94	11,83
Aufladung Danzig	Feinsieb-BS_EK	28,43	24,69	12,50
Aufladung Danzig	Feinsieb-BS_EK Monopolar	47,33	32,27	39,77
Aufladung Danzig	Feinsieb-BS_EK R05BE2	35,73	21,34	13,64
Aufladung Danzig	Frisch-BS_EK	18,13	12,44	21,43
Aufladung Danzig	Frisch-BS_EK Monopolar	32,34	24,38	50,00
Aufladung Danzig	Frisch-BS_EK R05BE	24,47	17,41	23,81
Aufladung Danzig	Vorsieb-BS_EK	32,26	22,93	10,75
Aufladung Danzig	Vorsieb-BS_EK Monopolar	51,14	28,18	26,88
Aufladung Danzig	Vorsieb-BS_EK R05BE	38,57	19,61	12,90

Abbildung 11.13: Effektivitätsparameter Aufladung aus Danzig

Literaturverzeichnis

- [Bar01] Bard: *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. 2001.
- [Bea04] Beagles: *Electrocoagulation (EC)- Science and Applications*, May 2004. <http://www.eco-web.com/edi/050526.html>.
- [Beb06] Bebeslea: *Electrocoagulation applications on organic load and suspended solids removal from wastewater*. Symposium on Analytical and Environmental Problems, 13:101–105, 2006.
- [Ben99] Benedix: *Chemie für Bauingenieure*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1999.
- [Bie10] Biermann: *Untersuchungen zur Trennung von gebrauchten Bentonitsuspensionen in die Bestandteile Bentonit und Wasser für eine kostengünstige Entsorgung auf der Baustelle*. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- [Bir09] Birdi: *Handbook of surface und colloid chemistry*. 2009.
- [Cae11] Caenn: *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. 2011.
- [Can07] Canizares: *Coagulation and electrocoagulation of wastes polluted with colloids*. Separation Science and Technology, 42:21572175, 2007.
- [Che00a] Chen: *Electrocoagulation and electrofiltration of restaurant wastewater*. Journal of Environmental Engineering, 126:858–863, 2000.
- [Che00b] Chen: *Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation*. Separation and Purification Thechnology, 19:65–76, 2000.
- [dEayE] Electrocatalisis, Grupo de Electroquímica aplicada y: *Dossier Electrocoagulación*. Technischer Bericht, Instituto de Electroquímica, Universidad de Alicante, Spain.
- [Den65] Denaro: *Elementary electrochemistry*. Washington, Butterworths, 1965.
- [Don09] Donini: *The operating costs of electrocoagulation*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 72:1007–1012, 2009.
- [Fey08] Feyrer: *Wasserstoff und dessen Gefahren*. Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren, 2008.
- [FGH⁺07] Frondel, M., P. Grösche, D. Huchtemann, A. Oberheitmann, J. Peters und G. Angerer: *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*. Technischer Bericht, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2007.

- [Fle09] Flegel: *Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik*. 2009.
- [Ghe08] Ghernaout: *Effect of pH on electrocoagulation of bentonite suspensions in batch using iron electrodes*. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 29:1272–1275, 2008.
- [Gmb98] GmbH, IBECO Bentonit Technologie: *Bentonit im Tiefbau, Ein Handbuch für die Praxis*. 1998.
- [Gro02] Grohs: *Wirtschaftliche Regeneration der Bohrtrübe beim Auffahren des Wesertunnels*. *Aufbereitungs Technik*, 43:30–37, 2002.
- [Ham] Hamann, C. H.: *Elektrochemie*. WILEY-VCH- Verlag, Weinheim.
- [Hib87] Hibbert, D. B., & James A. M.: *Lexikon Elektrochemie*. 1987.
- [Hol02] Holt: *Electrocoagulation: unravelling and synthesising the mechanisms behind a water treatment process*. Dissertation, University of Sydney, 2002.
- [Hol06] Holt: *Electrocoagulation as a wastewater treatment*. The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Even., 2006.
- [Hun87] Hunter: *Foundations of colloid science*. 1987.
- [Ibe] *Produktblatt von aktiv-Bentonite*.
- [Jas93] Jasmund: *Tonminerale und Tone*. 1993.
- [Jia02] Jiang: *Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment*. *Water Research*, 36:4064–4078, 2002.
- [Koy02] Koyba: *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes*. *Journal of Hazardous Materials B*, 100:163–178, 2002.
- [len] <http://www.lenntech.de/>.
- [Lip09] Lipka, K.: *Untersuchung zur Dimensionierung von Separieranlagen im Tunnelbau*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum, 2009.
- [Luc04] Luckert: *Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung*. 2004.
- [Mor10] Mortimer, C. E.: *Chemie*. Thieme-Verlag, Stuttgart, 2010.
- [Nyl] Nylen, et. al.: *Einführung in die Stöchiometrie*. Steinkopff Verlag GmbH, Darmstadt.
- [Olp63] Olphen, Van: *Introduction to clay colloid chemistry*. 1963.
- [Ost07] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer Verlag, London, 2007.
- [Res06] Restrepo: *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. Artículo de Revision, 2006.
- [SC08] Süd-Chemie: *Gespräch*. 2008.

- [Sch03] Schmidt, V. M.: *Elektrochemische Verfahrenstechnik*. WILEY-VCH GmbH, Weinheim, 2003.
- [Sch10] Schreiter, W.: *Chemische Thermodynamik*. De-Gruyter-Verlag, Berlin, 2010.
- [Sei] <http://www.seilnacht.com/>.
- [SGD08] SGD: *Rohrstoffsicherung in der Bundesrepublik Deutschland*. Technischer Bericht, Staatliche Geologische Dienst der Bundesrepublik Deutschland, 2008.
- [Ste03] Stein, D.: *Graberloser Leitungsbau*. Ernst and Sohn Verlag, Berlin, 2003.
- [Vik84] Vik: *Electrocoagulation of potable water*. Water Research, 18:1355–1360, 1984.
- [Voi13] Voigt, C. S.: *Chemgapedia*, 1999-2013. http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/pc/elektrochemie/brennstoffzellen/h_tec/experimente/exp4.vlu/Page/vsc/de/ch/16/pc/elektrochemie/brennstoffzellen/h_tec/experimente/ex4_berechnung1.vscml.html.
- [Wal04] Walsh: *A first course in electrochemical engineering* [. 2004.
- [wik] www.wikipedia.com.