

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Umfeld der Arbeit	1
1.2	Stand der Technik	4
1.2.1	Ex-Situ-Verfahren	4
1.2.2	In-Situ-Verfahren	4
1.2.3	Klassifizierung der Sanierungsmethoden	5
1.3	Aufgabenstellung	11
1.4	Lösungsansatz und Gliederung der Arbeit	13
2	Theoretische Grundlagen der Mikrowellenerwärmung	17
2.1	Elektromagnetische Felder in verlustbehafteten Medien	17
2.1.1	Wellenausbreitung in verlustbehafteten dielektrischen Medien . .	18
2.1.2	Relative Permittivität	21
2.1.3	Umgesetzte Leistung	22
2.1.4	Eindringtiefe	24
2.2	Thermische Stoffeigenschaften	26
2.2.1	Spezifische Wärmekapazität	27
2.2.2	Latente Wärme	27
2.2.3	Wärmeleitfähigkeit	28
2.2.4	Wärmeübergangskoeffizient	28
2.2.5	Emissivität	29
2.3	Wärme- und Stofftransport	30
2.3.1	Wärmeleitung	30
2.3.2	Konvektion	31
2.3.3	Erweiterung der Wärmeleitung und Konvektion für mehrphasigen Stofftransport	34
2.3.4	Diffusion	35
2.3.5	Vollständige Wärmeleitungsgleichung für mehrphasige Konvektion und Diffusion	37
3	Bestimmung dielektrischer Materialparameter	39
3.1	Überblick gebräuchlicher Messverfahren	40
3.1.1	Zeitbereichsreflektometrie	40

3.1.2	Quasistatische Messungen	42
3.1.3	Messungen mittels Resonator	43
3.1.4	Freiraummessungen	44
3.1.5	Messungen mit einer offenen Koaxialsonde	45
3.2	Messungen mittels Hohlleiter	47
3.2.1	Hohlleitermethode zur Messung von granularen und flüssigen Medien	47
3.2.2	Analytische Beschreibung der Wellenausbreitung in mehrfach geschichteten Medien	49
3.2.3	Das inverse Problem	51
3.2.4	Algorithmus zur Lösung des inversen Problems	52
3.2.5	Vorbereitung und Durchführung der Messung	53
3.2.6	Messergebnisse	55
3.2.7	Fehlerabschätzung	58
4	Systembeschreibung	61
4.1	Magnetron	62
4.2	Zirkulator	64
4.3	Hohlleiter und Übergänge	65
4.3.1	Rechteckhohlleiter	65
4.3.2	Hohlleiter-Koaxialleiter-Übergang	68
4.4	Leistungssteiler	73
4.4.1	Zweifachsteiler	73
4.4.2	Dreifachsteiler	74
4.5	Antennen zur Einkopplung von Hochleistungsmikrowellen in kontaminierten Erdboden	77
4.6	Hornantenne für oberflächennahe Kontaminierungen bei 2,45 GHz	77
4.6.1	Grundlagen	77
4.6.2	Aufbau und Abmessungen der Hornantenne	78
4.6.3	Anpassung an verschiedene Bodentypen	79
4.6.4	Vergleich von Simulation und Messung	80
4.6.5	Elektromagnetische Feldverteilung	83
4.7	Koaxiale Antennen für Kontaminierungen in tieferen Schichten	84
4.8	Koaxiale Schlitzantenne mit Luftfüllung bei 2,45 GHz	86
4.8.1	Untersuchung eines einzelnen Schlitzes	86
4.8.2	Anordnung der Schlitzes im Außenleiter des Koaxialleiters	87
4.8.3	Aufbau und Abmessungen der Koaxialantenne	90
4.8.4	Anpassung an verschiedene Bodentypen	91
4.8.5	Vergleich von Simulation und Messung	92
4.8.6	Elektromagnetische Feldverteilung	93
4.9	Koaxiale dielektrische Wanderwellenantenne bei 2,45 GHz und 915 MHz	94

4.9.1	Anforderung an das Dielektrikum	95
4.9.2	Aufbau und Abmessungen der Wanderwellenantenne	96
4.9.3	Anpassung an verschiedene Bodentypen	97
4.9.4	Vergleich von Simulation und Messung	99
4.9.5	Elektromagnetische Feldverteilung	99
4.9.6	Erweiterung auf 915 MHz	101
4.9.7	Wanderwellenantenne mit ringförmigen Schlitten	103
4.10	Bewertung der verschiedenen Antennentypen	103
5	Elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Feldberechnung im Boden	107
5.1	Modellierung mittels Finiten Elemente Methode	108
5.2	Modell zur Bodendekontaminierung	109
5.3	Modellierung der Erwärmung von trockenem Sand ohne Bodenbelüftung	110
5.3.1	Temperaturabhängige Eigenschaften von Sand und Luft	112
5.3.2	Modellierung der natürlichen Konvektion	114
5.3.3	Simulationsergebnisse	116
5.4	Modellierung der Erwärmung von trockenem Sand mit Bodenbelüftung	121
5.4.1	Simulationsergebnisse	121
5.5	Modellierung der Erwärmung von nassem Sand mit Bodenbelüftung . .	126
5.5.1	Temperaturabhängige Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf	128
5.5.2	Modellierung der Konvektion von Luft und Wasserdampf	133
5.5.3	Modellierung der Dampfdiffusion	134
5.5.4	Simulationsergebnisse	134
5.6	Fazit	142
6	Modellierungsbeispiele	145
6.1	Dekontaminierung von benzinbelastetem Erdreich	145
6.2	Dekontaminierung von dieselbelastetem Erdreich	146
7	Verifikationsmessungen	151
7.1	Aufbau des Laborversuches	151
7.1.1	Mikrowellengenerator	152
7.1.2	Temperaturmessung	153
7.1.3	Absaugung / Belüftung	153
7.2	Messungen mit Hornantenne	153
7.3	Messungen mit der geschlitzten Koaxialantenne	154
7.4	Messungen mit der Wanderwellenantenne	155
7.4.1	Messung bei trockenem Sand ohne Belüftung	156
7.4.2	Messung bei trockenem Sand mit Belüftung	157
7.4.3	Messung bei nassem Sand mit Belüftung	159
7.5	Messungen mit der Wanderwellenantenne bei 915 MHz	161

7.6	Bewertung der Messergebnisse	163
8	Zusammenfassung	167
A	Anhang	171
A.1	Herleitung der Wellenausbreitung im Hohlleiter	171
A.1.1	Maxwellgleichungen in Differentialform	171
A.1.2	Die Wellengleichung	173
A.1.3	TEM-Wellen im freien Raum und im Koaxialleiter	174
A.1.4	<i>H</i> - und <i>E</i> -Wellen im Rechteckhohlleiter	177
A.1.5	Wellenausbreitung im Hohlleiter	181
A.2	Zusammenhang zwischen Ausbreitungskonstante und Materialparametern	183
A.3	Eigenschaften der Kontaminierungen und der verwendeten Materialien .	184
A.3.1	Komplexe Permittivität	185
A.3.2	Dynamische Viskosität von Flüssigkeiten und Gasen	185
A.4	Zusammensetzung von Treibstoffen	188