

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Theoretische Grundlagen der Mikrowellenerwärmung</b>	<b>17</b>
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
<b>3 Bestimmung dielektrischer Materialparameter</b>	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>Systembeschreibung</b>	<b>61</b>
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	Leistungsteiler . . . . .	73
4.4.1	Zweifachteiler . . . . .	73
4.4.2	Dreifachteiler . . . . .	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 Slitze 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 Schlitzten . . . . .	103
4.10	Bewertung der verschiedenen Antennentypen . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Feldberechnung im Boden</b>	<b>107</b>
5.1	Modellierung mittels Finiter 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
<b>6</b>	<b>Modellierungsbeispiele</b>	<b>145</b>
6.1	Dekontaminierung von benzinbelastetem Erdreich . . . . .	145
6.2	Dekontaminierung von dieselbelastetem Erdreich . . . . .	146
<b>7</b>	<b>Verifikationsmessungen</b>	<b>151</b>
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
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
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