

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b>	<b>7</b>
<b>1 Grundlagen der Radartechnik und Mikrowellenausbreitung</b>	<b>11</b>
1.1 Radarkomponenten und ihre Funktion	12
1.1.1 Sender	12
1.1.2 Empfänger	14
1.1.3 Antenne	15
1.2 Auflösung eines Radars	17
1.2.1 Radiale Auflösung und maximale Reichweite	18
1.2.2 Azimutale Auflösung	18
1.2.3 Pulsvolumen	19
1.3 Frequenzen und Wellenlänge der Wetterradare	20
1.4 Potenzgesetze und die Bedeutung der Logarithmierung	20
1.5 Die Radargleichung	21
1.6 Radarsysteme	23
1.6.1 Konventionelle Radare	23
1.6.2 Doppler-Radare	24
1.6.3 Polarimetrische Radare	24
1.7 Höhenmessung des Radars	26
1.8 Einflüsse auf die Ausbreitung von Mikrowellen	28
1.8.1 Atmosphärische Einflüsse	28
1.8.2 Einfluss von Bodenhindernissen	29
1.8.3 Reflexionen von Bodenhindernissen, Störchoss	31
<b>2 Mikrophysik des Niederschlags und der Radarmessung</b>	<b>32</b>
2.1 Integrale Größen zur Beschreibung des Niederschlagsprozesses	33
2.2 Streuung elektromagnetischer Strahlung an Regentropfen	36
2.2.1 MIE-Theorie und RAYLEIGH-Approximation	36
2.2.2 Der Rückstreuquerschnitt $\sigma_b$	37
2.2.3 Der Dämpfungsquerschnitt $\sigma_{ext}$	39
2.2.4 Temperatureinfluss auf den Dämpfungsquerschnitt	40
2.2.5 Berechnung der MIE-Koeffizienten	41
2.3 Die spezifische Dämpfung $k$	42
2.4 Die radarspezifische Reflektivität des Tropfenvolumens	44
2.5 Regentropfengröße und Form	46
2.6 Tropfengrößenverteilungsmodelle	49
2.6.1 Die Exponential-Verteilung	50
2.6.2 Das $\Gamma$ -Verteilungsmodell	52
2.7 Messung von Tropfenspektren	54
2.7.1 JOSS-WALDVOGEL-Distrometer, RD-69	55
2.7.2 PARSIVEL-Distrometer	56
2.7.3 Filterung der Tropfenzeitreihen des RD-69	58
2.7.4 Integrale Niederschlagsgrößen am Beispiel des RD-69	60
2.8 Potenzgesetze und Koeffizientenbestimmung durch lineare Regression	66

2.9	Koeffizientenbestimmung für die k-Z-Beziehung	68
2.9.1	k-Z-Beziehungen stratiformer und konvektiver Tropfenspektren	69
2.9.2	Temperatureinfluss auf die k-Z-Beziehung	72
2.9.3	Klimatische k-Z-Beziehung	73
2.9.4	Zusammenfassung und Fazit der Dämpfungskoeffizienten	75
2.10	Die R-Z-Beziehung	78
2.10.1	Das R-Z-Wertekontinuum für den Standort Hassel	78
2.10.2	Variabilität der R-Z-Beziehung	80
2.10.3	Parameter für die Analyse des Niederschlagsprozesses	81
2.10.4	Ereignisbezogene R-Z-Beziehungen	89
2.10.5	Vergleichbarkeit von R-Z-Beziehungen	91
2.11	Bestimmung der R-Z-Beziehung in Echtzeit	92
2.11.1	Integrationszeitraum für die R-Z-Beziehung	94
2.11.2	Grenzen der Extrapolation von R-Z-Beziehungen	94
2.11.3	Quadratische Regression der R-Z-Beziehung	97
2.12	Zusammenfassung	99
<b>3</b>	<b>Mikrowellenverbindungen zur Messung der Dämpfungsreferenz</b>	<b>101</b>
3.1	Mikrophysikalische Voraussetzungen für die Frequenzwahl	103
3.2	Bemessung und Auslegung der Mikrowellenverbindungen	106
3.3	Technische Spezifikationen der Sende- und Empfangsgeräte	108
3.4	Randbedingungen für die Standortwahl	109
3.5	Algorithmen zur Basislinienbestimmung	111
3.5.1	Ursprünglicher Algorithmus mit Regenschreiberinformation	114
3.5.2	Modifizierter Algorithmus mit Regenschreiberinformation	115
3.5.3	Modifizierter Algorithmus mit Radarinformation	118
3.6	Besonderheiten der Basislinienbestimmung	120
3.6.1	Berechnung des Niederschlags bei Sättigung des 17,5 GHz-Signals	120
3.6.2	Identifikation von Schneeregen (Graupel)	124
3.7	THIESEN-Gewichtung der Regenschreiber	126
3.8	Ergebnisse der Niederschlagsmessung mit dem MDDV	127
3.8.1	Unsicherheit der THIESEN-gewichteten Regenschreiberreferenz	128
3.8.2	Ergebnisse für die verschiedenen Algorithmen	130
3.8.3	Bewertung der Leistungsfähigkeit der Algorithmen	132
3.9	Ableitung der Dämpfungsreferenz	133
3.10	Zusammenfassung	137

<b>4</b>	<b>Operationelle Dämpfungskorrektur</b>	<b>139</b>
4.1	Hydrologische Relevanz der Dämpfung	140
4.2	Theorie der Dämpfungskorrektur	143
4.2.1	Implementierung des vorwärts gerichteten Korrekturalgorithmus	146
4.2.2	Implementierung des rückwärts gerichteten Korrekturalgorithmus	148
4.2.3	Vergleich der vorwärts und rückwärts gerichteten Korrektur	150
4.2.4	Das Iterationsverfahren nach Hildebrand	152
4.2.5	Mountain Reference Technique	155
4.3	Radarkalibrierung	158
4.3.1	Konstante Kalibrierungsfehler	159
4.3.2	Variable Kalibrierungsfehler	159
4.3.3	Systemkalibrierung für das X-Band-Radar	160
4.3.4	Systemkalibrierung für das C-Band-Radar	164
4.4	Frequenzskalierung der Mikrowellenreferenz	167
4.4.1	Frequenzskalierung X-Band	167
4.4.2	Frequenzskalierung C-Band	168
4.5	Optimierung der Dämpfungskoeffizienten	170
4.5.1	Implementierung der Koeffizientenoptimierung	171
4.5.2	Beschreibung der Eingangsgrößen	174
4.5.3	Definition zulässiger Dämpfungskoeffizienten	175
4.5.4	Zielvorschrift der Optimierung	176
4.5.5	Unsicherheiten der Dämpfungsreferenz	177
4.5.6	Ereignisauswahl für die Optimierung	178
4.6	Ergebnisse der Koeffizientenoptimierung für das X-Band-Radar	178
4.7	Diskussion und Relevanz der Minutengeraden	184
4.8	Der operationelle Dämpfungskorrekturalgorithmus	187
4.8.1	Reduktion der Koeffizientenebene durch a-priori-Kenntnisse	188
4.8.2	Implementierung der operationellen Dämpfungskorrektur	191
4.9	Ergebnisse Dämpfungskorrektur mit ZTOR für das X-Band-Radar	196
4.9.1	Unsicherheitsanalyse der Dämpfungskorrektur auf Z-Basis	196
4.9.2	Vergleich der Zkor mit Bodenreferenz ZT des RD-69	204
4.9.3	Bewertung des Korrekturvermögens für die Radarbildmatrix	205
4.10	Dämpfungskorrektur für das C-Band-Radar	209
4.10.1	Optimierung der Dämpfungskoeffizienten	209
4.10.2	Implementierung der C-Band-Dämpfungskorrektur in ZtoR	211
4.10.3	Ergebnisse der C-Band-Dämpfungskorrektur mit ZtoR	212
4.11	Nachweis Radardatenaufbereitung für die Zielgröße Niederschlag	215
4.11.1	Unsicherheiten im Vergleich von Radar- und Regenschreiber niederschlag	215
4.11.2	Nachweis der X-Band-Dämpfungskorrektur mit Regenschreibern	218
4.11.3	Anwendung der quadratischen R-Z-Beziehung	223
4.11.4	Nachweis der C-Band-Dämpfungskorrektur mit Regenschreibern	225
4.12	Zusammenfassung der quantitativen Radardatenaufbereitung	228

<b>5</b>	<b>Relevanz der Radardaten für die Siedlungsentwässerung</b>	<b>231</b>
5.1	Das Entwässerungssystem Susebek	231
5.2	Die Niederschlag-Abfluss-Modelle HYSRAD und EXTRAN	234
5.3	Einfluss der Radardatenaufbereitung auf die N-A-Simulation	235
5.4	Bedeutung der ungleichmäßigen Überregnung	236
5.4.1	Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit	237
5.4.2	Der Überzugseffekt	238
5.5	Radarbasierte Niederschlagsvorhersage	239
5.5.1	Skalen der Niederschlagsprozesse und Abbildung durch Modelle	240
5.5.2	Qualitative und quantitative Einordnung der Vorhersagen	242
5.5.3	Grenzen der Kurzfristvorhersage	243
5.5.4	Charakteristische Niederschlagsereignistypen	244
5.5.5	Extrapolations- oder Tracking-Verfahren	245
5.5.6	Das Kurzfristvorhersagemodell HYRATRAC	247
5.5.7	Das LMK-Modell des DWD	247
5.6	Zielgrößen der Vorhersageverifikation	248
5.6.1	Fehlerkomponentenanalyse des MSE nach THEIL	251
5.6.2	Zerlegung und Bedeutung der Fehlerkomponenten	252
5.6.3	Formulierung der Fehlerkomponentenanalyse für die Vorhersage	254
5.7	Auswahl und Beschreibung der Niederschlagsereignisse	256
5.8	Ergebnisse der Vorhersageverifikation	260
5.8.1	Verifikationsergebnisse für Radardaten ohne Aufbereitung	261
5.8.2	Einfluss der Radardatenaufbereitung auf die Kurzfristvorhersage	268
5.8.3	Verifikationsergebnisse für dämpfungskorrigierte Radardaten	269
5.8.4	Fazit der Vorhersageverifikation	271
5.9	Abflussprognose unter Berücksichtigung der Kurzfristniederschlagsvorhersage	274
5.10	Einfluss der Radardatenaufbereitung auf die N-A-Prognose	276
5.11	Zusammenfassung	278
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>281</b>
	<b>Zukünftige Aufgaben und Perspektiven</b>	<b>285</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>287</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>297</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>300</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>301</b>
	<b>Verzeichnis der Anhänge</b>	<b>305</b>