

Technische Universität München  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

# Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts bei Richtfunkstrecken

Clemens Moroder

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des  
akademischen Grades eines

– *Doktor-Ingenieurs* –

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher  
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. Erwin Biebl  
2. Prof. Dr. sc. nat. Harald Kunstmann

Die Dissertation wurde am 14.09.2020 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am  
03.05.2021 angenommen.

Clemens Moroder. *Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts bei Richtfunkstrecken*.  
Dissertation. Technische Universität München, München, Deutschland, 2021.

© 2021 Clemens Moroder

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 3.0  
Deutschland zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie  
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/> oder wenden Sie sich brieflich an  
Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

## **Zusammenfassung**

Schätzungen der Regenintensität anhand des Signalschwundes in Richtfunkstrecken enthalten eine beträchtliche Unsicherheit, weil Wasserbenetzung die Antenneneigenschaften verändert. Dieser sogenannte Wet-Antenna-Effekt wird mit Simulationen, Messungen und einem Feldexperiment mit Richtfunkantennen unter realistischen Bedingungen untersucht. Mit dem gemessenen Eingangsreflexionsfaktor der Antenne und einer Korrekturfunktion wird der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts geschätzt und die Pfaddämpfung um diesen Beitrag korrigiert.

## **Abstract**

Rain-rate estimation based on signal fading from point-to-point radio links includes uncertainty, because wetness on the antenna influences its properties. This so-called wet antenna effect is examined with simulations, measurements and with a field experiment with directional antennas under realistic conditions. With the measured return loss of the antenna and a correction function, the impact of the wet antenna effect is approximated and the path attenuation is corrected by this value.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Wet-Antenna-Effekt . . . . .	4
1.3	DFG-Projekt IMAP . . . . .	5
1.4	Stand der Technik: Wet-Antenna-Effekt . . . . .	5
1.5	Wissenschaftliche Forschungsfragen . . . . .	8
1.6	Methodik und Innovation . . . . .	9
1.7	Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Niederschlag und Richtfunk: Theorie</b>	<b>13</b>
2.1	Regen . . . . .	13
2.1.1	Tropfenverteilung . . . . .	13
2.1.2	Fallgeschwindigkeit . . . . .	15
2.1.3	Regenintensität . . . . .	15
2.1.4	Tropfenform . . . . .	16
2.2	Permittivität des Wassers . . . . .	17
2.2.1	Debye-Modell . . . . .	18
2.2.2	Modifiziertes Debye-Modell nach Cole-Cole . . . . .	19
2.2.3	Liebe-Modell . . . . .	19
2.3	Antenne . . . . .	20
2.3.1	Nahfeld und Fernfeld . . . . .	21
2.3.2	Polarisation . . . . .	22
2.3.3	Richtfaktor . . . . .	22
2.3.4	Eingangsreflexionsfaktor . . . . .	23
2.3.5	Antennenwirkungsgrad . . . . .	24
2.3.6	Antennengewinn . . . . .	24
2.3.7	Antennenmodell . . . . .	24
2.3.8	Richtantenne . . . . .	25
2.4	Richtfunkstrecke . . . . .	26
2.5	Dämpfung in der Atmosphäre . . . . .	29
2.5.1	Dämpfung durch Regen . . . . .	29
2.5.2	Dämpfung durch Gase . . . . .	31
2.6	Wet-Antenna-Effekt . . . . .	32

<b>3</b>	<b>Wet-Antenna-Effekt: Aufbau, Simulation und Labormessung</b>	<b>35</b>
3.1	Dielektrische Verluste in einem Wasserfilm . . . . .	35
3.2	Wet-Antenna-Effekt bei einer Richtfunkantenne . . . . .	40
3.3	Simulation einer mit Wasser benetzten Antenne . . . . .	41
3.3.1	Konzept der Simulation . . . . .	42
3.3.2	Simulationsergebnisse . . . . .	43
3.4	Vermessung einer mit Wasser benetzten Antenne . . . . .	45
3.4.1	Konzept der Labormessung . . . . .	45
3.4.2	Messergebnisse . . . . .	48
3.5	Vergleich zwischen Simulation und Messung . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Feldexperiment zur Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts</b>	<b>51</b>
4.1	Konzept . . . . .	51
4.2	Testgelände . . . . .	54
4.2.1	Funkstrecke . . . . .	54
4.2.2	Distrometer . . . . .	58
4.2.3	Wetterstation . . . . .	59
4.3	Millimeterwellen-Instrument . . . . .	61
4.3.1	Aufbau und Komponenten . . . . .	61
4.3.2	Stepped-Frequency-Continuous-Wave-Prinzip . . . . .	66
4.3.3	Kalibrierung . . . . .	69
4.3.4	Dynamikbereich . . . . .	70
4.3.5	Temperaturregelung und Wetterbeständigkeit . . . . .	71
4.3.6	Optische Überwachung der Radome . . . . .	73
4.3.7	Datenerfassung und -speicherung . . . . .	75
4.4	Messergebnisse . . . . .	77
4.5	Langzeit-Messungen . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines Wet-Antenna-Korrekturverfahrens</b>	<b>83</b>
5.1	Eingangsreflexionsfaktor und Wet-Antenna-Dämpfung . . . . .	83
5.2	Bewertung der Performanz . . . . .	85
5.3	Regenintensität ohne Wet-Antenna-Korrektur . . . . .	86
5.4	Regenintensität mit skalarer Wet-Antenna-Korrektur . . . . .	88
5.5	Regenintensität mit vektorieller Wet-Antenna-Korrektur . . . . .	91
5.6	Bewertung . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>103</b>
6.1	Wissenschaftlichen Forschungsfragen: Antworten . . . . .	104
6.2	Ausblick . . . . .	106
	<b>Anhang</b>	<b>117</b>
A	Logdatei LOG_SYS.txt . . . . .	117

B	Logdatei LOG_ROUTINE.txt (Ausschnitt) . . . . .	118
C	Messergebnisse zum Trocknungsprozess . . . . .	120
	C.1 Antenne A (18,000 GHz) . . . . .	120
	C.2 Antenne B (22,235 GHz) . . . . .	121
	C.3 Antenne C (25,375 GHz) . . . . .	122
	C.4 Antenne D (28,500 GHz) . . . . .	123
	C.5 Antenne E (34,800 GHz) . . . . .	124
	C.6 Antenne F (38,500 GHz) . . . . .	125
D	Messergebnisse zur Langzeit-Messung . . . . .	126
	D.1 Antenne A (18,000 GHz) horizontal . . . . .	126
	D.2 Antenne A (18,000 GHz) vertikal . . . . .	127
	D.3 Antenne B (22,235 GHz) horizontal . . . . .	128
	D.4 Antenne B (22,235 GHz) vertikal . . . . .	129
	D.5 Antenne C (25,375 GHz) horizontal . . . . .	130
	D.6 Antenne C (25,375 GHz) vertikal . . . . .	131
	D.7 Antenne D (28,500 GHz) horizontal . . . . .	132
	D.8 Antenne D (28,500 GHz) vertikal . . . . .	133
	D.9 Antenne E (34,800 GHz) horizontal . . . . .	134
	D.10 Antenne E (34,800 GHz) vertikal . . . . .	135
	D.11 Antenne F (38,500 GHz) horizontal . . . . .	136
	D.12 Antenne F (38,500 GHz) vertikal . . . . .	137
E	kumulierte Niederschlagsmenge über 8 Tage . . . . .	138
	E.1 Antenne A (18,000 GHz) . . . . .	138
	E.2 Antenne B (22,235 GHz) . . . . .	139
	E.3 Antenne C (25,375 GHz) . . . . .	140
	E.4 Antenne D (28,500 GHz) . . . . .	141
	E.5 Antenne E (34,800 GHz) . . . . .	142
	E.6 Antenne F (38,500 GHz) . . . . .	143
F	Korrelationskoeffizient über ein Jahr . . . . .	144
	F.1 Antenne A (18,000 GHz) . . . . .	144
	F.2 Antenne B (22,235 GHz) . . . . .	145
	F.3 Antenne C (25,375 GHz) . . . . .	146
	F.4 Antenne D (28,500 GHz) . . . . .	147
	F.5 Antenne E (34,800 GHz) . . . . .	148
	F.6 Antenne F (38,500 GHz) . . . . .	149





# Verwendete Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a$	m	kurze Seite eines gleichschenkelig-rechtwinkligen Dreiecks
$a$	$\sqrt{W}$	Vektor der hinlaufenden Welle
$a$	1	dimensionsloser Parameter (Power-Law)
$A_{\text{add}}$	1	zusätzliche Dämpfung
$A_{\text{free}}$	1	Freiraumdämpfung
$A_{\text{gas}}$	1	Dämpfung durch Gase
$A_{\text{iso}}$	m <sup>2</sup>	Antennenwirkfläche eines isotropen Kugelstrahlers
$A_{\text{p}}$	1	Pfaddämpfung
$A_{\text{R}}$	m <sup>2</sup>	Wirkfläche des Reflektors
$A_{\text{rain}}$	1	Dämpfung durch Regen
$A_{\text{WA}}$	1	Wet-Antenna-Dämpfung
$b$	$\sqrt{W}$	Vektor der zurücklaufenden Welle
$b$	1	dimensionsloser Parameter (Power-Law)
$C(\varphi, \vartheta)$	1	Richtcharakteristik einer Antenne
$c_0$	m s <sup>-1</sup>	Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum)
$D$	mm	Durchmesser eines Tropfens
$D$	m	maximale Ausdehnung einer Antenne
$D$	1	Richtfaktor
$D$	1	Dissipationsgrad (Leistungsgröße)
$D_{\text{dry}}$	1	Richtfaktor (trockener Fall)
$d$	m	Schichtdicke
$d$	m	Distanz
$d_{\text{FF}}$	m	Grenze Fernfeld
$d_{\text{RNF}}$	m	Grenze des reaktiven Nahfelds
$D_{\text{meas}}$	dB	gemessener Dynamikbereich
$D_{\Delta}$	m	Durchmesser des Reflektor-Umkreises
$E$	V m <sup>-1</sup>	elektrische Feldstärke
$E_{\text{max}}$	V m <sup>-1</sup>	maximale elektrische Feldstärke
EIRP	W	äquivalente isotrope Strahlungsleistung
EIRP <sub>dry</sub>	W	äquivalente isotrope Strahlungsleistung (trockener Fall)
$f$	Hz	Frequenz
$\Delta f$	Hz	Frequenzschritt
$\Delta F$	Hz	Frequenzspanne
$f_{\text{corr}}(\Gamma)$	1	Wet-Antenna-Korrekturfunktion

Symbol	Einheit	Bedeutung
$f_D$	Hz	Relaxationsfrequenz
$f_{\text{Pulse}}$	Hz	Pulsfrequenz des Volumenstrommessers
$f_{\text{IFFT}}$	1	Umkehrfunktion der schnellen Fourier-Transformation
$G$	1	Antennengewinn
$G_{\text{dry}}$	1	Antennengewinn (trockener Fall)
$G_R$	1	Reflektorgewinn
$h$	m	Höhe
$k_0, k_1, k_2$	dB	Parameter der skalaren Korrekturfunktion
$k_0, \dots, k_8$	dB	Parameter der vektoriellen Korrekturfunktion
$K$	1	Kettenmatrix
$k_{\text{gas}}$	dB km <sup>-1</sup>	spezifische Dämpfung durch Gase
$k_{\text{O}_2}$	dB km <sup>-1</sup>	spezifische Dämpfung durch Sauerstoff
$k_{\text{rain}}$	dB km <sup>-1</sup>	spezifische Dämpfung durch Regen
$k_{\text{wv}}$	dB km <sup>-1</sup>	spezifische Dämpfung durch Wasserdampf
$l$	m	Länge des Links
$M$	1	Anzahl der Frequenzpunkte einer Messung
$N$	dB	(relativer) Rauschteppich
$N_0$	m <sup>-3</sup> mm <sup>-1</sup>	Koeffizient der Verteilung der Tropfengröße
$N_D$	m <sup>-3</sup> mm <sup>-1</sup>	Verteilung der Tropfengröße
$p$	W m <sup>-3</sup>	dielektrische Verlustleistungsdichte
$p$	hPa	Luftdruck
$P_{\text{acc}}$	W	aufgenommene Leistung
$P_{\text{av}}$	W	zur Verfügung stehende Leistung
$P_{\text{rad}}$	W	Strahlungsleistung
$P_{\text{RX}}$	W	Empfangsleistung
$P_{\text{TX}}$	W	Sendeleistung
$Q$	ml s <sup>-1</sup>	Volumenstrom
$R$	1	Reflexionsgrad (Leistungsgröße)
$R$	mm h <sup>-1</sup>	Niederschlagsintensität (Regenrate)
$R[n]$	1	Entfernungsprofil
$r$	1	Reflexionsfaktor (Feldgröße)
$r$	m	Distanz
$\Delta r$	m	Ortsauflösung
$r_F$	m	Radius der ersten Fresnelzone
$r_{Fm}$	m	Radius in der Mitte der ersten Fresnelzone
$r_{\text{max}}$	m	Eindeutigkeitsbereich
$r_{X,Y}$	1	Korrelationskoeffizient zwischen Instrument X und Y
$s$	m	lange Seite eines gleichschenkelig-rechtwinkligen Dreiecks
$s[n]$	1	gemessener Signalvektor
$\hat{s}[n]$	1	gefensterter Signalvektor
$S_{\text{iso}}$	W m <sup>-2</sup>	Strahlungsleistungsdichte eines isotropen Strahlers

Symbol	Einheit	Bedeutung
$S_{\max}$	$\text{W m}^{-2}$	maximale Strahlungsleistungsdichte einer Antenne
$T$	1	Transmissionsgrad (Leistungsgröße)
$T$	K	Temperatur
$t$	1	Transmissionsfaktor (Feldgröße)
$t$	s	Zeit
$\Delta t$	s	Messzeit eines einzelnen Frequenzpunktes
$\Delta T$	s	Messzeit eines ganzen Entfernungsprofils
$v$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit eines Tropfens
$v_t$	$\text{m s}^{-1}$	Grenzgeschwindigkeit eines Tropfens
$w [n]$	1	Fensterfunktion
$x$	m	x-Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
$x$	1	Funktion der Frequenzabhängigkeit (Debye-Modell)
$z$	m	z-Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
$Z_0$	$\Omega$	Wellenimpedanz im Vakuum
$z_E$	1	normierte Leitungsimpedanz (E-Mode)
$Z_E$	$\Omega$	Leitungsimpedanz (E-Mode)
$\alpha$	1	Parametrisierung der Streuung der Relaxationszeit
$\alpha$	$^\circ$	Einfallswinkel
$\Gamma$	1	Reflexionskoeffizient
$\Gamma_{\text{dry}}$	1	Reflexionskoeffizient (trockener Fall)
$\tan(\delta_e)$	1	dielektrischer Verlustwinkel
$\varepsilon_0$	$\text{A s V}^{-1} \text{m}^{-1}$	elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_r$	1	relative Permittivität
$\varepsilon'_r$	1	Realteil der relativen Permittivität
$\varepsilon''_r$	1	negativer Imaginärteil der relativen Permittivität
$\varepsilon_{r0}$	1	statische relative Permittivität
$\varepsilon_{r\infty}$	1	optische relative Permittivität
$\eta$	1	Antennenwirkungsgrad
$\eta_{\text{dry}}$	1	Antennenwirkungsgrad (trockener Fall)
$\Theta$	1	modifizierte inverse Temperatur
$\Theta$	$^\circ$	Antennenöffnungswinkel
$\lambda_0$	m	Wellenlänge im Vakuum
$\lambda_\varepsilon$	m	Wellenlänge im Medium
$\Lambda$	$\text{mm}^{-1}$	Parameter der Verteilung der Tropfengröße
$\rho$	$\text{g m}^{-3}$	absolute Luftfeuchtigkeit
$\sigma_R$	$\text{m}^2$	Radarrückstreuquerschnitt des Reflektors
$\tau$	s	Relaxationszeit (nach Debye)
$\tau_r$	s	Relaxationszeit
$\Phi$	1	elektrische Länge



# 1 Einführung

Die Erhebung von genauen Niederschlagsdaten ist ein herausforderndes Betätigungsfeld für die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen. Das erarbeitete Resultat – die Niederschlagsdaten – ist eine wertvolle Ressource für staatliche Einrichtungen, wie Wetterdienste und hydrologische Dienste, aber auch für kommerzielle Akteure aus der Agrarwirtschaft oder für Versicherungsunternehmen. Im 20. Jahrhundert haben sich zwei Verfahren zur Messung des Niederschlags etabliert. Das ältere der beiden Verfahren verwendet Niederschlagsmesser, sogenannte Pluviometer, beziehungsweise ein Netzwerk solcher Instrumente. Bei dem zweiten, neueren Verfahren, wird der Niederschlag mithilfe eines Wetterradars ermittelt.

Pluviometer sind Vorrichtungen, die den Niederschlag auffangen und die Niederschlagsmenge im zeitlichen Verlauf messen. Sie liefern somit die Regenintensität des Niederschlags für den Aufstellungsort. Das Pluviometer kann aber, abhängig vom Aufstellungsort und dem Wettergeschehen, lokal den Luftstrom des Windes ändern, so dass die Regentropfen eine andere Trajektorie nehmen [1]. Daraus resultiert eine Verfälschung der Regenintensität. Zudem stellt die Verschmutzung des Pluviometers durch organische Stoffe wie Laub eine weitere Fehlerquelle dar.

Wetterradare ermitteln die Niederschlagsintensität in ihrem Abdeckungsbereich hingegen indirekt über die elektromagnetische Rückstreuung der einzelnen Hydrometeore. Bei Regen sind das die Regentropfen. Je stärker es regnet, umso stärker wird die vom Radar ausgesendete elektromagnetische Welle vom Regen zurück reflektiert. In Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein Netzwerk aus 17 operativen Wetterradaren sowie einem Forschungsradar am Observatorium Hohenpeißenberg.

Eine Schwäche des Wetterradars liegt im indirekten Messverfahren, den Niederschlag über die Reflektivität des Regens zu messen. Da die Reflektivität von der Tropfenverteilung abhängig ist und diese Verteilung nicht immer gleich ist, gibt es bei der Schätzung der Regenintensität weitere unbekannte Größen, die der Radarmessung nicht zugänglich sind [2].

Eine weitere Fehlerquelle beim Wetterradar ist die Variation des vertikalen Profils der Reflektivität der Hydrometeore, beispielsweise hervorgerufen durch die Orographie oder durch Schmelzvorgänge [3]. Diese Einflüsse können mithilfe von Korrekturverfahren kompensiert werden [4], [5].

Eine weitere Schwäche des Wetterradars besteht darin, dass es keine bodennahen Niederschlagsdaten liefert. Im Gebirge kommen zwei zusätzliche Problematiken zum Tragen. Einerseits entstehen durch die Berge vom Wetterradar abgeschattete

Bereiche, für welche keine Niederschlagsdaten geliefert werden [6]. Andererseits blendet Bodenclutter das Radar.

In den letzten Jahren ist ein weiteres – drittes – Verfahren der Niederschlagsbestimmung auf dem Vormarsch. Dieses Verfahren verwendet die Schwunddaten von Richtfunkstrecken. Der durch den Regen hervorgerufene Schwund des Signals wird herangezogen, um mit ihm die Regenintensität zu ermitteln. Je stärker der Niederschlag ausfällt, umso stärker ist auch der Schwund.

Diese Schwunddaten kann man aus bestehenden Richtfunknetzen von Mobilfunkbetreibern gewinnen und daraus die Regenintensität berechnen, wie in [7] gezeigt wird. Dabei kann die bestehende Infrastruktur verwendet werden, welche für das Monitoring die Pfaddämpfung misst und gegebenenfalls die Sendeleistung anpasst. Vergleicht man dieses Verfahren mit den beiden etablierten Technologien Pluviometer und Wetterradar, so zeigt sich, dass auch das Auswerten der Schwunddaten von Richtfunkstrecken geeignet ist, um Niederschlagsdaten zu ermitteln [8].

Der größte Vorteil dieses Verfahrens liegt in der flächenmäßig großen Abdeckung von Richtfunknetzen in vielen Gebieten der Welt. Zum Beispiel kann allein das in Deutschland für den Mobilfunk vom Unternehmen Ericsson betriebene Backhaul-Richtfunknetz die Schwunddaten für knappe 4000 Richtfunkstrecken liefern [9]. Über ein flächendeckend ausgebautes Richtfunknetz erhält man Messpunkte, welche über das ganze Land verteilt sind. Da beispielsweise auf Grund von 5G<sup>1</sup> dichtere Mobilfunknetze notwendig sind, steigt wahrscheinlich auch die Anzahl der Richtfunkstrecken, die diese Netze versorgen, so dass in Zukunft noch mehr Niederschlagsdaten ermittelt werden können.

Da sich Richtfunkstrecken in der Regel auf einer Höhe von unter 100 m über dem Grund befinden, liefert dieses Verfahren bodennahe Niederschlagswerte im Vergleich zu dem Wetterradar, welches Niederschlagswerte für den Bereich oberhalb von 100 m liefert [10]. Bei einem dicht ausgebauten Richtfunknetz erhält man Niederschlagsdaten, die dem Profil des Geländes folgen. Diese Daten kann man für hydrologische Untersuchungen des Abflussverhaltens von Niederschlag zum Beispiel in urbanen Gebieten verwenden [11], [12].

Die landesweite Kartierung von Niederschlagsfeldern aufgrund einer landesweiten Erhebung von Schwunddaten von Richtfunknetzen wurde bereits für die Niederlande [13] und für Deutschland [9] gezeigt.

Einen guten Überblick des Entwicklungsstands dieser Technologie zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit liefert [8].

### 1.1 Motivation

Warum braucht man zusätzlich zu den Pluviometern und den Wetterradaren ein weiteres Verfahren zur Gewinnung von Niederschlagsdaten? In Industriestaaten, wie in

---

<sup>1</sup>Mobilfunkstandard fünfter Generation

Europa, ist auf den ersten Blick ein solches Verfahren nicht notwendig. Beispielsweise ist Deutschland mit Wetterradaren sehr gut abgedeckt und verfügt über zuverlässige Niederschlagsdaten von den meteorologischen Diensten.

Doch wie sieht es in anderen Ländern aus, etwa in Entwicklungsländern? Dort gibt es größtenteils keine Wetterradare oder nur eine unzulängliche Abdeckung durch wenige Wetterradare. Meist ist in Entwicklungsländern zudem die Infrastruktur von den Pluviometern unzureichend ausgebaut und liefert nicht für das ganze Land Niederschlagsdaten. In Entwicklungsländern eröffnet somit die Auswertung der Schwunddaten von Richtfunkstrecken die Möglichkeit, kostengünstig Niederschlagsdaten zu gewinnen.

In Afrika konnten zum Beispiel in Burkina Faso mit Richtfunkstrecken eines lokalen Mobilfunkanbieters Niederschlagsdaten gewonnen werden, die im Vergleich zu den Daten konventioneller meteorologischer Instrumente gute Ergebnisse lieferten [14]. In Kenia konnte basierend auf dieser Technologie ein Frühwarnsystem für Sturzfluten konzipiert werden [15].

Des Weiteren beschränkt sich diese Technologie nicht nur auf die Niederschlagsmessung, sondern ist auch in der Lage, andere Parameter der Atmosphäre zu schätzen. So wurde in [16] das Potenzial aufgezeigt, mithilfe der Auswertung von Schwunddaten Nebel zu beobachten und seinen Wassergehalt zu bestimmen.

Es wurde auch die Möglichkeit aufgezeigt, basierend auf Schwunddaten die Luftfeuchtigkeit zu schätzen und Karten mit ihrer Verteilung zu generieren [17], [18].

Wenn darüber hinaus auch der Phasenunterschied der Übertragungsstrecke bekannt ist, lässt sich die Luftfeuchtigkeit noch genauer bestimmen [19].

Ein weiterer Ansatz versucht, aus den Schwunddaten Hinweise auf eine Inversionsschicht abzuleiten, welche ein Indiz für Luftverschmutzung sein kann. Inversionen können eine erhöhte bodennahe Luftschadstoffkonzentration, etwa durch Stickoxide und Feinstaub von nahem Verkehr, begünstigen [20].

Die oben genannten Anwendungen zeigen das Potential dieser Technologie, flüssigen Niederschlag (Regen), Aerosole (wie Feinstaub oder Nebel) oder Gase (wie Wasserdampf) zu messen. Einen Überblick über den vielfältigen Einsatz dieser Technologie liefert [21]. Prinzipiell ist jedes Phänomen, das einen Einfluss auf die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einer Richtfunkstrecke hat, mit diesem Verfahren messbar. Limitierend wirken dabei aber das Rauschen und der Quantisierungsfehler bei der Pegelmessung bei den Richtfunkssystemen. Mit den heutigen Systemen sind deshalb nur Phänomene mit einem starken Einfluss auf die Richtfunkstrecke, wie beispielsweise Regen, sinnvoll messbar.

Betrachtet man die aktuelle Entwicklung, dass die Richtfunknetze immer dichter werden und mehr kürzere Richtfunkstrecken mit höherer Betriebsfrequenz hinzukommen, kann man daraus schließen, dass das Potential der schwundbasierten Messung wächst. Mehr Richtfunkstrecken führen nicht nur zu mehr Messwerten, sondern durch unterschiedliche Betriebsfrequenzen können außerdem zusätzliche Informationen gewonnen werden. Eine Richtfunkstrecke ist beispielsweise bei höheren Frequenzen

empfindlicher gegenüber Nebel [16].

Das Potential dieser Technologie ist hoch und ihr Mehrwert für die Gesellschaft, vor allem in Entwicklungsländern, aber nicht nur dort, ist klar ersichtlich.

Der Technologie sind allerdings auch Limitierungen gesetzt, welche im folgenden behandelt werden. Die Empfindlichkeit ist grundsätzlich von der Anwendung und den Eigenschaften (Frequenz und Länge) der Richtfunkstrecke abhängig. Betrachten wir den Frequenzbereich 20 GHz bis 40 GHz, dann führt Regen zu einem stärkeren Schwund, als beispielsweise der Wasserdampf in der Atmosphäre. Die Genauigkeit ist an das Auflösungsvermögen des Schwunds gekoppelt. Aktuelle Richtfunksysteme ermitteln den Schwund in Stufen im Bereich von 1-dB- oder Drittel-dB-Schritten. Durch diese grobe Auflösung kommt es zu einem starken Quantisierungsfehler, welcher sich negativ auf die mit dem Verfahren geschätzte Regenintensität auswirkt. Für den regulären Betrieb von Richtfunkstrecken und dessen Monitoring ist diese grobe Quantisierung ausreichend. Doch für viele Messanwendungen ist diese Quantisierung zu ungenau, so dass eine Verfeinerung bei zukünftigen Generationen von Richtfunksystemen auch hier das Anwendungsspektrum der Technologie erweitern würde.

Eine weitere Fehlerquelle liegt darin, dass die gemessenen Dämpfungen nicht nur aus dem Schwund durch Regen resultieren, sondern auch durch andere Effekte, wie die Luftfeuchtigkeit, verursacht werden. Diese zusätzliche Dämpfung führt zu einer Überschätzung der Regenintensität. Um die Genauigkeit dieses Verfahrens zu erhöhen, muss man diese Effekte kompensieren.

Zusammenfassend ist diese Technologie ein Werkzeug, das für das Monitoring von Niederschlägen im urbanen Bereich oder in Entwicklungsländern geeignet ist und so einen zusätzlichen Beitrag bei der Überwachung der Umwelt leisten kann. Mit Blick auf die Evolution der Richtfunksysteme, kann man auf eine Steigerung des Potenzials dieser Technologie schließen.

## 1.2 Wet-Antenna-Effekt

Eine Fehlerquelle, welche dazu führt, dass die Regenintensität überschätzt wird, ist der Wet-Antenna-Effekt. Während eines Regenereignisses können sich auf den Radomen Wasserfilme, Tropfen oder Rinnsale bilden, die während und nach dem Ereignis einen Dämpfungsbeitrag zu der Pfaddämpfung einer Richtfunkstrecke liefern. Diesen Dämpfungsbeitrag, die Wet-Antenna-Dämpfung, kann man bei der Pegelmessung registrieren. Der Wet-Antenna-Effekt bezeichnet somit die Zunahme der Funkübertragungsdämpfung durch eine unmittelbare Wasserbenetzung der Antennen. Ursächlich für eine Benetzung und die resultierende Dämpfung ist allerdings nicht immer Regen, sondern auch andere meteorologische Phänomene wie Tau oder Eis können sie hervorrufen. Bei Letzterem stellt sich allerdings aus semantischer Sicht die Frage, ob der Begriff Wet-Antenna-Effekt diesen Fall abdeckt.



Ziel der Wet-Antenna-Korrektur ist es, die Pfaddämpfung von der Wet-Antenna-Dämpfung zu bereinigen. Der nach dieser Korrektur verbleibende Schwund ist im Idealfall, abgesehen von anderen Fehlerquellen, wie zum Beispiel Quantisierungsfehler, nur durch den Regen entlang der Richtfunkstrecke verursacht worden. Bei der anschließenden Ermittlung der Regenintensität wird so nur der Schwund berücksichtigt, der vom Regen alleine hervorgerufen wurde.

## 1.3 DFG-Projekt IMAP

Diese Arbeit ist im Zuge des interdisziplinären Projekts *Integration von Mikrowellen-Richtfunkdaten zur Niederschlagsanalyse in komplexem Gelände: Theoretische Aspekte und hydrometeorologische Anwendungen* (IMAP), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), entstanden. An diesem trilateralen Projekt zwischen Deutschland, Israel und Palästina arbeiteten Wissenschaftler der Einrichtungen *Karlsruhe Institute of Technology*, *Technische Universität München* (Deutschland), *An-Najah National University* (Palästina), *Tel Aviv University*, *Kinneret Limnological Laboratory* und *Jerusalem College of Technology* (Israel) mit der Unterstützung des *Israel Hydrological Service* und des *Deutschen Wetterdienstes* zusammen.

Das Ziel des Projekts war es, bestehende Verfahren der Niederschlagsmessung basierend auf Richtfunkdaten zu verbessern und neue Methoden zu entwickeln. Diese Niederschlagsdaten wurden zusammen mit anderen Daten von Wetterradaren und der Orographie des Gebiets in einem hydrometeorologischen Modellsystem dazu verwendet, um das Abflussverhalten von Regenwasser zu simulieren und basierend auf diesen Simulationsdaten Frühwarnsystem für Überschwemmungen zu verbessern.

In einem Arbeitspaket wurden dabei der Einfluss von Wasser auf der Oberfläche einer Richtfunkantenne und dessen Auswirkung auf die Pfaddämpfung der Richtfunkstrecke untersucht. Ebenfalls im Zuge dieses Arbeitspakets wurde ein Verfahren entwickelt, diesen Effekt zu kompensieren und bereinigte Schwunddaten für die Niederschlagsermittlung zu generieren. Die Forschungsergebnisse dieses Arbeitspakets bilden die Grundlage dieser Dissertation.

## 1.4 Stand der Technik: Wet-Antenna-Effekt

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Wet-Antenna-Effekt und dessen Korrektur. Zum übergeordneten Thema der schwundbasierten Regenschätzung bei Richtfunkstrecken wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten einige Referenzen genannt. Einen vertiefenden Überblick zu dieser Technologie liefern die beiden Übersichtsartikel [8] und [21].

Eine der ersten Modellierungen des Wet-Antenna-Effekts wurde in [22] präsentiert. Dabei wird der Einfluss von Wasser auf einem Radom und einem Reflektor durch

einen homogenen Wasserfilm modelliert und die Transmission anhand eines Mehrschichtproblems analytisch berechnet. Die Wasserfilmdicke wird dabei für sphärische Radome als Funktion von der Regenintensität approximiert.

In der Studie [23] wurde der dämpfende Einfluss von Tau auf einer Reflektorantenne bei unterschiedlichen Frequenzen untersucht.

Die Korrelation zwischen der Regenintensität und der Wet-Antenna-Dämpfung bei Richtfunkantennen wurde in [24] experimentell für die Frequenzen 23 GHz, 26 GHz und 38 GHz gezeigt. Bei dem Versuch wurden die drei Richtfunkantennen mithilfe eines Sprinklers bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten benetzt und die Wet-Antenna-Dämpfung gemessen. Des Weiteren wurden die drei Richtfunkantennen in Richtfunkstrecken betrieben und die über ein Jahr gesammelten Messergebnisse ausgewertet. Das Resultat dieser Beobachtung ist ein Modell der Wet-Antenna-Dämpfung als Funktion von der Regenintensität. Das ermittelte Modell ist dabei stark von der jeweiligen Antenne abhängig.

Der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts auf die Verbindung zwischen einer Bodenstation und einem Satelliten wurde ebenfalls untersucht [25]. Ergebnis dieser Untersuchung ist unter anderem ein heuristisches Modell für die Wet-Antenna-Dämpfung. Dieses Modell nutzt eine mit einem Sprinkler ermittelte, maximale Wet-Antenna-Dämpfung, die mit einem weiteren Parameter skaliert wird. Das Modell liefert die Wet-Antenna-Dämpfung als Funktion von der gesamten gemessenen Dämpfung.

Dieses Modell wurde bei einer 850 m langen Richtfunkstrecke bei 50 GHz in einer modifizierten Form verwendet [26]. Bei dem modifizierten Modell wird zwischen „während des Regens“ und „nach dem Regen“ unterschieden. Im ersten Fall wird das ursprüngliche Modell verwendet. Nach dem Regen wird das Modell um eine zeitlich abklingende Komponente erweitert, die das Abtrocknen der Antenne modelliert. Die Untersuchungen zeigen, dass der Wet-Antenna-Effekt nach dem Regen innerhalb von wenigen Minuten abklingt.

Die in [27] präsentierte Wet-Antenna-Korrektur für Richtfunkstrecken geht von dem Ansatz aus, dass die Benetzung auf der Antenne ein homogener Wasserfilm ist und dass die Dicke des Wasserfilms von der Regenintensität abhängt (vgl. [22]). Die Funktion zwischen der Regenintensität und der Dicke des Wasserfilms wird dabei durch eine Ausgleichsrechnung ermittelt. Durch die Dicke des Radoms und die Dicke der Wasserschicht sowie aus deren elektromagnetischen Eigenschaften erhält man ein Mehrschichtproblem. Über dessen Lösung wird die Wet-Antenna-Dämpfung ermittelt.

Einen heuristischen Ansatz der Wet-Antenna-Korrektur zeigt [28]. Dabei wird angenommen, dass die Wet-Antenna-Dämpfung unabhängig von der Regenintensität ist und einen konstanten Wert hat. Durch Kalibrieren der Richtfunkdaten mithilfe der Niederschlagsdaten von Wetterradaren wird dieser konstante Wert für die Wet-Antenna-Dämpfung bestimmt. Zu beachten ist, dass dieses Verfahren für Richtfunkssysteme entwickelt wurde, die die minimale und die maximale Empfangsleistung während eines Zeitintervalls messen und nicht die aktuelle Empfangsleistung zu einem

bestimmten Zeitpunkt.

Der zeitliche Verlauf der Wet-Antenna-Dämpfung wurde anhand einer 38 GHz Richtfunkstrecke in [29] untersucht. Resultat dieser Untersuchung ist ein dynamisches Modell, das den Anstieg der Dämpfung am Anfang eines Regenereignisses und das exponentielle Abklingen der Dämpfung nach dem Regenereignis berücksichtigt. Während des Regens erreicht die Wet-Antenna-Dämpfung einen Maximalwert. Dieser maximale Wert und die Zeitkonstante des Anstiegs der Dämpfung beschreiben den Verlauf der Wet-Antenna-Dämpfung. Der Abklingprozess wird dabei nicht mathematisch beschrieben, da die gemessene Pfaddämpfung nach dem Regenereignis aus der bekannten Grunddämpfung und der Wet-Antenna-Dämpfung besteht und so der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts direkt bestimmt werden kann. Des Weiteren zeigte das Experiment, dass die Korrelation zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung und der Regenintensität sehr schwach ist.

In einem anderen Langzeitexperiment wurde der Einfluss von Fehlerquellen auf die Niederschlagsermittlung mit Richtfunkstrecken untersucht [30]. Dabei wurde auch die Benetzung der Richtantennen und die resultierende Auswirkung auf die Pfaddämpfung untersucht. Eine Erkenntnis dieser Studie ist das Verhalten des Wet-Antenna-Effekts in Abhängigkeit von der Beschichtung der Radome. So fallen bei Radomen mit hydrophober Beschichtung die Spitzenwerte der Wet-Antenna-Dämpfung geringer aus, da das aufgetragene Wasser sofort abperlt. Zurückbleibende Wassertropfen auf dem Radom benötigen allerdings mehr Zeit zum Abtrocknen als Radome mit einer Benetzung in Form eines Wasserfilms. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass Tau auf dem Radom zu einer starken Wet-Antenna-Dämpfung führt.

Eine weitere Studie untersuchte den Wet-Antenna-Effekt anhand von acht kurzen Richtfunkstrecken (Länge unter 500 m) in einem kommerziellen Backhaul-Richtfunknetzwerk im oberen Ka-Band<sup>2</sup> [31]. Resultat dieser Studie ist, dass bei diesen Richtfunkstrecken der Wet-Antenna-Effekt bei schwachem Regen die Pfaddämpfung dominiert. Die Wet-Antenna-Dämpfung kann, abhängig vom Regen, unterschiedliche Werte annehmen. Bei sehr starkem Regen wurden Wet-Antenna-Dämpfungswerte von bis zu 9 dB beobachtet.

Der Einfluss von Wasser auf der Oberfläche einer Phased-Array-Antenne wurde in [32] untersucht. Dazu wurden mithilfe von mit Wasser gefüllter Luftpolsterfolie unterschiedliche Benetzungsmuster auf der Antenne realisiert. Anschließend wurde die Richtcharakteristik mit einer Antennenmesskammer vermessen. Die stärkste Wet-Antenna-Dämpfung wurde dabei mit partiellen Wasserfilmen realisiert.

Der Konsens der bisherigen Forschung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen. Die Studien zeigen, dass die Ausprägung des Wet-Antenna-Effekts von mehreren Eigenschaften der Richtfunkantenne abhängt. Dazu zählt, ob die Antenne ein Radom besitzt, auf dem sich das Wasser sammelt oder ob es sich um eine Antenne ohne Radom handelt, bei der sich das Wasser auf dem Reflektor sammelt. Auch das

---

<sup>2</sup>Ka-Band: 26,5 - 40 GHz

verwendete Material des Radoms oder Reflektors – ob es hydrophob ist oder nicht – hat einen Einfluss auf die Stärke des Wet-Antenna-Effekts und auf sein dynamisches Verhalten. Wie sich eine Antenne bei Benetzung mit Wasser verhält, ist von mehreren Faktoren abhängig und kann nicht pauschal vorhergesagt werden. Auch kann man nicht von der Betriebsfrequenz der Antenne auf den Verlauf des Wet-Antenna-Effekts schließen. Fest steht aber, dass der Wet-Antenna-Effekt zu einer signifikanten Unsicherheit bei der Regenschätzung basierend auf Schwunddaten führt. Vor allem bei Richtfunkstrecken, die wenig sensitiv für Niederschlag sind oder bei niedrigen Regenraten kommt diese Unsicherheit zum Tragen.

### 1.5 Wissenschaftliche Forschungsfragen

Im Folgendem werden die Lücken in der Forschung umrissen.

Zunächst legten bisherige Wet-Antenna-Studien ihren Schwerpunkt nicht auf die elektromagnetische Charakterisierung der Antenne. Außerdem wurden einige Aspekte des Verhaltens einer benetzten Antenne nicht untersucht und die Frage, wie sich die Antennenparameter einer Antenne (Richtfaktor, Antennenwirkungsgrad und Eingangsreflexionsfaktor) in Abhängigkeit von der Benetzung verändern, wurde noch nicht beantwortet. Vor allem wurde die Frage, wo bei einer benetzten Antenne die Verluste auftreten, noch nicht final geklärt, da die verwendeten Modelle stark vereinfachen und beispielsweise nur von ebenen Wellen ausgehen.

Einen definierten Wasserfilm auf einer Antenne im Labor zu erzeugen, ist eine große Herausforderung. Bei bisherigen Vermessungen von mit einem Wasserfilm benetzten Antennen war der Wasserfilm nur von ungleichmäßiger Schichtdicke. Dadurch kommt es vor allem im Vergleich zwischen Messung und Simulation durch die unterschiedliche Modellierung mit einem als perfekt homogen angenommenen Wasserfilm in der Simulation zu einer starken Abweichung und einer schlechten Vergleichbarkeit.

Die in der bisherigen Forschung entwickelten Korrekturverfahren für den Wet-Antenna-Effekt konzentrieren sich auf die vorhandenen Schwunddaten der Richtfunkstrecke und versuchen aus diesen mithilfe von Werkzeugen der Signalverarbeitung und dem Vergleich zu den Regenintensitäten, gemessen mit dem Wetterradar oder mit dem Pluviometer, Rückschlüsse auf den Effekt zu ziehen. Die oben erwähnten Fehlerquellen bei Wetterradaren oder Pluviometern haben bei diesem Vergleich ebenfalls einen Einfluss. Es stellt sich die Frage, ob der Wet-Antenna-Effekt über einen anderen Zugang direkt gemessen werden kann und was ein Korrekturverfahren über diesen Zugang leisten kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, die oben aufgeführten Lücken in der Forschung zu schließen. Im Speziellen beantworte ich in dieser Arbeit folgende Fragen:

1. Wie setzt sich der Wet-Antenna-Effekt zusammen, beziehungsweise, welche Antennenparameter beeinflusst das Wasser auf einer Antenne?

2. Kann man den Wet-Antenna-Effekt direkt registrieren, statt wie bisher üblich, indirekt über die Schwunddaten?
3. Kann der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts direkt über den gemessenen Eingangsreflexionsfaktor geschätzt werden?
4. Wie tauglich ist eine solche Schätzung, um die Genauigkeit der Niederschlagsmessung zu verbessern?

Diese vier wissenschaftlichen Forschungsfragen werde ich in den folgenden Kapiteln behandeln.

## 1.6 Methodik und Innovation

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Methoden, welche in dieser Arbeit für die Beantwortung der oben genannten wissenschaftlichen Fragen eingesetzt werden.

Um den Einfluss von Wasser auf dem Radom zu untersuchen, wurde ein Computermodell einer Pyramiden-Hornantenne mit einem homogenen Wasserfilm auf dem Radom erstellt und die Performanz der Antenne simuliert. Die Permittivität des Wassers wurde dabei mithilfe des Debye-Modells berechnet. Für die Simulation bei 18 GHz wurde der Frequenzbereichslöser von CST Microwave Studio verwendet. Resultat dieser Simulation sind die Antennenparameter Richtfaktor, Antennenwirkungsgrad und Eingangsreflexionsfaktor in Abhängigkeit von der Dicke des Wasserfilms. Basierend auf diesen drei Antennenparametern wurde ein Modell für den Wet-Antenna-Effekt entwickelt.

Für die Validierung der Simulationsergebnisse wurde eine Pyramiden-Hornantenne mit denselben geometrischen Abmessungen und Eigenschaften wie im Modell der Simulation angefertigt. Die Benetzung des Radoms wurde durch Zuhilfenahme eines Wasserkreislaufs, bestehend aus einer Pumpe, einem Durchflussmesser, einem Verteilnetzwerk und einem Wasserreservoir, realisiert. Um einen möglichst homogenen Wasserfilm zu generieren, floss das Wasser zwischen dem Radom und einer Kunststoffolie. Diese Folie wurde ebenfalls in der Simulation berücksichtigt. Die Antenne wurde mit einem permanenten Wasserfilm in einer reflexionsarmen Antennenmesskammer mit Hilfe der Nahfeld-Fernfeld-Technik vermessen. Die Resultate dieser Messung sind der Richtfaktor und der Antennenwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Durchfluss des Wasserfilms. Der dazugehörige Eingangsreflexionsfaktor der Antenne wurde mithilfe eines weiteren Netzwerkanalysators gemessen.

Für die Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts unter realen Umweltbedingungen wurde ein Instrument mit sechs dual polarisierten Richtfunkantennen für das K-<sup>3</sup> und Ka-Band entwickelt und gebaut. Bei dem Instrument handelt es sich um ein

---

<sup>3</sup>K-Band: 18 - 27 GHz

Stepped-Frequency-Continuous-Wave-Radar, basierend auf einem vektoriellen Netzwerkanalysator, welcher die Intensität der Reflexion entlang des Ausbreitungsweges der Funkstrecke, bestehend aus dem Instrument und einem in 666 m Entfernung stehenden Reflektor, misst. Aus diesen Entfernungsprofilen werden die Reflexion der Antenne sowie die Pfaddämpfung der Funkstrecke für die horizontale und die vertikale Polarisierung ermittelt. Dieses Feldexperiment wurde ein Jahr betrieben und jede der sechs Antennen wurde minütlich vermessen. Die auf dem Testgelände montierten meteorologischen Messinstrumente liefern den Vergleichswert für die Regenintensität.

Basierend auf den Daten des Feldexperiments wurden zwei Wet-Antenna-Korrekturverfahren entwickelt, die die Wet-Antenna-Dämpfung anhand des Eingangsreflexionsfaktors bestimmen. Durch diese Korrekturverfahren approximiert man den durch den Regen hervorgerufenen Schwund, über den die Regenintensität berechnet wird. Diese Regenintensität wird mit der Regenintensität, gemessen mit den meteorologischen Messinstrumenten, über den Zeitraum eines Jahres verglichen, indem die Korrelation ausgewertet wird. Für die Bewertung der beiden Verfahren wird die Regenintensität basierend auf den unkorrigierten Schwunddaten ermittelt.

Einige der in dieser Arbeit präsentierten Methoden sind neuartig. Diese Innovationen sind wie folgt:

- Messung der Antennenparameter Richtfaktor, Antennenwirkungsgrad und Eingangsreflexionsfaktor in Abhängigkeit von der Wasserfilm-Schichtdicke einer mit einem homogenen Wasserfilm benetzten Antenne
- Ein Feldexperiment mit sechs Richtfunkantennen zur Untersuchung der Pfaddämpfung und des Eingangsreflexionsfaktors der Antennen
- Zwei Wet-Antenna-Korrekturverfahren basierend auf dem Eingangsreflexionsfaktor der Richtfunkantenne

Diese drei Innovationen und die vier wissenschaftlichen Forschungsfragen bilden den inhaltlichen Kern dieser Arbeit.

## 1.7 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 liefert die Theorie für die Richtfunkstecken sowie für die Regenschätzung mit Richtfunk-Schwunddaten. Des Weiteren behandelt dieses Kapitel die elektromagnetischen Eigenschaften von Wasser. Es erörtert, auf welche Parameter der Wet-Antenna-Effekt einen Einfluss hat und liefert ein Modell für die Wet-Antenna-Dämpfung.

In Kapitel 3 wird der Einfluss von Nässe auf dem Radom einer Antenne untersucht. Dazu werden Simulations- und Messergebnisse der Antennenparameter einer Hornantenne präsentiert, bei der das Radom mit einem Wasserfilm bedeckt ist.

In Kapitel 4 werden das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Millimeterwellen-Instrument vorgestellt, sowie der Aufbau des gesamten Feldexperiments. Dieses Experiment liefert reale Schwunddaten von einer Richtfunkstrecke mit sechs Richtfunkantennen in den Frequenzbändern K (18 GHz bis 27 GHz) und Ka (26,5 GHz bis 40 GHz) sowie ihren komplexen Eingangsexreflexionsfaktor.

Kapitel 5 behandelt die beiden entwickelten Korrekturverfahren und deren Eignung für die Verbesserung der Niederschlagsmessung. Dazu werden Ergebnisse von Langzeit-Messreihen des Feldexperiments verwendet und mit meteorologischen Instrumenten verglichen.

Kapitel 6 fasst schließlich diese Arbeit zusammen, rekapituliert die wesentlichen Erkenntnisse und versucht, die wissenschaftliche Fragestellung kompakt zu beantworten. Des Weiteren wird ein Ausblick auf das Potential der in dieser Arbeit vorgestellten Wet-Antenna-Korrekturansätze gegeben.





## 2 Niederschlag und Richtfunk: Theorie

Dieses Kapitel behandelt den Niederschlag, die Richtfunkstrecke sowie die Wirkung des Niederschlags auf die Funkübertragung. Dazu betrachten wir zuerst die Natur des Regens, wie die Tropfenverteilung, die Fallgeschwindigkeit der einzelnen Regentropfen und die Regenintensität. Da Regentropfen hauptsächlich aus Wasser bestehen, werden anschließend die elektrodynamischen Eigenschaften von Wasser betrachtet. Daraufhin werden die Eigenschaften einer Richtfunkantenne behandelt, und darauf folgt die Betrachtung einer Richtfunkstrecke. Danach werden die Verknüpfung zwischen Regenintensität und der Dämpfung durch den Regen und die damit verbundene Möglichkeit der Niederschlagsschätzung vorgestellt. Zusätzlich werden noch die Einflüsse von Gasen wie Sauerstoff und Wasserdampf in der Atmosphäre auf die Dämpfung betrachtet. Zuletzt wird der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts anhand der in diesem Kapitel gezeigten Modelle behandelt.

### 2.1 Regen

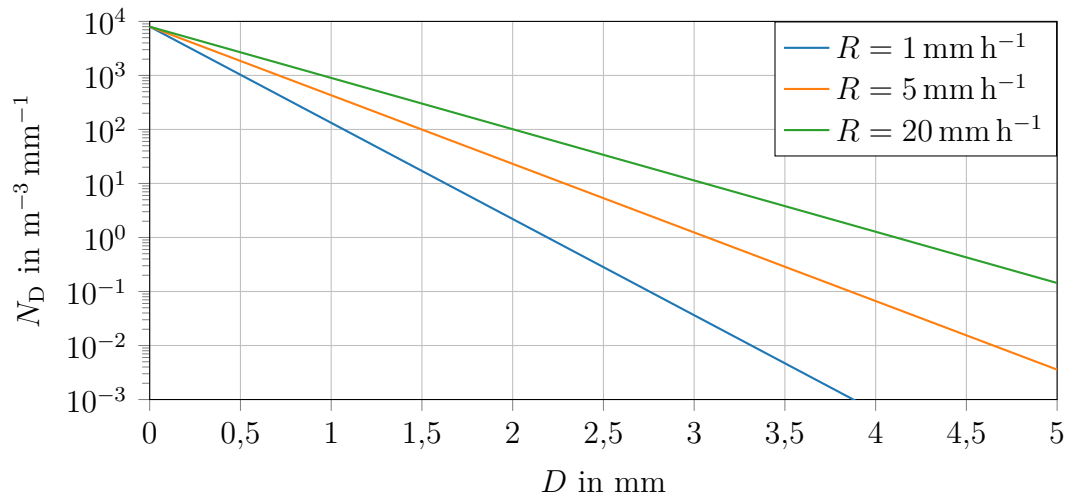
Regen ist wohl die vertrauteste Form des Niederschlages. Dabei handelt es sich um flüssigen Niederschlag, der sich von festem Niederschlag wie Schnee, Hagel oder Graupel unterscheidet. Regen besteht hauptsächlich aus Wasser, in dem Stoffe aus der Atmosphäre gelöst sind. In dieser Arbeit werden diese Stoffe vernachlässigt und der Regen wird vereinfacht als reines Wasser betrachtet. Bei der Entstehung von Regen bilden sich Tropfen, die zur Erde fallen. Während des Falls verbinden sich die Tropfen zu größeren Tropfen. Daraus resultiert eine statistische Verteilung der Tropfen, die durch die Tropfenverteilung (DSD<sup>1</sup>) beschrieben wird. Eine weitere Eigenschaft von Regen ist die Fallgeschwindigkeit der einzelnen Tropfen. Aus den Parametern Fallgeschwindigkeit und Tropfenverteilung lässt sich die Regenintensität berechnen, welche ein wichtiges Maß für den Niederschlag ist.

#### 2.1.1 Tropfenverteilung

Um die statistische Natur von Regenfeldern modellhaft zu beschreiben, betrachten wir zunächst ein würfelförmiges Volumen in einer Regenzelle. In diesem Würfel sind Regentropfen in unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlicher Geschwindigkeit enthalten. Die Verteilung der Tropfengröße  $N_D$  lässt sich statistisch nach [33]

---

<sup>1</sup>englisch: drop size distribution



**Abb. 2.1:** Einfach logarithmische Darstellung der Tropfenverteilung in Abhängigkeit vom Durchmesser eines Tropfens nach [33]. Ein Regenereignis mit hoher Regenintensität  $R$  führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von großen Tropfen.

beschreiben:

$$\frac{N_D}{\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}} = \frac{N_0}{\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}} \exp(-\Lambda D), \quad (2.1)$$

mit  $D$  als Durchmesser der einzelnen Tropfen. Da die Form eines Regentropfens nicht sphärisch, sondern durch den Luftwiderstand verformt ist, entspricht  $D$  dem Durchmessers einer Kugel mit dem äquivalenten Volumen des Regentropfens. Der Parameter  $N_0$  hat nach [33] einen Wert von

$$N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}. \quad (2.2)$$

Der Parameter  $\Lambda$  ist eine Funktion von der Regenintensität  $R$  und lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\Lambda = 4,1 \text{ mm}^{-1} \left( \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} \right)^{-0,21} \quad (2.3)$$

Nach diesem Modell ist die Häufigkeit eines Tropfens mit bestimmter Größe abhängig von der Regenintensität  $R$ . Je größer ein Tropfen ist, umso seltener kommt er vor. Abbildung 2.1 zeigt den Verlauf der Tropfenverteilung in Abhängigkeit vom Durchmesser des Tropfens nach [33].

Die Art des Regens, zum Beispiel ein heftiger Niederschlag während eines Gewitters oder ein leichter Sprühregen, hat einen Einfluss auf die Tropfenverteilung. Diesen Umstand können wir mit der Wahl der Parameter  $N_0$  und  $\Lambda$  berücksichtigen [34].

### 2.1.2 Fallgeschwindigkeit

Die Fallgeschwindigkeit  $v$  eines Objekts in der Atmosphäre ist von mehreren Faktoren, wie Luftdruck, Masse, Größe, Form und Beschleunigungsweg, abhängig. Beim freien Fall in der Atmosphäre stellt sich aufgrund der zunehmenden Luftreibung bei steigender Geschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit ein. Für die bodennahe Bestimmung der Regenintensität nehmen wir an, dass die Geschwindigkeit  $v$  der Tropfen aufgrund des langen Beschleunigungsweges der Grenzgeschwindigkeit  $v_t$  entspricht.

Die Grenzgeschwindigkeit von Wassertropfen steigt mit deren Masse, so dass größere Tropfen mit einer höheren Geschwindigkeit fallen als kleine Tropfen [35].

Durch die Luftreibung verformen sich die Tropfen, so dass sie nicht mehr sphärisch sind. In [36] wird dieser Effekt berücksichtigt und die Form eines Tropfens durch ein Rotationsellipsoid modelliert. Basierend auf dieser Formel können wir die Grenzgeschwindigkeit  $v_t$  ermitteln.

Wassertropfen werden mit zunehmender Größe instabil und bersten [37], [38]. Die überbleibenden Tropfenfragmente sind kleiner als der ursprüngliche Tropfen, aus dem sie entstanden sind [39], bewegen sich aber zunächst mit dessen Geschwindigkeit weiter. Diese Tropfen fallen also schneller, als ihre Grenzgeschwindigkeit ist [40].

Die Grenzgeschwindigkeit  $v_t$  lässt sich mit dem Modell aus [41] als eine Funktion von dem Tropfendurchmesser  $D$  wie folgt beschreiben:

$$\frac{v_t(D)}{\text{m s}^{-1}} = 3,778 \left( \frac{D}{\text{mm}} \right)^{0,67} \quad \forall D = (0,5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}) \quad (2.4)$$

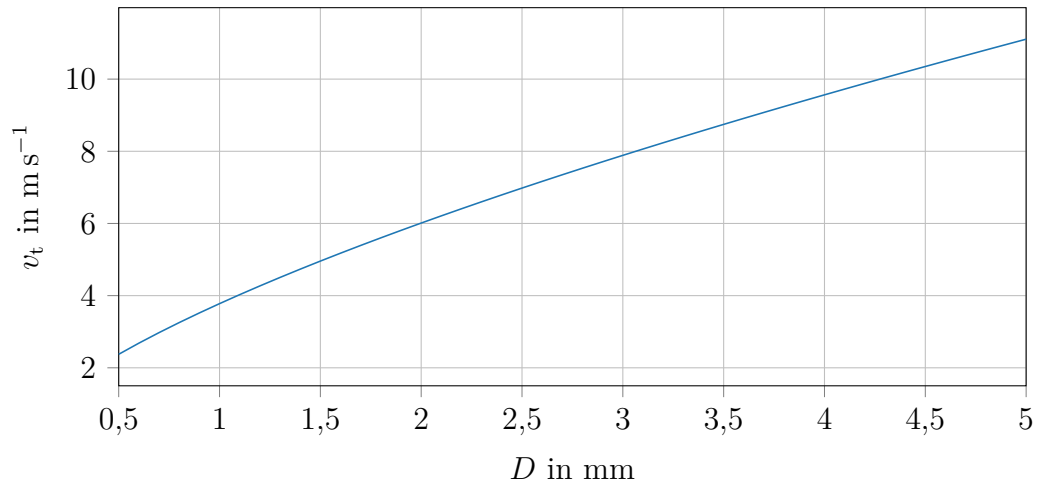
Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf der Grenzgeschwindigkeit eines fallenden Tropfens in Abhängigkeit von dessen Durchmesser  $D$  nach Formel (2.4). Das Modell aus [41] steht stellvertretend für die Modelle zur Berechnung der Grenzgeschwindigkeit. Komplexere Modelle berücksichtigen weitere Faktoren wie den Luftdruck. Die Publikation [42] gibt einen Überblick der gängigen Modelle zur Berechnung der Grenzgeschwindigkeit von Tropfen.

### 2.1.3 Regenintensität

Die Regenintensität  $R$  sagt aus, wie viel Volumen an Wasser pro Zeit auf einer Fläche abregnet. Laut herrschender Konvention beschreibt die Regenintensität, wie viele Liter Wasser auf eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  pro Stunde niedergehen. Demnach beträgt die Einheit für die Regenintensität:

$$[R] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{ h}} = \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^2 \text{ h}} = \text{mm h}^{-1} \quad (2.5)$$

Die Niederschlagsmenge pro Fläche berechnet sich somit in mm.



**Abb. 2.2:** Verlauf der Grenzgeschwindigkeit  $v_t$  eines Tropfens in Abhängigkeit von dem Durchmesser  $D$  nach [41] im Gültigkeitsbereich des Modells  $D \in (0,5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ .

Von einem Regenfeld mit bekannter Tropfenverteilung  $N_D$  und Fallgeschwindigkeit der Tropfen  $v$  entspricht die Regenintensität  $R$ :

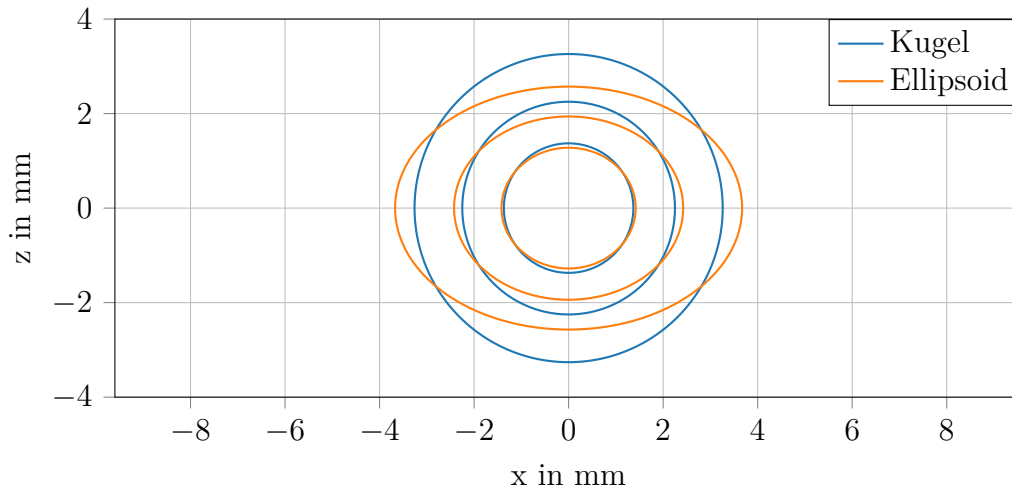
$$\frac{R}{\text{mm h}^{-1}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \int_0^{\infty} \frac{N_D(D)}{\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}} \frac{\pi \left(\frac{D}{\text{mm}}\right)^3}{6} \frac{v(D)}{\text{m s}^{-1}} d\frac{D}{\text{mm}}, \quad (2.6)$$

mit der Verteilung der Tropfengröße  $N_D$  in  $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ , dem Tropfendurchmesser  $D$  in mm und der Geschwindigkeit der Tropfen  $v$  in  $\text{m s}^{-1}$ . Durch den Faktor vor dem Integral erhalten wir die Regenintensität  $R$  in der gebräuchlichen Einheit  $\text{mm h}^{-1}$ .

### 2.1.4 Tropfenform

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines Regentropfens ist dessen Form. Wie schon unter Unterabschnitt 2.1.2 erwähnt, kommt es durch den Luftwiderstand im freien Fall zu einer Verformung des Wassertropfens. Diese orientierungsabhängige Verformung hat einen starken Einfluss auf die elektrodynamischen Eigenschaften, besonders im Hinblick auf die polarisationsabhängige Streuung elektromagnetischer Wellen.

Abbildung 2.3 zeigt den vertikalen Querschnitt eines Tropfens einmal als Kugel und einmal als Ellipsoid nach [36]. Untersuchungen im Windkanal haben gezeigt, dass sich bei einem Tropfen im freien Fall die Unterseite des Tropfens abflacht [43], so dass die Modellierung als Ellipsoid eine starke Vereinfachung ist. Diesen Fakt berücksichtigen hingegen [44] und [45]. Da die Tropfenform die Grenzgeschwindigkeit beeinflusst, muss sie bei der Wahl der Modelle Berücksichtigt werden.



**Abb. 2.3:** Vertikaler Querschnitt durch einen Tropfen mit den äquivalenten Durchmessern  $D \in [2,74 \text{ mm}, 4,5 \text{ mm}, 6,52 \text{ mm}]$ , einmal in der Form einer Kugel in blau und einmal in der Form eines Ellipsoids nach [36] in orange.

## 2.2 Permittivität des Wassers

Da Regen hauptsächlich aus Wasser besteht, beschäftigen wir uns in diesem Abschnitt mit dessen elektrodynamischen Eigenschaften. Wasser ist aufgrund seiner molekularen Struktur ein Dipolmolekül mit einem elektrischen Dipolmoment. In einem elektrischen Feld wirkt deshalb ein Drehmoment auf das Molekül, welches sich dementsprechend ausrichtet. Die resultierende Reibung zwischen angrenzenden Molekülen entziehen dem elektrischen Feld Energie. Diese Energie wird in thermische Energie umgewandelt.

Die Orientierungs-Polarisierbarkeit ist eine wichtige elektrodynamische Eigenschaft von Wasser. Auf makroskopischer Ebene lässt sich diese Eigenschaft eines Stoffes mit dessen relativer Permittivität  $\varepsilon_r$  beschreiben. Die relative Permittivität  $\varepsilon_r$  ist ein komplexer Wert, den wir darstellen als:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (2.7)$$

Dabei entspricht  $\varepsilon_r'$  dem Realteil der relativen Permittivität und  $\varepsilon_r''$  dem negativen Imaginärteil der relativen Permittivität, so dass  $\varepsilon_r''$  den Wert  $-\text{Im } \varepsilon_r$  hat.

In einem Medium mit komplexer Permittivität treten dielektrische Verluste auf. Diese dielektrischen Verluste kann man durch den dielektrischen Verlustfaktor

$$\tan(\delta_e) = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (2.8)$$

beschreiben. Je größer der dielektrische Verlustfaktor  $\tan(\delta_e)$  ist, umso größer sind auch die dielektrischen Verluste in einem Medium. Diese dielektrischen Verluste

lassen sich mithilfe der dielektrischen Verlustleistungsdichte  $p$  wie folgt

$$p = 2\pi f \varepsilon_r'' \varepsilon_0 \frac{|E|^2}{2} \quad (2.9)$$

bestimmen. Dabei ist  $\varepsilon_0$  die elektrische Feldkonstante,  $f$  die Frequenz und  $E$  die elektrische Feldstärke der elektromagnetischen Welle.

### 2.2.1 Debye-Modell

Das Debye-Modell beschreibt den Verlauf der relativen Permittivität  $\varepsilon_r$  eines polaren Stoffes (wie zum Beispiel Wasser) in Abhängigkeit von der statischen relativen Permittivität  $\varepsilon_{r0}$ , der optischen relativen Permittivität  $\varepsilon_{r\infty}$ , der Frequenz  $f$  sowie der Relaxationszeit  $\tau$ .

Die beiden Komponenten der relativen Permittivität  $\varepsilon_r$  erhalten wir nach [46, S. 108] durch

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + x^2} \quad \text{und} \quad \varepsilon_r'' = \frac{(\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty})x}{1 + x^2}. \quad (2.10)$$

Die Funktion  $x$  aus [46, S. 105] beschreibt die Frequenzabhängigkeit der Gleichungen (2.10):

$$x = \left( \frac{\varepsilon_{r0} + 2}{\varepsilon_{r\infty} + 2} \right) 2\pi f \tau \quad (2.11)$$

Die Modellierung der Permittivität nach Debye verwendet die Clausius-Mossotti-Gleichung. Dies führt zu dem Faktor  $\frac{\varepsilon_{r0}+2}{\varepsilon_{r\infty}+2}$  bei der Berechnung der Funktion  $x$  (vgl. [47]).

Das Debye-Modell schreibt man üblicherweise in der Form

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + j2\pi f \tau_r}, \quad (2.12)$$

mit  $\tau_r$  als Relaxationszeit. Dabei handelt es sich bei der Relaxationszeit  $\tau_r$  um eine andere Definition als bei der Definition für Relaxationszeit  $\tau$  in Formel (2.11) (siehe [48]).

Typisch für die Modellierung der Permittivität von Wasser bei 25 °C sind folgende Werte (wie sie auch in Kapitel 3 für die Simulation verwendet werden):

$$\varepsilon_{r0} = 78,4 \quad \varepsilon_{r\infty} = 3,1 \quad \tau_r = 8,27 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad (2.13)$$

### 2.2.2 Modifiziertes Debye-Modell nach Cole-Cole

In [48] erhöht man die Übereinstimmung zwischen dem Modell für die Permittivität nach [46, S. 108] und den Ergebnissen aus Experimenten, indem man eine weitere empirische Variable  $\alpha$  einführt. Das modifizierte Debye-Modell nach Cole-Cole hat die Form:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}}{1 + (j2\pi f\tau_r)^{1-\alpha}} \quad (2.14)$$

Die Variable  $\alpha$  kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Diese zusätzliche Parametrisierung dient dazu, die Streuung der Relaxationszeit  $\tau_r$  des Dielektrikums zu berücksichtigen [48]. Wenn die Variable  $\alpha$  den Wert 0 annimmt, wird das modifizierte Debye-Modell zu dem Debye-Modell aus Unterabschnitt 2.2.1.

Für die Modellierung der Permittivität von Wasser bei 19 °C sind folgende Werte nach [48] zu wählen:

$$\varepsilon_{r0} = 81 \quad \varepsilon_{r\infty} = 1,8 \quad \tau_r = 9,4 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad \alpha = 0,09 \quad (2.15)$$

### 2.2.3 Liebe-Modell

Da die relative Permittivität des Wassers stark von der Temperatur abhängt, betrachten wir in diesem Unterabschnitt ein Modell, das diesen Einfluss berücksichtigt.

Man kann mit den zwei oben präsentierten Modellen (Debye-Modell und modifiziertes Debye-Modell nach Cole-Cole) ebenfalls die relative Permittivität berechnen, wenn man die temperaturabhängigen Werte für die statische relative Permittivität  $\varepsilon_{r0}$ , die optische relative Permittivität  $\varepsilon_{r\infty}$ , die Relaxationszeit  $\tau_r$  und im Falle des Modells nach Cole-Cole, den Parameter  $\alpha$  weiß.

Das Liebe-Modell ist eine weitere Modifizierung des Debye-Modells, welches die Temperatur des Wassers berücksichtigt [49]. Dafür nutzt dieses Modell die modifizierte inverse Temperatur

$$\Theta = 1 - \frac{300 \text{ K}}{T}. \quad (2.16)$$

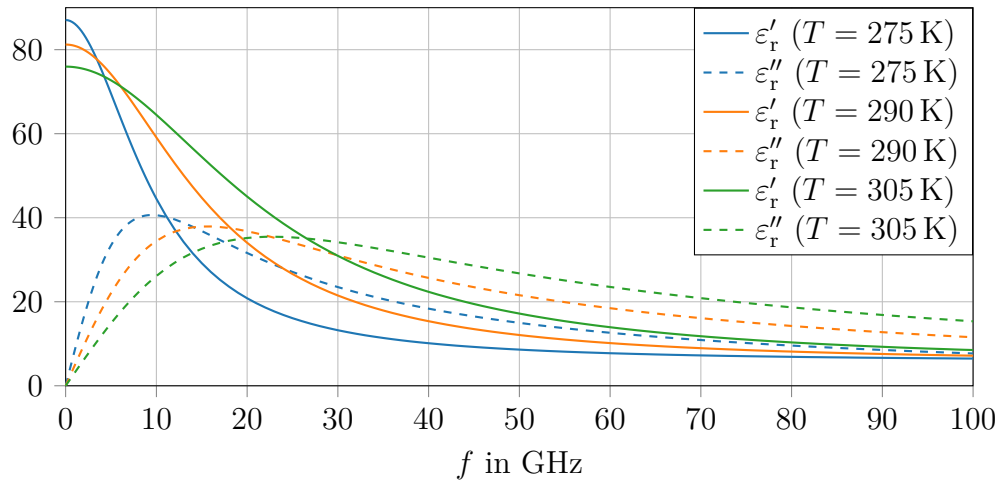
Mit Hilfe dieser Variable kann man die statische relative Permittivität  $\varepsilon_{r0}$  sowie die optische relative Permittivität  $\varepsilon_{r\infty}$  in Abhängigkeit von der Temperatur berechnen:

$$\varepsilon_{r0} = 77,66 - 103,3 \Theta \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{r\infty} = 0,066 \varepsilon_{r0} \quad (2.18)$$

Des Weiteren lässt sich mit  $\Theta$  die temperaturabhängige Relaxationsfrequenz  $f_D$  folgendermaßen bestimmen:

$$\frac{f_D}{\text{GHz}} = 20,27 + 146,5 \Theta + 314 \Theta^2 \quad (2.19)$$



**Abb. 2.4:** Verlauf der relativen Permittivität ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) von Wasser als Funktion von der Frequenz  $f$  nach dem Liebe-Modell.

Das Liebe-Modell verwendet die Relaxationsfrequenz  $f_D$ , welche sich mit

$$\tau_r = \frac{1}{2\pi f_D} \quad (2.20)$$

in die Relaxationszeit  $\tau_r$  umrechnen lässt. Mit den ermittelten temperaturabhängigen Werten für  $f_D$ ,  $\epsilon_{r0}$  und  $\epsilon_{r\infty}$  können wir nun mit dem Debye-Modell die relative Permittivität von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur berechnen:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\frac{f}{f_D}} \quad (2.21)$$

In dieser Form ist das Liebe-Modell bis zu einer Frequenz von 100 GHz gültig. In diesem Frequenzbereich beträgt der Gültigkeitsbereich für die Temperatur  $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$  für die statische relative Permittivität  $\epsilon_{r0}$  (vgl. [49]). Den gültigen Frequenzbereich könnten wir bis 30 THz erhöhen, wenn wir das Debye-Modell mit zusätzlichen Resonanzen ergänzten. Da kommerzielle Richtfunkstrecken allerdings im Frequenzbereich unter 100 GHz betrieben werden, ist das einfache Liebe-Modell ausreichend.

Abbildung 2.4 zeigt den Verlauf der beiden Komponenten  $\epsilon_r'$  und  $\epsilon_r''$  der relativen Permittivität des Wassers in Abhängigkeit von der Frequenz für die drei Temperaturen 275 K, 290 K und 305 K, welche in etwa  $2^\circ\text{C}$ ,  $17^\circ\text{C}$  und  $32^\circ\text{C}$  entsprechen.

## 2.3 Antenne

Der in Kapitel 1 beschriebene Wet-Antenna-Effekt beeinflusst die Eigenschaften der Antenne. Deshalb beschäftigen wir uns in diesem Abschnitt mit den grundlegenden Eigenschaften von Antennen mit Fokus auf Richtfunkantennen.



Die Aufgabe einer Antenne ist es, eine leitungsgebundene elektromagnetische Welle in eine elektromagnetische Freiraumwelle umzuwandeln, die sich ohne Medium ausbreiten kann. Dies beschreibt den Sendefall einer Antenne. Der umgekehrte Fall, eine elektromagnetische Freiraumwelle mithilfe einer Antenne in eine leitungsgebundene elektromagnetische Welle umzuwandeln, ist der Empfangsfall. Prinzipiell sind Antennen reziprok und können sowohl zum Senden als auch zum Empfangen verwendet werden. Die Reziprozität sagt auch aus, dass die Eigenschaften der Antenne im Empfangsfall und im Sendefall identisch sind. Eine Klasse von Antennen, die diese Reziprozität-Bedingung meist nicht erfüllt, sind die aktiven Antennen.

### 2.3.1 Nahfeld und Fernfeld

Der Umwandlungsprozess einer leitungsgebundenen Welle in eine ausbreitungsfähige Freiraumwelle findet nicht nur in beziehungsweise auf einer Antenne statt, sondern auch in ihrer direkten Umgebung. In diesem Bereich befindet sich das Nahfeld einer Antenne. Außerhalb dieses Bereichs liegt das Fernfeld einer Antenne, auch Fraunhofer-Region genannt. Dort kommen nur die Feldkomponenten vor, die zu einer ausbreitungsfähigen Freiraumwelle führen. Bezogen auf die Feldkomponenten ist der Übergang vom Nahfeld in das Fernfeld fließend, wird aber mit der technischen Grenze [50, S. 167]:

$$d_{\text{FF}} = 2 \frac{D^2}{\lambda_0}, \quad (2.22)$$

mit der Wellenlänge  $\lambda_0$  und der maximalen Ausdehnung der Antenne  $D$  angegeben. Befindet man sich in einem Abstand größer  $d_{\text{FF}}$ , so befindet man sich im Fernfeld.

Das Nahfeld wiederum kann in die zwei Unterbereiche reaktives Nahfeld und strahlendes Nahfeld aufgeteilt werden. Im reaktiven Nahfeld entstehen durch die Antenne oszillierende Felder, die nicht abgestrahlt werden. Durch das Oszillieren wird das reaktive Nahfeld periodisch mit Energie auf- und entladen. Die technische Grenze des reaktiven Nahfelds liegt bei (vgl. [50, S. 170]):

$$d_{\text{RNF}} = 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda_0}}. \quad (2.23)$$

In einem Abstand von 0 m bis  $d_{\text{RNF}}$  befindet sich somit das reaktive Nahfeld. Eine Störung des Feldes in diesem Bereich, zum Beispiel durch einen metallischen Körper, hat einen Einfluss auf die Antenne.

Der Bereich zwischen dem reaktiven Nahfeld und dem Fernfeld  $d_{\text{RNF}} < r < d_{\text{FF}}$  wird strahlendes Nahfeld oder auch Fresnel-Region genannt.

### 2.3.2 Polarisierung

Die Polarisierung einer Antenne gibt die Richtung an, in welche die elektrische Komponente (E-Feld) der Freiraumwelle ausgerichtet ist. Bei der linearen Polarisierung orientiert man sich an der Erdoberfläche und unterscheidet somit in vertikale und horizontale Polarisierung. Eine Antenne mit vertikaler Polarisierung strahlt eine Freiraumwelle ab, bei der die elektrische Komponente vertikal orientiert ist. Bei Antennen mit horizontaler Polarisierung sind die elektrischen Komponenten hingegen horizontal orientiert.

Eine Antenne mit horizontaler Polarisierung kann im Idealfall keine Signale von einer Antenne mit vertikaler Polarisierung empfangen. Diese Signaltrennung nutzt man dafür, bei einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit der gleichen Frequenz unterschiedliche Informationen zu übertragen, ohne dass diese sich gegenseitig stören.

Sogenannte dual-polarisierte Antennen können sowohl vertikale als auch horizontale Freiraumwellen abstrahlen und sind dadurch in der Lage, zwei unabhängige Übertragungskanäle bereitzustellen. Eine dual-polarisierte Antenne benötigt für die Speisung zwei Speisestrom, eines für das horizontale und eines für das vertikale Signal. Die beiden Speisestrom sind mit dem Orthomode Transducer der Antenne verbunden, der die beiden Signale unterschiedlicher Polarisierung miteinander überlagert. Dieses überlagerte Signal wandert zum Erregersystem der Antenne und wird abgestrahlt. Aufgrund der Reziprozität trennt der Orthomode Transducer im Empfangsfall die beiden Polarisierungen voneinander und gibt die entsprechenden Signale am jeweiligen Speisestrom aus.

Ein wichtiges Maß für dual-polarisierte Antennen ist die Polarisationsisolation, auch Übersprechdämpfung genannt, also die Trennung der beiden Polarisierungen voneinander.

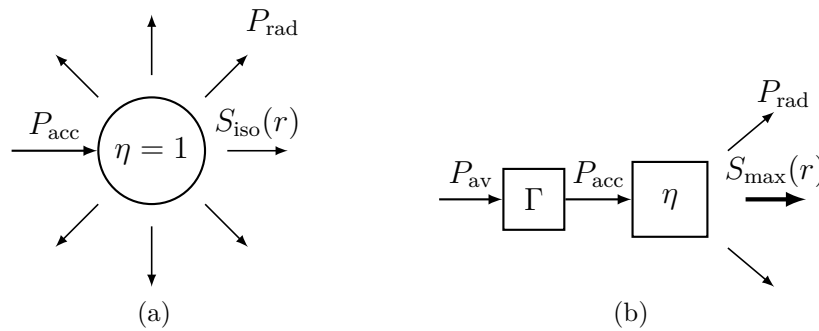
### 2.3.3 Richtfaktor

Der Richtfaktor  $D$  ist das Verhältnis zwischen der maximalen Strahlungsleistungsdichte  $S_{\max}$  einer Antenne und der Strahlungsleistungsdichte eines isotropen Strahlers  $S_{\text{iso}}$  mit derselben Strahlungsleistung  $P_{\text{rad}}$ :

$$D = \left. \frac{S_{\max}(r)}{S_{\text{iso}}(r)} \right|_{P_{\text{rad}}=\text{const}} \quad (2.24)$$

Der Richtfaktor ist somit ein Maß für die Ausprägung der Abstrahlung im Vergleich zu einem isotropen Strahler, der einen Richtfaktor von  $D = 1$  hat. Abbildung 2.5 zeigt den Unterschied zwischen einem isotropen Strahler und einer realistischen Antenne.

Die Richtcharakteristik  $C(\varphi, \vartheta)$  wiederum beschreibt die Feldstärke einer Antenne in Abhängigkeit von den beiden Winkelkoordinaten  $\varphi$  und  $\vartheta$ , bezogen auf die maximale Feldstärke  $E_{\max}$ . Dieser Bezug ist nur bei gleichem Abstand zur Antenne gültig.



**Abb. 2.5:** Leistungsbilanz einer Antenne (a) bei einem isotropen Strahler: Die gesamte aufgenommene Leistung strahlt in alle Richtungen gleichmäßig ab. Eine reale Richtfunkantenne (b) nimmt hingegen nur einen Teil der zur Verfügung stehenden Leistung auf und strahlt diesen abzüglich der internen Verluste in eine Hauptstrahlungsrichtung ab.

Von der Richtcharakteristik  $C(\varphi, \vartheta)$  einer Antenne lässt sich der Richtfaktor  $D$  wie folgt ermitteln [50, S. 50]:

$$D = \frac{4\pi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} C^2(\varphi, \vartheta) \sin(\vartheta) \, d\vartheta \, d\varphi} \quad \text{mit} \quad C(\varphi, \vartheta) = \frac{|E(\varphi, \vartheta)|}{|E_{\max}|} \quad (2.25)$$

Eigentlich handelt es sich dabei um den maximalen Richtfaktor der Antenne, da der Richtfaktor ebenfalls von den beiden Winkelkoordinaten abhängig ist, wie bei der Richtcharakteristik. Bei Antennen mit einer Hauptstrahlungsrichtung ist der Wert des Richtfaktors meist nur in diese Richtung relevant und in diesem Fall ist der Richtfaktor gleich dem maximalen Richtfaktor. Da diese Arbeit Richtantennen behandelt, wird auf diese Unterscheidung nicht weiter eingegangen.

### 2.3.4 Eingangsreflexionsfaktor

Wie oben erwähnt, wird eine Antenne über eine Leitung (Koaxialleitung oder Hohlleiter) gespeist. Falls auf Grund von unterschiedlichen Impedanzen eine Reflexion an der Antenne auftritt, wandert ein Teil der Leistung wieder zurück zum Sender. Der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  beschreibt, wie viel von der hinlaufenden Welle an der Antenne zurück reflektiert wird:

$$\Gamma = \frac{b}{a}, \quad [a] = [b] = \sqrt{W} \quad (2.26)$$

Dabei ist  $a$  der Vektor für die hinlaufende Welle und  $b$  der Vektor für die zurücklaufende Welle. Die beiden Vektoren  $a$  und  $b$  sind Feldgrößen. Möchte man wissen, wie viel von der zur Verfügung stehende Leistung  $P_{av}$  eines Senders von einer Antenne aufgenommen wird, muss man den Eingangsreflexionsfaktor quadrieren. Man erhält:

$$P_{acc} = P_{av} (1 - |\Gamma|^2), \quad (2.27)$$

mit  $P_{\text{acc}}$  als die von der Antenne aufgenommenen Leistung. Der Term  $(1 - |\Gamma|^2)$  wird auch als die Anpassungseffizienz einer Antenne bezeichnet.

### 2.3.5 Antennenwirkungsgrad

Der Antennenwirkungsgrad  $\eta$  gibt an, wie viel von der aufgenommenen Leistung  $P_{\text{acc}}$  als  $P_{\text{rad}}$  abgestrahlt wird:

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{acc}}} \quad (2.28)$$

Damit modelliert der Antennenwirkungsgrad die Verluste einer Antenne, wie sie zum Beispiel in ihren metallischen Komponenten auftreten (ohmsche Verluste) oder in ihren dielektrischen Komponenten (dielektrische Verluste).

Der Wert des Antennenwirkungsgrades  $\eta$  muss dabei aus dem Intervall  $\eta \in [0, 1]$  stammen, wobei eine ideale verlustlose Antenne einen Antennenwirkungsgrad von  $\eta = 1$  hat und eine reale Antennen einen Antennenwirkungsgrad von  $\eta < 1$  aufweist.

### 2.3.6 Antennengewinn

Der Antennengewinn  $G$  einer Antenne gibt den Faktor an, um den eine Antenne in Hauptstrahlrichtung eine höhere Strahlungsleistung hat, als der isotrope Strahler. Die Formel des Antennengewinns lautet deshalb:

$$G = \left. \frac{S_{\text{max}}(r)}{S_{\text{iso}}(r)} \right|_{P_{\text{acc}}=\text{const}} \quad (2.29)$$

Die Antenne und der isotrope Strahler besitzen dieselbe aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$ . Der Antennengewinn  $G$  berücksichtigt also, im Gegensatz zum Richtfaktor  $D$ , auch die Verluste in der Antenne. Man kann mit dem Richtfaktor und dem Antennenwirkungsgrad den Antennengewinn wie folgt ermitteln:

$$G = \eta D \quad (2.30)$$

Der Antennengewinn ist ein sehr aussagekräftiger Parameter einer Antenne. Simple Modellierungen wie die Friis-Übertragungsgleichung (siehe [51]) verwenden ihn als einzigen Parameter, um die Antenne zu beschreiben.

### 2.3.7 Antennenmodell

Nun betrachten wir die Antenne als Ganzes und beschreiben mit den oben genannten Parametern die Antenne als Modell. Wir gehen dabei davon aus, dass sich die Antenne im Empfangs- und Sendefall identisch verhält und betrachten zunächst nur den Sendefall.

Die Antenne nimmt beim Senden Leistung vom Sender auf. Die Leistungsaufnahme geschieht in Abhängigkeit von  $\Gamma$ . Die aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$  lässt sich nach Formel (2.27) berechnen. Die aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$  unterliegt ohmschen und dielektrischen Verlusten, welche durch den Antennenwirkungsgrad  $\eta$  beschrieben werden. Die abgestrahlte Leistung  $P_{\text{rad}}$  erhalten wir in Abhängigkeit von dem Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und der aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$  mit der Formel (2.28).

Das Modell zur Berechnung der Funkstrecke nach [51] betrachtet die Antennen als isotrope Strahler. Deshalb muss man unter Berücksichtigung des Richtfaktors  $D$  die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) von der abgestrahlte Leistung  $P_{\text{rad}}$  berechnen. Für die Strahlungsleistung EIRP schreiben wir also

$$\text{EIRP} = P_{\text{rad}} D = P_{\text{av}} (1 - |\Gamma|^2) \eta D = P_{\text{av}} (1 - |\Gamma|^2) G. \quad (2.31)$$

Dieses Modell ist nur unter Fernfeldkonditionen gültig.

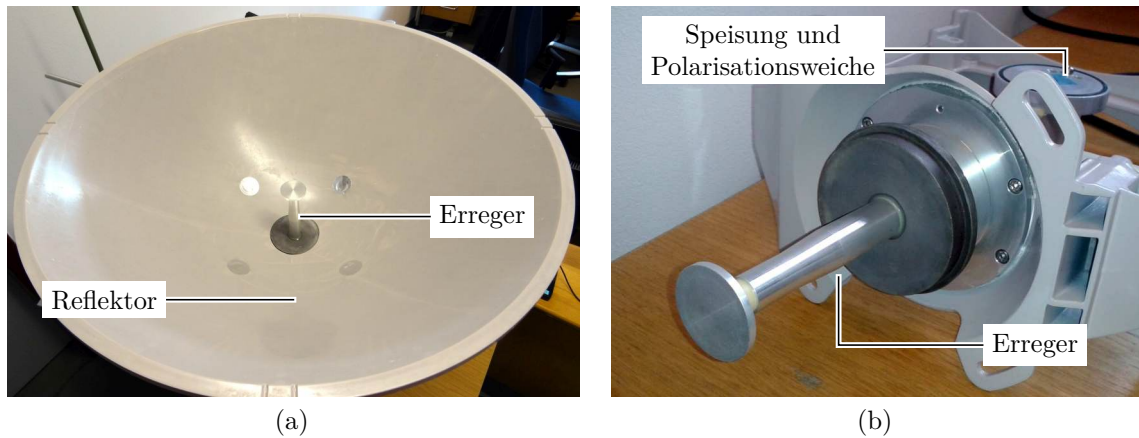
### 2.3.8 Richtantenne

Unter die Klasse der Richtfunkantennen fallen alle Antennen mit einer Hauptstrahlrichtung, wie zum Beispiel Reflektorantennen oder Yagi-Uda-Antennen. In dieser Arbeit beschäftigen wir uns ausschließlich mit den Reflektorantennen, da diese vornehmlich bei kommerziellen Richtfunkstrecken eingesetzt werden.

Reflektorantennen bestehen grundsätzlich aus zwei Komponenten, dem Reflektor und dem Erreger. Der Erreger strahlt die Welle ab und der Reflektor transformiert die kugelwellenförmige Welle des Erregers in eine ebene Welle. Als Erreger verwendet man Hornantennen oder dielektrische Erreger. Bei Parabolantennen befindet sich der Erreger, also das Phasenzentrum der Wellen, im Fokus des Reflektors. Abbildung 2.6 zeigt eine Richtfunkantenne ohne die übliche Antennenabdeckung sowie den Erreger mit integrierter Polarisationsweiche. Da es sich bei der abgebildeten Antenne um eine dual-polarisierte Richtfunkantenne handelt, besitzt sie für die beiden Polarisierungen jeweils einen Speiseport.

Um den Erreger und den Reflektor vor Niederschlag wie Regen oder Schnee zu schützen, besitzen Reflektorantennen oft eine Antennenabdeckung, das sogenannte Radom. Häufig verwendete Materialien für das Radom sind Kunststoffe wie Polycarbonat oder expandiertes Polystyrol, wobei die Wandstärke auf die Betriebsfrequenz so optimiert wird, dass die Transmission maximal ist. So wählt man zum Beispiel für die elektrische Länge des Radoms die halbe Wellenlänge oder ein Vielfaches davon, um Reflexionen an der Abdeckung zu verhindern. Die Oberfläche der Antennenabdeckung ist üblicherweise hydrophob, damit Wasser sich möglichst schlecht oder sogar gar nicht festsetzen kann.

Einige Modelle der Reflektorantennen besitzen einen weiteren Subreflektor. Bei diesen Doppelreflektorantennen wird die Umwandlung der Kugelwelle in eine ebene Welle über zwei Reflexionen erzeugt. Dies geschieht einmal mit der Reflexion des



**Abb. 2.6:** (a) Dual-polarisierte Richtfunkantenne für 18 GHz mit einem Durchmesser von 60 cm ohne Antennenabdeckung. (b) Ausgebauter Erreger der Antenne mit integrierter Polarisationsweiche.

Erregers zum Subreflektor und einmal mit der Reflexion des Subreflektors zum Hauptreflektor. Der Subreflektor besitzt dabei zwei Brennpunkte. Ein Brennpunkt fällt mit dem Brennpunkt des Hauptreflektors zusammen und im zweiten Brennpunkt befindet sich der Erreger. Bei der Cassegrain-Antenne hat der Subreflektor eine konvexe hyperbolische Form und bei der Gregory-Antenne eine konkave elliptische Form [50, S. 926–934].

## 2.4 Richtfunkstrecke

In diesem Abschnitt definieren wir die charakteristischen Einflussgrößen, welche die Gesamtdämpfung einer Richtfunkstrecke bestimmen. Eine bistatische Richtfunkstrecke besteht aus einem Sendesystem, einem Empfangssystem und der Strecke dazwischen. Auf dieser Strecke transportieren elektromagnetische Wellen Informationen. Ein Sendesystem besteht aus einem Sender und einer Sendeantenne. Das Empfangssystem besteht respektive aus einem Empfänger und aus einer Empfangsantenne.

Bei einer Richtfunkverbindung handelt es sich um eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen dem Punkt A und dem Punkt B. Bei einer bistatischen Verbindung entspräche zum Beispiel der Sender Punkt A und der Empfänger dem Punkt B. In diesem Fall wäre die Verbindung zwischen A und B unidirektional, da Informationen nur in eine Richtung transportiert werden können. Richtfunkstrecken werden allerdings häufig bidirektional betrieben, so dass Informationen nicht nur von Punkt A zu Punkt B übermittelt werden können, sondern auch von Punkt B zu Punkt A. In diesem Fall fungieren die Antennen jeweils sowohl als Empfangsantenne als auch als Sendeantenne. Die angeschlossenen Sender beziehungsweise Empfänger sind dann

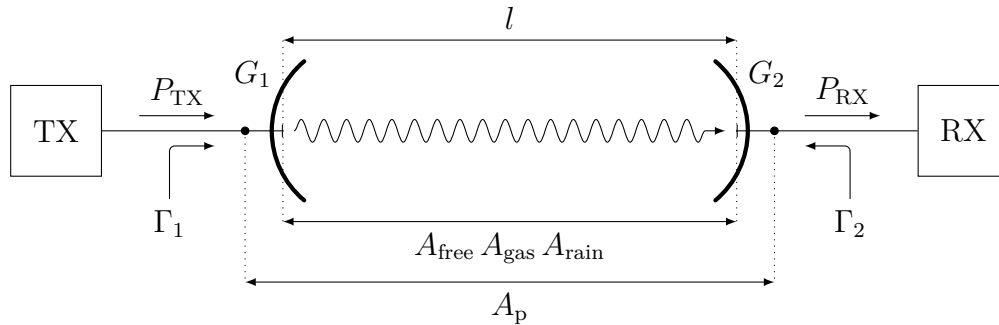


Abb. 2.7: Darstellung eines bistatischen Links.

Sendeempfänger, die Signale nicht nur empfangen, sondern auch senden können.

Bei einer bidirektionalen Richtfunkstrecke lässt sich die Verbindung von A zu B getrennt von der Verbindung von B zu A modellieren. Man kann also eine bidirektionale Richtfunkstrecke in zwei unidirektionale Richtfunkstrecken separieren. Für die hier gezeigte Modellierung ist es allerdings irrelevant, ob es sich um eine unidirektionale oder um eine bidirektionale Richtfunkstrecke handelt.

Abbildung 2.7 zeigt die schematische Darstellung einer bistatischen Richtfunkstrecke mit den einzelnen Komponenten. Die linke Seite stellt das Sendesystem mit Sendeanenne und Sender dar, während die rechte Seite das Empfangssystem mit der Empfangsanenne und dem Empfänger zeigt. Der Bereich zwischen den beiden Antennen ist das Funkfeld mit der Länge  $l$ . Der Sender (TX) regt eine elektromagnetische Welle mit der Leistung  $P_{\text{TX}}$  an und leitet sie an die Sendeanenne weiter. Diese nimmt, je nach Anpassung, einen Teil der Leistung auf, wandelt die leitungsgebundene Welle in eine Freiraumwelle um und strahlt sie ab. Aufgrund der Ausbreitung kommt es, in Abhängigkeit von der zurückgelegten Distanz, zu einer Verdünnung der Strahlungsdichte. Zusätzliche Dämpfung erfährt die Welle durch Störungen, wie etwa Regen oder Gase im Funkfeld. Die Empfangsanenne wandelt die Freiraumwelle wieder in eine leitungsgebundene Welle um und stellt die Leistung dem Empfänger (RX) zur Verfügung. Dieser nimmt einen Teil der Leistung  $P_{\text{RX}}$  in Abhängigkeit von der Anpassung auf. Das Verhältnis zwischen der Sendeleistung  $P_{\text{TX}}$  und der Empfangsleistung  $P_{\text{RX}}$  entspricht der Pfaddämpfung  $A_p$ :

$$P_{\text{RX}} = \frac{P_{\text{TX}}}{A_p} \quad (2.32)$$

Je höher die Pfaddämpfung ist, umso niedriger ist die Empfangsleistung  $P_{\text{RX}}$ . Gängige Richtfunkssysteme sind in der Lage, die Sendeleistung  $P_{\text{TX}}$  und die Empfangsleistung  $P_{\text{RX}}$  im Betrieb zu messen. Mit den gemessenen Werten lässt sich dann die Pfaddämpfung  $A_p$  der Richtfunkstrecke nach Formel (2.32) ermitteln.

Unter der Annahme, dass aufgrund der Länge des Funkfeldes Fernfeldbedingungen

herrschen, lässt sich die Freiraumdämpfung  $A_{\text{free}}$  nach [51] mit

$$A_{\text{free}} = \frac{(4\pi l)^2}{\lambda_0^2} \quad (2.33)$$

beschreiben, mit der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  der elektromagnetischen Welle. Verwenden wir nun das Modell für eine einzelne Antenne aus Abschnitt 2.3.8 einmal als Sende- und einmal als Empfangsantenne, dann erhalten wir für die Empfangsleistung  $P_{\text{RX}}$  den Ausdruck

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} \underbrace{(1 - |\Gamma_1|^2) G_1 \frac{\lambda_0^2}{(4\pi l)^2} G_2 (1 - |\Gamma_2|^2)}_{\frac{1}{A_{\text{p}}}} . \quad (2.34)$$

Bei diesem Modell nimmt man an, dass sich das Funkfeld im freien Raum befindet. Unter realistischen Bedingungen kommen aber die beschriebenen Prozesse zum Tragen, welche das Signal dämpfen. Die zusätzlichen Dämpfungen fassen wir mit  $A_{\text{add}}$  zusammen. In einem terrestrischen Funkfeld erfährt die Welle eine Dämpfung durch die Gase in der Atmosphäre. Eine weitere zusätzliche Dämpfung wird durch Regen verursacht. Diese Dämpfung  $A_{\text{rain}}$  kann einen sehr starken Einfluss auf die Gesamtdämpfung haben.

Erweitern wir nun das Modell für die Richtfunkstrecke um diese beiden Effekte, erhalten wir für die Empfangsleistung

$$\frac{P_{\text{RX}}}{P_{\text{TX}}} = (1 - |\Gamma_1|^2) G_1 \frac{1}{A_{\text{free}} A_{\text{gas}} A_{\text{rain}}} G_2 (1 - |\Gamma_2|^2) = \frac{1}{A_{\text{p}}} . \quad (2.35)$$

Üblicherweise vernachlässigt man den Einfluss der Anpassungseffizienz  $1 - |\Gamma|^2$  der Empfangs- und der Sendeantenne, da die Eingangsreflexionsfaktoren  $\Gamma$  sehr klein sind und so die Anpassungseffizienz nahe 1 ist. Durch diese Annahme erhalten wir für die Richtfunkstrecke das vereinfachte Modell:

$$\frac{P_{\text{RX}}}{P_{\text{TX}}} = \frac{G_1 G_2}{A_{\text{free}} A_{\text{gas}} A_{\text{rain}}} = \frac{1}{A_{\text{p}}} . \quad (2.36)$$

Unter der Annahme, dass die Antennengewinne  $G_1$  und  $G_2$  sowie die Freiraumdämpfung aufgrund des Abstandes  $l$  bekannt sind, lässt sich so über die Pfaddämpfung  $A_{\text{p}}$  das Produkt  $A_{\text{gas}} A_{\text{rain}}$  ermitteln.

$A_{\text{gas}}$  modelliert die Dämpfung durch die Gase in der Atmosphäre. Der Einfluss des Sauerstoffs und des Wasserdampfs in der Atmosphäre kann mit [52] in Abhängigkeit von der Temperatur, dem Luftdruck und dem Wasserdampfpartialdruck ermittelt werden.



## 2.5 Dämpfung in der Atmosphäre

Wie schon im oberen Abschnitt beschrieben, dämpfen neben der Freiraumdämpfung  $A_{\text{free}}$  noch andere Effekte das Funksignal. Wir beschränken uns in dieser Arbeit auf zwei Effekte.

Als erstes beschäftigen wir uns mit der Dämpfung durch Regen und im Anschluss betrachten wir die Dämpfung durch Sauerstoff und Wasserdampf in der Atmosphäre.

### 2.5.1 Dämpfung durch Regen

Dieser Unterabschnitt behandelt den Einfluss von Regen auf die Übertragung mit Richtfunksystemen. Eine elektromagnetische Welle, die ein Regenfeld durchwandert, erfährt aufgrund der dielektrischen Eigenschaften des Wassers (siehe 2.2) eine Dämpfung.

Betrachten wir nun einen bestimmten Ort in diesem Regenfeld mit einer bestimmten Regenintensität  $R$ . Durch den Regen erfährt die Welle eine entsprechende spezifische Dämpfung  $k_{\text{rain}}$ . Die Verknüpfung zwischen der Regenintensität und der spezifischen Dämpfung durch Regen lässt sich durch das Power-Law (siehe [41] und [53])

$$\frac{k_{\text{rain}}}{\text{dB km}^{-1}} = a \left( \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} \right)^b \quad (2.37)$$

beschreiben. Die beiden dimensionslosen Parameter  $a$  und  $b$  sind frequenz- und temperaturabhängig sowie außerdem abhängig von der Tropfenverteilung (DSD) und der Polarisation der Welle. Die Parameter beschreiben die Korrespondenz zwischen der Regenintensität  $R$  und der spezifischen Dämpfung  $k_{\text{rain}}$ .

Abbildung 2.8 zeigt den Verlauf des Parameters  $a$  in Abhängigkeit von der Frequenz für die horizontale und die vertikale Polarisation nach [54].

Abbildung 2.9 zeigt den Verlauf des Parameters  $b$  in Abhängigkeit von der Frequenz ebenfalls für die beiden Polarisationen nach [54].

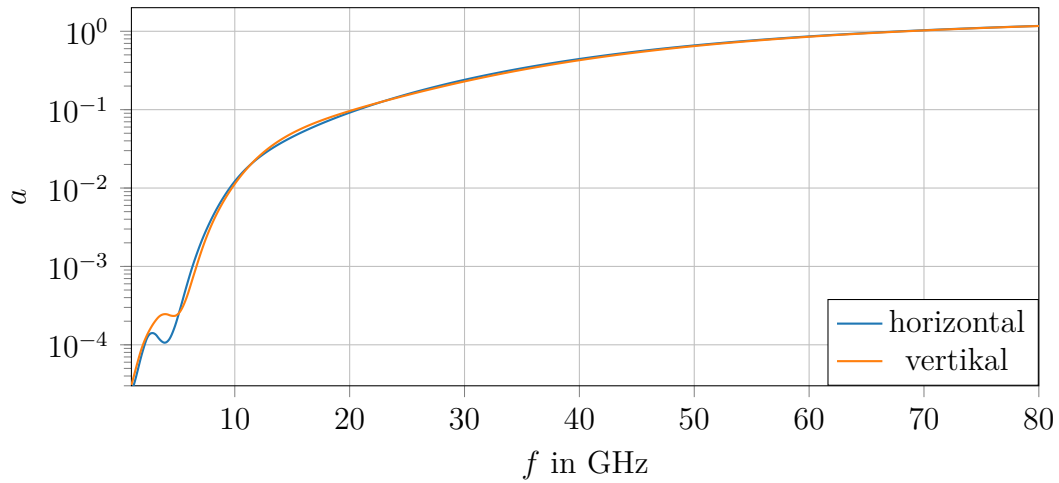
Abbildung 2.11 präsentiert unter anderem die Kurvenschar der spezifischen Dämpfung durch Regen bei horizontaler Polarisation für einige Regenintensitäten  $R$  als Funktion von der Zeit.

Die Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  der Richtfunkstrecke erhalten wir durch die Integration der ortsabhängigen spezifischen Dämpfung  $k_{\text{rain}}$  entlang des Links:

$$\frac{A_{\text{rain}}}{\text{dB}} = \int_{\text{Link}} \frac{k_{\text{rain}}}{\text{dB km}^{-1}} d\frac{l'}{\text{km}} = \int_{\text{Link}} a \left( \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} \right)^b d\frac{l'}{\text{km}} \quad (2.38)$$

Nimmt man an, dass die Regenintensität entlang der Richtfunkstrecke konstant ist, also an jedem Ort entlang der Strecke gleich ist, kann man den Ausdruck mit der Länge  $l$  der Richtfunkstrecke vereinfachen:

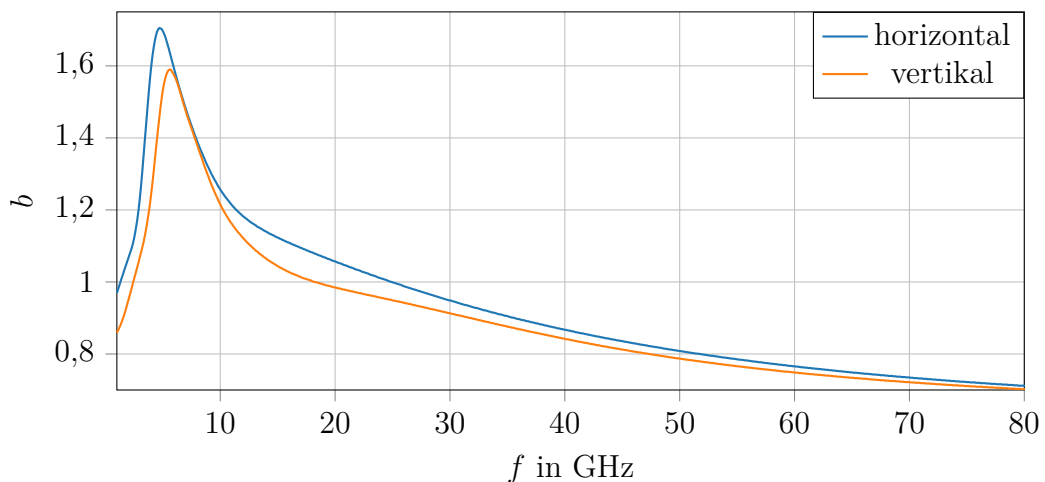
$$\frac{A_{\text{rain}}}{\text{dB}} = a \left( \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} \right)^b \frac{l}{\text{km}} \quad (2.39)$$



**Abb. 2.8:** Einfach logarithmische Darstellung des Parameters  $a$  in Abhängigkeit von der Frequenz für die horizontale und die vertikale Polarisation nach [54].

Dieser Ausdruck ist auch dann gültig, wenn  $b = 1$  ist, beziehungsweise, wenn dies wenigstens näherungsweise gilt, also  $b \approx 1$  ist. Im Näherungsfall erhält man die durchschnittliche Regenintensität entlang der Richtfunkstrecke. Nach Abbildung 2.9 ist  $0,9 < b < 1,1$  in dem Frequenzbereich 17 GHz bis 35 GHz für die horizontale Polarisation sowie im Frequenzbereich 13 GHz bis 32 GHz für die vertikale Polarisation.

Der Unterschied der beiden Parameter und der daraus resultierenden verschiedenen spezifischen Dämpfung  $k_{\text{rain}}$  in Abhängigkeit von der Polarisation liegt an der Tropfenform. Da Tropfen sich im freien Fall verformen (siehe Abschnitt 2.1.4), ist die Wechselwirkung der vertikalen Komponente des E-Feldes mit dem Tropfen anders,



**Abb. 2.9:** Verlauf des Parameters  $b$  in Abhängigkeit von der Frequenz für die horizontale und die vertikale Polarisation nach [54].



**Abb. 2.10:** Darstellung eines Tropfens mit zwei orthogonalen Polarisationen der elektrischen Feldstärke: (a) Tropfen mit vertikal polarisierter Welle und (b) Tropfen mit horizontal polarisierter Welle.

als bei der horizontalen Komponente.

Da in dieser Arbeit der Fokus auf dem Wet-Antenna-Effekt liegt und nicht auf der Dämpfung durch Regen im Funkfeld, ist das Modell nach Formel (2.39) ausreichend. Sind die Länge  $l$ , die Dämpfung  $A_{\text{rain}}$  und die Frequenz, beziehungsweise die Parameter  $a$  und  $b$  einer Richtfunkstrecke bekannt, dann lässt sich mit diesem Modell durch Umformen die Regenintensität  $R$  bestimmen:

$$\frac{A_{\text{rain}}}{\text{dB}} = a \left( \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} \right)^b \frac{l}{\text{km}} \quad \rightarrow \quad \frac{R}{\text{mm h}^{-1}} = \left( \frac{\frac{A_{\text{rain}}}{\text{dB}}}{\frac{l}{\text{km}} a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.40)$$

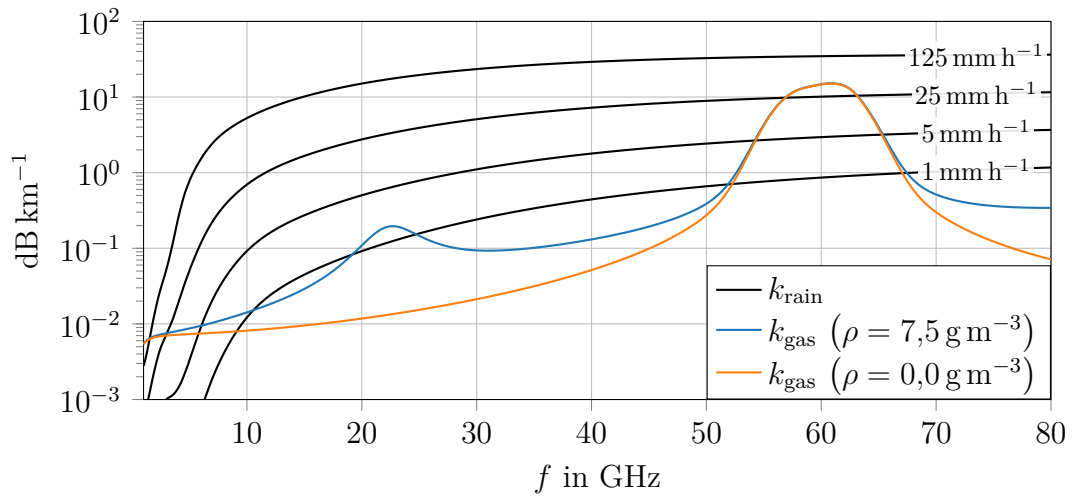
Diese Formel ist der Nukleus der Niederschlagsschätzung anhand von Richtfunk-Schwunddaten.

## 2.5.2 Dämpfung durch Gase

Bei der Berücksichtigung der Gase in der Atmosphäre beschränken wir uns auf den Sauerstoff und den Wasserdampf. Die spezifische Dämpfung durch Gase  $k_{\text{gas}}$  ist somit die Summe aus der spezifischen Dämpfung durch Sauerstoff  $k_{\text{O}_2}$  und der spezifischen Dämpfung durch Wasserdampf  $k_{\text{wv}}$ :

$$\frac{k_{\text{gas}}}{\text{dB km}^{-1}} = \frac{k_{\text{O}_2}}{\text{dB km}^{-1}} + \frac{k_{\text{wv}}}{\text{dB km}^{-1}} \quad (2.41)$$

Die spezifische Dämpfung durch Sauerstoff  $k_{\text{O}_2}$  und durch Wasserdampf  $k_{\text{wv}}$  können wir mit dem Modell nach [52] in Abhängigkeit von der Temperatur, vom Luftdruck und von der absoluten Luftfeuchtigkeit ermitteln. Das Modell verwendet spektroskopische Daten, um das Absorptionsverhalten des Sauerstoffs und des Wasserdampfs bis zu einer Frequenz von 1000 GHz darzustellen. Für diese Arbeit reicht der Frequenzbereich bis 80 GHz aus. In diesen Bereich fallen zum Beispiel die Resonanzabsorption von Wasser bei  $f = 22,235\,080$  GHz sowie die Resonanzabsorption von Sauerstoff im Bereich um  $f = 60$  GHz.



**Abb. 2.11:** Verlauf der spezifischen Dämpfung durch Gase  $k_{\text{gas}}$  in Abhängigkeit von der Frequenz nach [52]. Für die Berechnung der spezifischen Dämpfungen durch Gase wurden ein Luftdruck  $p = 1013,25 \text{ hPa}$  und eine Temperatur  $T = 288,15 \text{ K}$  angenommen, sowie einmal die absolute Luftfeuchtigkeit von  $\rho = 0 \text{ g m}^{-3}$  und einmal  $\rho = 7,5 \text{ g m}^{-3}$  gewählt. Im Vergleich dazu wird die spezifische Dämpfung durch Regen  $k_{\text{rain}}$  bei horizontaler Polarisation nach [54] für einige Regenintensitäten  $R$  als Kurvenschar gezeigt.

Abbildung 2.11 zeigt den Verlauf der spezifischen Dämpfung durch Gase  $k_{\text{gas}}$  in Abhängigkeit von der Frequenz für trockene Luft, mit einer absoluten Luftfeuchtigkeit  $\rho = 0 \text{ g m}^{-3}$  sowie für Luft mit einer absoluten Luftfeuchtigkeit von  $\rho = 7,5 \text{ g m}^{-3}$ .

Analog zur Näherung bei der Dämpfung durch Regen (siehe Formel (2.39)) kann die Dämpfung durch Gase mit der Länge der Richtfunkstrecke  $l$  ermittelt werden:

$$\frac{A_{\text{gas}}}{\text{dB}} = \int_{\text{Link}} \frac{k_{\text{gas}}}{\text{dB km}^{-1}} \text{d} \frac{l'}{\text{km}} \approx \frac{k_{\text{gas}}}{\text{dB km}^{-1}} \frac{l}{\text{km}} \quad (2.42)$$

Wir können davon ausgehen, dass die Schwankung der spezifische Dämpfung durch Gase entlang einer Richtfunkstrecke schwächer ausfällt, als die Schwankung der spezifischen Dämpfung durch Regen, da Gase ein Gleichgewicht im Raum anstreben und sich somit gleichmäßig verteilen. Durch Prozesse entlang der Strecken, wie zum Beispiel durch Hitzequellen, kann es aber zu einem unregelmäßigen Gasprofil kommen.

## 2.6 Wet-Antenna-Effekt

In diesem Abschnitt stellen wir die Überlegung an, auf welche Antennenparameter der Wet-Antenna-Effekt bei einer Richtfunkstrecke wirkt.

Betrachten wir zuerst eine trockene Antenne im Raum. Wir können ihr Verhalten im Fernfeld messen und aus den Messdaten das Modell (siehe Formel (2.31)) aufstellen.

Dieses Modell liefert die EIRP der Antenne in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Leistung  $P_{av}$  und wird über die Parameter  $\Gamma$ ,  $\eta$  und  $D$  definiert. Diese drei Parameter berücksichtigen in diesem Modell alle Einflüsse, die die Eigenschaften der Antenne betreffen.

Nun stellen wir uns vor, dass die Oberfläche dieser Antenne mit Wasser benetzt ist und wir wieder das Fernfeld messen und die Parameter ermitteln. Die Art der Benetzung ist bei dieser Überlegung irrelevant. Laut dem Wet-Antenna-Effekt wird die Signalleistung der Antenne durch die Benetzung gedämpft, das heißt, dass die EIRP im Vergleich zur trockenen Antenne sinkt. Die zur Verfügung stehende Leistung  $P_{av}$  bleibt dabei für beide Fälle gleich. Somit muss in dem Modell der Wet-Antenna-Effekt einen Einfluss auf einen, zwei oder auf alle drei Parameter haben.

Wir sehen, dass bei diesem Antennen-Modell der Wet-Antenna-Effekt eingepreist ist. Verwenden wir nun dieses Modell bei einer Richtfunkstrecke, erhalten wir die erweiterte Friis-Übertragungsgleichung (siehe Formel (2.35)). Die Gleichung (2.35) berücksichtigt den Wet-Antenna-Effekt in den Parametern  $\Gamma$ ,  $\eta$  und  $D$  sowie die Einflüsse vom Regen und von den Gasen entlang der Richtfunkstrecke.



## 3 Wet-Antenna-Effekt: Aufbau, Simulation und Labormessung

Dieses Kapitel behandelt die Phänomenologie des Wet-Antenna-Effekts auf Ebene der Antenne. Dazu analysieren wir zuerst die Wirkung eines Wasserfilms auf eine ebene Welle. Im Anschluss betrachten wir die Antennenparameter einer Antenne. Basierend auf diesen Parametern wird ein Modell vorgestellt, das die Wet-Antenna-Dämpfung modelliert. Des Weiteren werden mithilfe eines Vollwellensimulators der Einfluss von Wasser auf dem Radom einer Pyramiden-Hornantenne bei 18 GHz simuliert und die Wet-Antenna-Dämpfung bestimmt. Für die Validierung der Simulationsergebnisse wurde ein Aufbau entwickelt, bei dem eine Pyramiden-Hornantenne mit derselben geometrischen Dimension wie in der Simulation in Abhängigkeit vom Durchfluss des Wassers auf dem Radom vermessen wurde. Für die beiden Ergebnisse von Simulation und Messung wird die Wet-Antenna-Dämpfung in Abhängigkeit vom Grad der Nässe auf dem Radom bestimmt und verglichen.

Dieses Kapitel, vor allem die Abschnitte 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5, basiert auf dem wissenschaftlichen Artikel [55].<sup>1</sup>

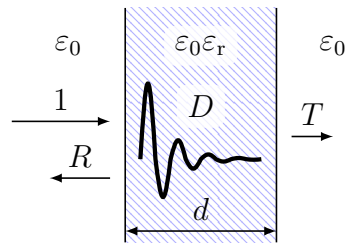
### 3.1 Dielektrische Verluste in einem Wasserfilm

Um das prinzipielle Verhalten einer elektromagnetischen Welle in Wasser zu verstehen, betrachten wir zuerst eine ebene Welle, die auf einen unendlich ausgedehnten Wasserfilm mit einer definierten Schichtdicke  $d$  trifft. Eine ähnliche Modellierung des Wet-Antenna-Effekts mithilfe von ebenen Wellen an einem Wasserfilm wurde in [22] gezeigt. Der hier präsentierte Ansatz verwendet im Gegensatz dazu die Kettenmatrix, um den Wet-Antenna-Effekt zu modellieren.

Abbildung 3.1 stellt den folgenden Zusammenhang schematisch dar. Die ebene Welle, aus dem linken freien Raum  $\varepsilon_0$  kommend, trifft auf den Wasserfilm  $\varepsilon_0\varepsilon_r$ . Ein Teil der Leistung wird gleich am ersten Übergang der Medien (freier Raum zu Wasser) reflektiert. Der Rest wird absorbiert, das bedeutet, dass die Welle in das Wasser eindringen kann. Da Wasser dielektrische Verluste aufweist, wird der ebenen Welle im Medium Leistung entzogen und es kommt zu einer Dämpfung der Welle.

---

<sup>1</sup>„Modeling of Wet Antenna Attenuation for Precipitation Estimation From Microwave Links“, erschienen im *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*



**Abb. 3.1:** Schematische Darstellung einer einfallenden ebenen Welle auf einen unendlich ausgedehnten Wasserfilm mit der Schichtdicke  $d$  im freien Raum. Die Leistungsgrößen der ebenen Welle sind einfallende Welle 1, Reflexionsgrad  $R$ , Dissipationsgrad  $D$  und Transmissionsgrad  $T$ .

An dem zweiten Übergang der Medien, jetzt Wasser zu freiem Raum, kommt es wieder zu einer Reflexion und nur ein Teil der Leistung tritt als Welle aus dem Wasserfilm aus und breitet sich im freien Raum rechts weiter aus. Durch die nun im Wasser reflektierte Welle kommt es in dem Wasserfilm zu weiteren Reflexionen. Diese Mehrfachreflexionen verursachen zusätzliche Beiträge zu der Reflexion, der Dissipation sowie der Transmission.

Der Transmissionsgrad ist somit das Maß dafür, wie viel der Leistung von der initialisierten Welle nach dem Wasserfilm sich weiter ausbreiten kann. Betrachten wir nun den linken freien Raum als Antenne und den Wasserfilm als deren Benetzung, dann wären der Reflexionsgrad und der Dissipationsgrad die Komponenten, die die Leistung der transmittierten Welle verringern. Da bei diesem Modell die Verringerung der Leistung der transmittierten Welle von den Eigenschaften des Wasserfilms (Permittivität und Schichtdicke) abhängig ist, beschreibt das Modell den Wet-Antenna-Effekt.

Da aus dem obigen System, aufgrund des Energieerhaltungssatzes, keine Energie verloren gehen kann, muss die Summe der Leistung für die Dissipation, die Transmission und die Reflexion gleich der Leistung der einfallenden ebenen Welle (gleich 1) sein:

$$R + D + T = 1. \quad (3.1)$$

Im nächsten Schritt verwenden wir das Wasserfilm-Modell und berechnen die Wet-Antenna-Dämpfung in Abhängigkeit von der relativen Permittivität  $\varepsilon_r$  des Wassers sowie der Schichtdicke  $d$ .

Um die Eigenschaften des Modells zu untersuchen, betrachten wir die drei Bereiche (freier Raum, Wasser und wieder freier Raum) als drei Leitungsstücke. Für jeden Bereich berechnen wir die Kettenmatrix. Durch Produktbildung der drei Matrizen bekommen wir die gesamte Kettenmatrix des Systems. Mit diesem Ansatz können effizient Mehrschichtprobleme gelöst werden und die Eigenschaften auf ein Gesamtsystem zusammengefasst werden. Anhand des gesamten Systems berechnen wir dann die Transmission, die Reflexion und die Dissipation des Wasserfilm-Modells.



Für die Berechnung der Kettenmatrix nach [56] benötigen wir zuerst die elektrische Länge  $\Phi$  der Schicht. Die elektrische Länge entspricht der Phasendrehung, die die transmittierte Welle durch die Schicht erfährt und wird wie folgt berechnet:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2(\alpha)}, \quad (3.2)$$

mit der Wellenlänge im freien Raum  $\lambda_0$ , der Schichtdicke  $d$ , der relativen Permeabilität  $\varepsilon_r$  und dem Einfallswinkel  $\alpha$  der Welle.

Die normierte Leitungsimpedanz  $z_E$  für die E-Mode ist die Leitungsimpedanz  $Z_E$  bezogen auf die Wellenimpedanz des Vakuums  $Z_0$  und berechnet sich wie folgt:

$$z_E = \frac{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2(\alpha)}}{\varepsilon_r \cos(\alpha)} \quad z_E = \frac{Z_E}{Z_0} \quad (3.3)$$

Mit der elektrischen Länge  $\Phi$  und der normierten Leitungsimpedanz können wir die Elemente der Kettenmatrix wie folgt bestimmen:

$$K = \begin{pmatrix} \cos(\Phi) & j z_E \sin(\Phi) \\ j \frac{\sin(\Phi)}{z_E} & \cos(\Phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Da wir die Wirkung des Wassers auf eine ebene Welle im freien Raum untersuchen möchten, ist die Impedanz des freien Raumes auch unsere Bezugsimpedanz. Somit benötigen wir nur das Leitungs-Äquivalent für den Wasserfilm und können direkt aus dessen Kettenmatrix den Reflexionsfaktor

$$r = \frac{K_{11} + K_{12} - K_{21} - K_{22}}{K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22}} \quad (3.5)$$

und den Transmissionsfaktor

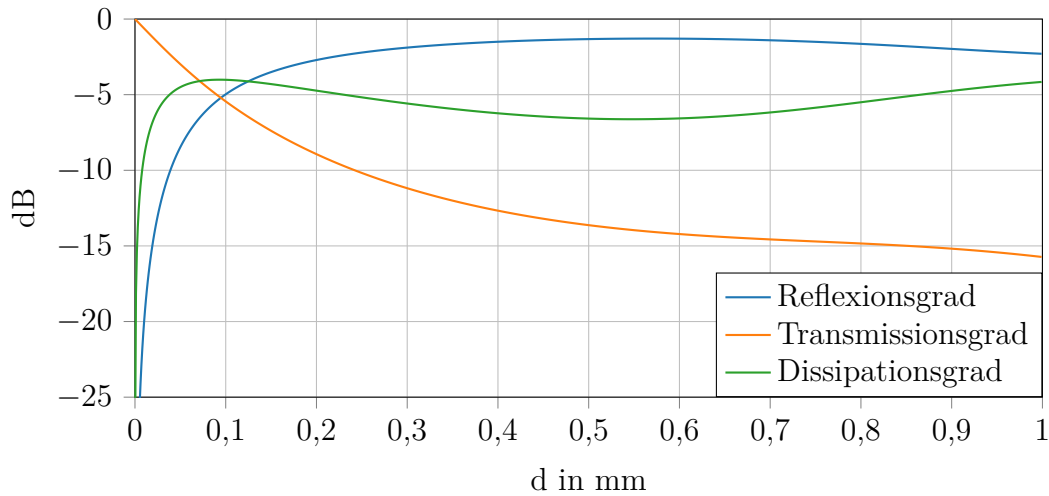
$$t = \frac{2}{K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22}} \quad (3.6)$$

berechnen (vgl. [56]). Da wir annehmen, dass die Welle senkrecht auf den Wasserfilm trifft, ist der Winkel  $\alpha = 0$ . Zu beachten ist, dass die Größen für den Reflexionsfaktor  $r$  und den Transmissionsfaktor  $t$  Feldgrößen sind, welche für die Leistungsbetrachtung in die Leistungsgrößen umgewandelt werden:

$$T = |t|^2 \quad R = |r|^2 \quad (3.7)$$

Mit dem Energieerhaltungssatz aus 3.1 können wir nun die Verluste durch Dissipation berechnen:

$$D = 1 - |r|^2 - |t|^2 \quad (3.8)$$



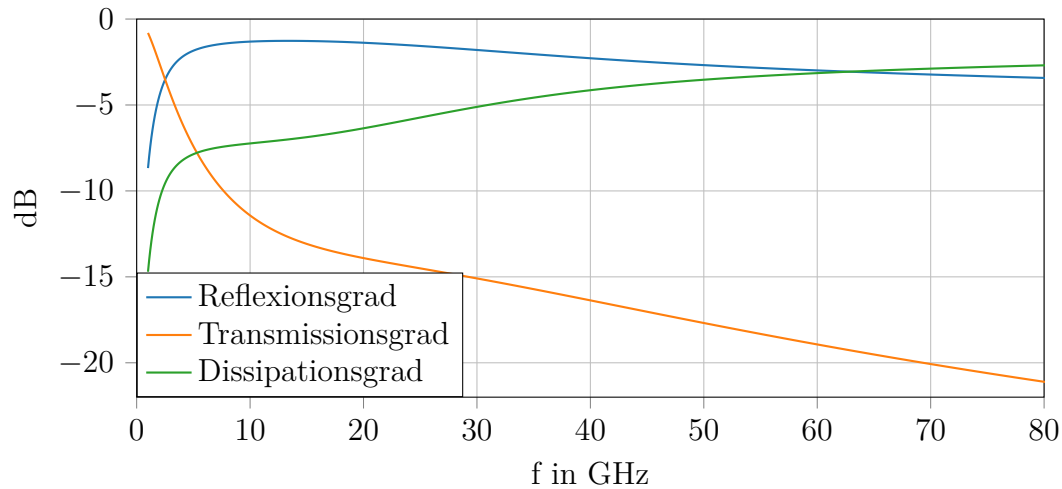
**Abb. 3.2:** Verlauf der Größen Reflexionsgrad, Transmissionsgrad und Dissipationsgrad bei 18 GHz bei unterschiedlichen Schichtdicken des Wasserfilms mit einer relativen Permittivität  $\epsilon_r = 43,264 - j37,566$ . Bei dickeren Schichten ( $d > 0,9$  mm) beginnt die Reflexion zu sinken, da die Wellenlänge im Medium  $\lambda_\epsilon = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r'} 18 \text{ GHz}} = 2,53$  mm ist und die erste Resonanz bei einer Schichtdicke von der halben Wellenlänge  $\frac{\lambda_\epsilon}{2} = 1,27$  mm zum tragen kommt.

Mit diesem Modell werten wir als erstes die Performanz des Wasserfilms bei einer fixen Frequenz von 18 GHz mit variabler Schichtdicke  $d$  aus. Bei dieser Frequenz beträgt die relative Permeabilität des Wassers  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 43,264 - j37,566$  bei einer Temperatur von 25 °C. Bei der späteren Simulation (siehe Abschnitt 3.3) wird derselbe Wert für die relative Permittivität des Wassers verwendet. Abbildung 3.2 zeigt den Verlauf der Reflexion, der Transmission und der Dissipation in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$  des Wasserfilms.

Allgemein ist zu sagen, dass mit steigender Schichtdicke die Transmission sinkt, respektive der Wet-Antenna-Effekt einen größeren Einfluss nimmt. Der Wet-Antenna-Effekt rührt bei diesem Modell einerseits von den dielektrischen Verlusten in dem Wasserfilm (Dissipation), andererseits von der Tatsache, dass der Wasserfilm einen Teil der Energie nicht aufnimmt, sondern reflektiert (Reflexion). Somit lässt sich für dieses Modell die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  mit den Größen Dissipationsgrad  $D$ , Reflexionsfaktor  $r$  und Transmissionsfaktor  $t$  beschreiben:

$$A_{WA} = \frac{1}{1 - D - |r|^2} = \frac{1}{|t|^2} \quad (3.9)$$

Das Modell zeigt, dass es schon bei sehr dünnen Schichtdicken  $d$  kleiner als 0,2 mm zu einer starken Dämpfung der Transmission kommt. Die Transmission steigt in diesem Bereich stark mit der Schichtdicke an. Laut dem Wasserfilm-Modell liefert die Reflexion ab einer Schichtdicke von 0,12 mm den größten Beitrag zum Wet-Antenna-Effekt. Der Wasserfilm reflektiert demnach die meiste Leistung der einfallenden ebenen Welle



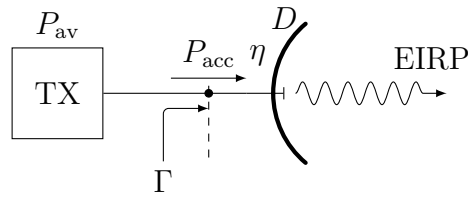
**Abb. 3.3:** Verlauf der Größen Reflexionsgrad, Transmissionsgrad und Dissipationsgrad bei einem Wasserfilm mit einer Schichtdicke  $d$  von 0,5 mm in dem Frequenzbereich von 1 GHz bis 80 GHz. Für die Berechnung der relativen Permittivität des Wassers wird das Debye-Modell (Gleichung (2.12)) verwendet ( $\epsilon_{r0} = 78,4$ ,  $\epsilon_{r\infty} = 3,1$  und  $\tau_r = 8,27$  ps).

in diesem Schichtdicken-Bereich. Es kann nur dann Leistung im Wasserfilm dissipieren, wenn auch die Welle in den Wasserfilm eindringen kann und dementsprechend nicht reflektiert wird.

Nun betrachten wir einen Wasserfilm mit konstanter Schichtdicke,  $d = 0,5$  mm, in dem Frequenzbereich von 1 GHz bis 80 GHz. Abbildung 3.3 zeigt den Reflexionsgrad, den Dissipationsgrad und den Transmissionsgrad in Abhängigkeit von der Frequenz der ebenen Welle. Es zeigt sich, dass mit steigender Frequenz auch die Wet-Antenna-Dämpfung zunimmt, beziehungsweise, dass die Transmission stärker gedämpft wird. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Resultaten aus [22].

Dieses einfache Modell zeigt die starke Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke des Wasserfilms. Darüber hinaus ist erkennbar, dass man zumindest bei dünnen Schichten von der Reflexion auf die Transmission schließen und so die Wet-Antenna-Dämpfung ermitteln kann. Da bei dünnen Schichten die Transmission und die Reflexion bijektiv zueinander sind, können wir eindeutig von der Reflexion auf die Transmission schließen. Vor allem bei dünnen Schichten ist dies aufgrund der hohen Empfindlichkeit ein geeigneter Ansatz.

Allerdings kann dieses Modell nicht direkt auf eine reale Richtfunkantenne übertragen werden, da zum einen ein homogener Wasserfilm auf einer Antenne in der Realität nicht vorkommt und zum anderen bei diesem Modell nur ebene Wellen betrachtet werden. Darüber hinaus werden die reaktiven Felder im Nahfeld einer Antenne nicht berücksichtigt werden.



**Abb. 3.4:** Blockschaltbild einer Sendeantenne mit einem Transmitter TX und den drei Antennenparametern Richtfaktor  $D$ , Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ .  $P_{av}$  ist die zur Verfügung gestellte Leistung des Transmitters und  $P_{acc}$  die von der Antenne aufgenommene Leistung.

## 3.2 Wet-Antenna-Effekt bei einer Richtfunkantenne

Eine Antenne können wir mit den drei Antennenparametern Richtfaktor  $D$ , Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  beschrieben. Da Wasser auf einer Antenne ihre Eigenschaften, wie zum Beispiel das Dämpfen des Signals, verändert, muss sich diese Änderung auch in den Antennenparametern widerspiegeln. Diese Änderung ist der Wet-Antenna-Effekt. Hier wird ein auf den Antennenparametern basierendes Modell für die Wet-Antenna-Dämpfung vorgestellt.

Abbildung 3.4 zeigt das Blockschaltbild einer Richtfunkantenne in der Verwendung als Sendeantenne mit den Leistungsgrößen sowie den Antennenparametern  $\Gamma$ ,  $\eta$  und  $D$ . Betrachten wir eine einzelne Antenne, wie in diesem Kapitel, dann reduziert der Wet-Antenna-Effekt die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP).

Die Leistungsbilanz vom Generator zur abgestrahlten Welle wird in [57] beschrieben. In der hier gezeigten Herleitung wird der Einfluss der Leitung zwischen Transmitter und Antenne vernachlässigt, da bei modernen Richtfunkssystemen der Transmitter direkt an die Antennenspeisung montiert ist. Die von der Antenne aufgenommene Leistung  $P_{acc}$  entspricht so der vom Transmitter zur Verfügung gestellten Leistung  $P_{av}$  abzüglich der von der Antenne reflektierten Leistung. Wir können diese wie folgt bestimmen:

$$P_{acc} = P_{av} (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.10)$$

Mit  $\Gamma$  als Eingangsreflexionsfaktor der Antenne, dem Verhältnis zwischen der aufgenommenen Leistung  $P_{acc}$  und der vom Transmitter zur Verfügung gestellten Leistung  $P_{av}$ , ist die Anpassungseffizienz der Antenne  $1 - |\Gamma|^2$  (vgl. [58, S. 65]). Die abgestrahlte Leistung der Antenne  $P_{rad}$  ist die Leistung, die insgesamt (also nicht nur in Hauptstrahlrichtung) von der Antenne abgestrahlt wird. Die Verluste der Antenne, wie die ohmschen oder die dielektrischen Verluste, werden mit dem Antennenwirkungsgrad  $\eta$  berücksichtigt und wir erhalten:

$$P_{rad} = P_{acc}\eta = P_{av} (1 - |\Gamma|^2) \eta \quad (3.11)$$

Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) einer Antenne ist die Leistung, die ein isotroper Strahler haben muss, um die Antenne zu substituieren. Gewichtet man die abgestrahlte Leistung  $P_{\text{rad}}$  mit dem Richtfaktor  $D$ , erhält man diese äquivalente isotrope Strahlungsleistung. Oft werden die Parameter Richtfaktor  $D$  und Antennenwirkungsgrad  $\eta$  zu dem Antennengewinn  $G$  zusammengefasst mit  $G = \eta D$ .

$$\text{EIRP} = P_{\text{rad}} D = P_{\text{av}} (1 - |\Gamma|^2) \eta D = P_{\text{av}} (1 - |\Gamma|^2) G \quad (3.12)$$

Da der Wet-Antenna-Effekt diese Leistung reduziert und mit der Randbedingung, dass die vom Transmitter zur Verfügung gestellte Leistung  $P_{\text{av}}$  konstant ist, können wir hier die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{\text{WA}}$  in Abhängigkeit von den drei Größen Richtfaktor  $D$ , Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  beschreiben. Die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{\text{WA}}$  ist die Größe, um die die EIRP im Vergleich zum trockenen Fall  $\text{EIRP}_{\text{dry}}$  gedämpft wird:

$$\frac{\text{EIRP}_{\text{dry}}}{A_{\text{WA}}} = \text{EIRP} \quad (3.13)$$

Unter der oben genannten Prämisse, dass die zur Verfügung gestellte Leistung  $P_{\text{av}}$  im Fall der trockenen Antenne gleich der Leistung in jedem anderen Fall ist, lässt sich die  $P_{\text{av}}$  jeweils streichen und wir erhalten für die Wet-Antenna-Dämpfung:

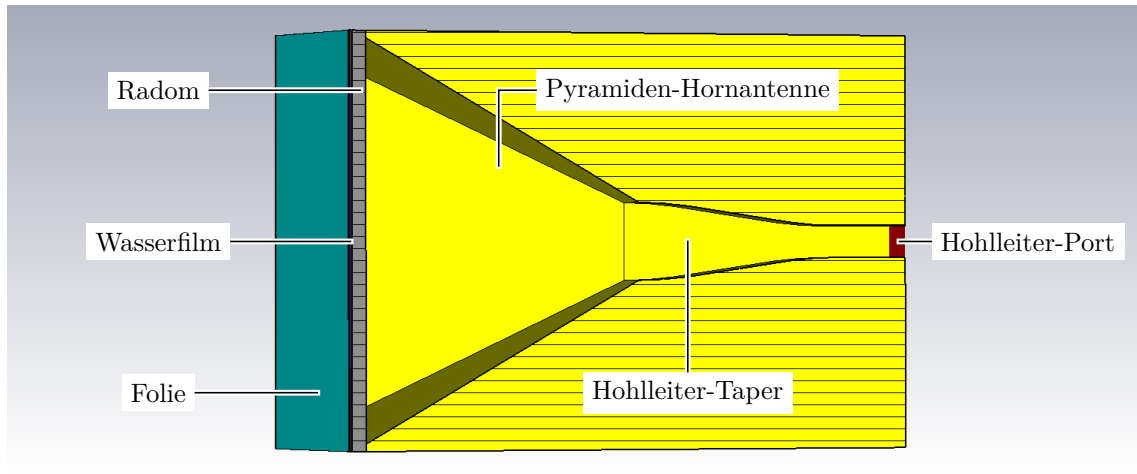
$$A_{\text{WA}} = \left. \frac{\text{EIRP}_{\text{dry}}}{\text{EIRP}} \right|_{P_{\text{av}}=\text{const.}} = \frac{\eta_{\text{dry}} D_{\text{dry}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)}{\eta D (1 - |\Gamma|^2)} \quad (3.14)$$

Mithilfe dieses Modells können wir nun die Wet-Antenna-Dämpfung anhand der drei Antennenparameter beschreiben und den Einfluss des Wet-Antenna-Effekts untersuchen.

Die hier dargestellte Aufspaltung der Wet-Antenna-Dämpfung in Teileffekte basiert auf dem Sendefall der Antenne. Mit der Annahme, dass die Antennen reziprok sind, gilt die Herleitung auch für den Empfangsfall der Antenne.

### 3.3 Simulation einer mit Wasser benetzten Antenne

Um den Einfluss von Nässe auf Antennen im Vergleich zu dem Modell unter 3.1 unter realistischeren Bedingungen zu bestimmen, bedienen wir uns einer Vollwellen-Simulation einer Pyramiden-Hornantenne. Bei dieser Simulation werden auch die reaktiven Anteile des Feldes berücksichtigt. Des Weiteren lassen sich somit auch die Antennenparameter einer Antenne bestimmen und in Abhängigkeit der Nässe analysieren.

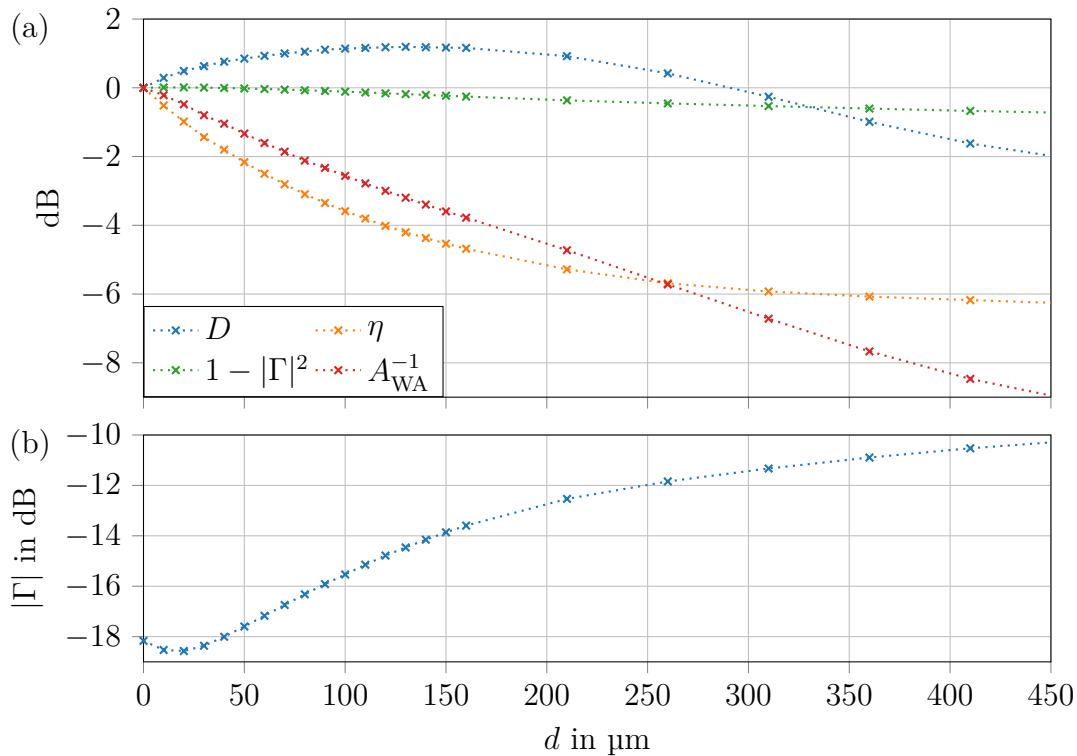


**Abb. 3.5:** Querschnitt der Pyramiden-Hornantenne mit einer Apertur von 50 mm mal 50 mm, dargestellt in der CAD-Umgebung des CST Microwave Studios (vgl. [55]).

### 3.3.1 Konzept der Simulation

Wir verwenden eine Hornantenne, da diese im Vergleich zu Reflektorantennen, wie sie hauptsächlich bei Richtfunkstrecken verwendet werden, für die spätere Messung mit der notwendigen Präzision hergestellt werden kann. Eine kommerzielle Richtfunkantenne für die Messung zu kaufen und diese für die Simulation zu modellieren hätte den Nachteil, dass man für eine korrekte Modellierung die Konstruktionspläne des Herstellers benötigt. Diese werden von den Herstellern prinzipiell nicht zur Verfügung gestellt. Den Aufbau der Antenne durch Re-Engineering zu ermitteln, würde wiederum die Antenne zerstören. Die korrekte Modellierung einer Richtfunkantenne würde ebenfalls bei der Simulation zu einem zu großen Rechenaufwand führen. Dies ist der geometrischen Ausdehnung und der Komplexität des inneren Aufbaus, wie dem dielektrischen Erreger und der Polarisationsweiche, geschuldet. Ein weiterer Vorteil einer Hornantenne mit ebenem Radom ist der, dass wir im Vergleich zu einer kommerziellen Richtfunkantenne mit unebenem Radom einen Wasserfilm mit definierter Schichtdicke generieren können.

Da die Ergebnisse der Simulation später mit den Ergebnissen der Messung verglichen werden, ist es notwendig, dass das Simulationsmodell und die vermessene Antenne möglichst identisch sind. Dies betrifft sowohl die geometrischen Abmessungen als auch die Materialeigenschaften. Abbildung 3.5 zeigt den Querschnitt der Pyramiden-Hornantenne in der CAD-Umgebung des verwendeten Simulators CST Microwave Studio (Version 2015.06). Die Apertur der Antenne beträgt 50 mm mal 50 mm und die Antenne wird bei einer Frequenz von 18 GHz simuliert. Die Antenne besteht aus Messing und das Radom aus Polystyrol mit einer relativen Permittivität  $\epsilon_r = 2,5$ . Das Radom hat über die ganze Apertur eine Stärke von 2 mm. Wie schon im Wasserfilm-Modell, wird für die relative Permittivität von Wasser bei 18 GHz



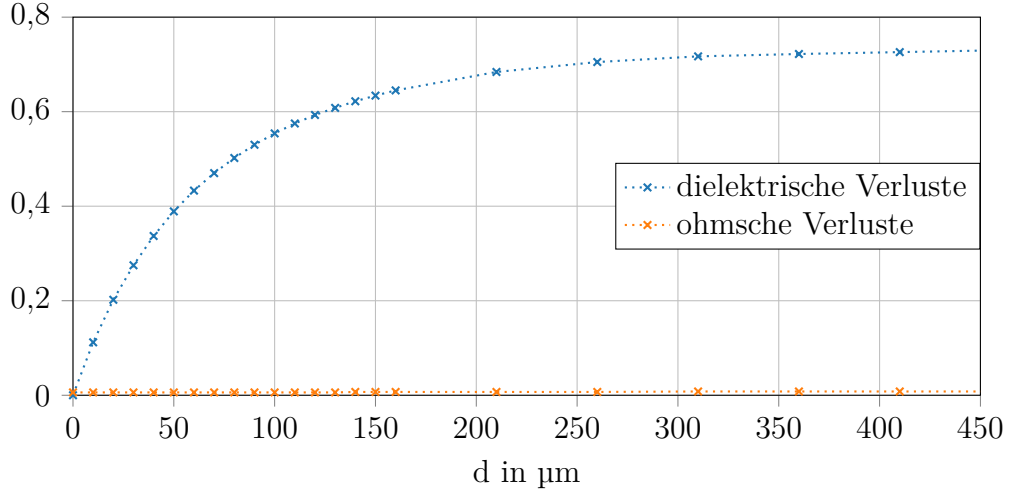
**Abb. 3.6:** Simulationsergebnisse der Parameter (gemeinsame Abszissenachse): (a) Richtfaktor  $D$ , Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und Anpassungseffizienz  $1 - |\Gamma|^2$ , jeweils bezogen auf den trockenen Fall ( $d = 0 \mu\text{m}$ ) als Funktion von  $d$ ; (b) Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  als Funktion von  $d$  (vgl. [55])

der Wert  $\varepsilon_r = 43,264 - j37,566$  verwendet. Für die spätere Messung wird eine Folie verwendet, um einen konstanten Wasserfilm zu generieren. Diese Folie besteht aus Polyester und wird mit einer relativen Permittivität  $\varepsilon_r = 2,8$  modelliert.

### 3.3.2 Simulationsergebnisse

Mit dem Simulator machen wir eine Analyse im Frequenzbereich (frequency domain solver) und berechnen das Fernfeld. Dazu wird am Hohlleiter-Port eine elektromagnetische Welle angeregt. Der Simulator liefert den Richtfaktor  $D$ , den Antennenwirkungsgrad  $\eta$  sowie den Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  der Antenne. Diese Simulation wird für unterschiedliche Schichtdicken  $d$  des Wasserfilms wiederholt und wir erhalten die drei Antennenparameter in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$ . Abbildung 3.6 zeigt diese Verläufe der Parameter, bezogen auf die Performanz ohne Benetzung mit Wasser ( $d = 0$ ). Die Verluste, die durch eine Verschlechterung der Antennen-Anpassung entstehen, werden durch die Anpassungseffizienz  $1 - |\Gamma|^2$  beschrieben.

Der Wet-Antenna-Effekt wird aus den drei Komponenten Antennenwirkungsgrad,



**Abb. 3.7:** Verlauf der simulierten dielektrischen und ohmschen Verluste der Antenne in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$ . Die Verluste sind bezogen auf die aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$  der Antenne. Für dünne Schichtdicken wachsen die dielektrischen Verluste stark an. Die ohmschen Verluste verändern sich im Vergleich dazu kaum.

Richtfaktor und Anpassungseffizienz der Antenne beziehungsweise aus deren Änderung bei Nässe modelliert. Eine trockene Antenne hat eine Wet-Antenna-Dämpfung von 1 bzw. 0 dB und mit zunehmender Nässe steigt die Wet-Antenna-Dämpfung. Dies bedeutet, dass das Produkt  $\eta D (1 - |\Gamma|^2)$  kleiner wird. Die Wet-Antenna-Dämpfung und das Produkt  $\eta D (1 - |\Gamma|^2)$  sind also umgekehrt proportional zueinander. Indem wir die Antennenparameter auf den trockenen Fall beziehen, können wir diesen Zusammenhang wie folgt formal beschreiben:

$$\frac{\eta D (1 - |\Gamma|^2)}{\eta_{\text{dry}} D_{\text{dry}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)} = A_{\text{WA}}^{-1} \longrightarrow A_{\text{WA}} = \frac{\eta_{\text{dry}} D_{\text{dry}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)}{\eta D (1 - |\Gamma|^2)} \quad (3.15)$$

Interessant ist, dass laut den Simulationsergebnissen der Richtfaktor der Antenne mit zunehmender Schichtdicke des Wasserfilms ebenfalls steigt und so die Wet-Antenna-Dämpfung reduziert. Laut Simulation liefern die Verluste durch die Verschlechterung des Antennenwirkungsgrads  $\eta$  den größten Beitrag zu der Wet-Antenna-Dämpfung. Dies ist hauptsächlich auf die dielektrischen Verluste im Wasser zurückzuführen. Die anderen dielektrischen Materialien im Modell, wie zum Beispiel das Radom, besitzen eine rein reelle relative Permittivität und somit entstehen keine dielektrischen Verluste in ihnen. Die ohmschen Verluste im Messing sind im Vergleich zu den dielektrischen Verlusten vernachlässigbar. Abbildung 3.7 zeigt den Verlauf dieser dielektrischen und ohmschen Verluste bezogen auf die aufgenommene Leistung  $P_{\text{acc}}$  der Antenne. Ersichtlich ist dabei eine Dominanz der dielektrischen Verluste.

Die Anpassungseffizienz liefert den geringsten Beitrag zum Wet-Antenna-Effekt bei dieser Untersuchung, da der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  über alle simulierten



Schichtdicken kleiner als  $-10$  dB ist, und so in diesem Fall ( $|\Gamma| = -10$  dB) 90 % der Leistung von der Antenne aufgenommen wird. Des Weiteren zeigt die Simulation, dass der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  als ein möglicher Indikator für die Detektierung des Wet-Antenna-Effekts verwendet werden kann (siehe 3.6), da bei dieser Simulation mit steigendem Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  auch die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  steigt.

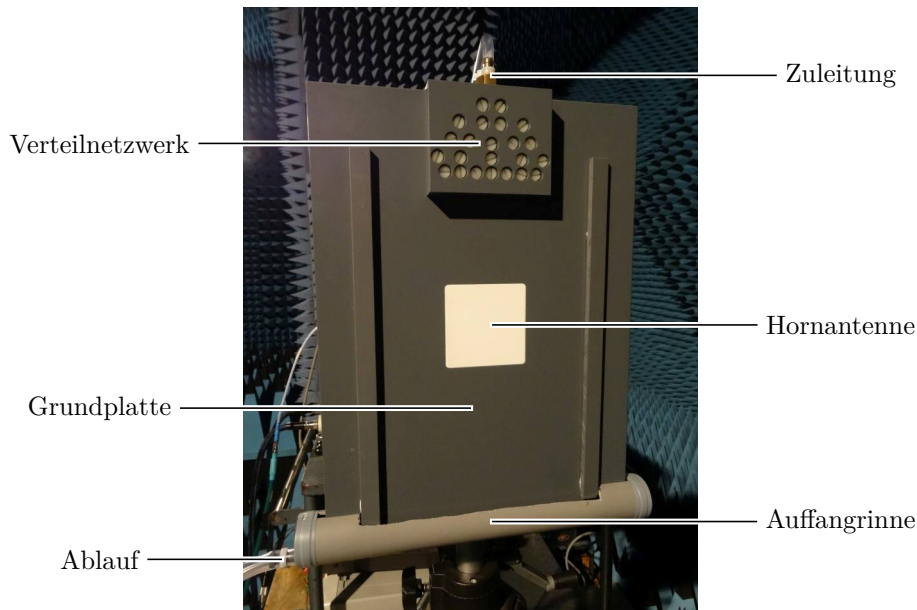
## 3.4 Vermessung einer mit Wasser benetzten Antenne

Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und den Ergebnissen einer Messung, benötigen wir eine reale Antenne, die dem Antennenmodell, welches im Simulator analysiert wurde, entspricht. Dazu wurde die Pyramiden-Hornantenne in der Zentralwerkstatt der Fakultät für Physik der Technischen Universität München aus Messing gefertigt.

### 3.4.1 Konzept der Labormessung

Für das Generieren des Wasserfilms, welcher die gesamte Apertur der Hornantenne bedeckt, wurde ein Aufbau entwickelt, mit dem ein Wasserfilm mit gleichmäßiger Schichtdicke erzeugt wird. Dieser Aufbau wurde in der Feinmechanikwerkstatt des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik gefertigt. Abbildung 3.8 zeigt den Aufbau. Durch das Verteilnetzwerk, montiert auf der Oberseite des Aufbaus, wird das zugeführte Wasser in 16 gleich große Wasserströme aufgeteilt. Diese Rinnsale sind für eine gleichmäßige Verteilung des Wassers notwendig. Die einzelnen Düsen liegen 6 mm auseinander. Die weiße Fläche ist das Radom der Hornantenne, welche in die graue Grundplatte aus Polyvinylchlorid (PVC) eingelassen ist. Die Grundplatte sowie das Radom sind eben zueinander ausgerichtet, um den Wasserfluss nicht zu beeinflussen. Am unteren Ende der Platte befindet sich ein geritztes Rohr, welches das herunterfließende Wasser auffängt und über einen Schlauch zurück in das Reservoir leitet. Aus diesem Reservoir wird das Wasser über eine Pumpe und einen Durchflussmesser zurück zu dem Verteilnetzwerk geführt, so dass sich der Kreislauf schließt. Mithilfe der Pumpe und des Durchflussmessers wird der konstante Durchfluss eingestellt.

Um einen möglichst homogenen Wasserfilm zu erzeugen, werden die 16 Rinnsale mit einer Folie zu einem Wasserfilm umgewandelt. Dazu wird das Wasser zwischen der grauen Grundplatte und der Folie über das Radom geführt. Die Folie ist 85 mm breit und wird über die Oberflächenspannung des Wassers an die Grundplatte gepresst. Durch die Pumpe lässt sich über den Durchfluss die Schichtdicke des Wasserfilms einstellen und konstant halten. Da die Schichtdicke mit den zur Verfügung stehenden Instrumenten nicht gemessen werden konnte, können wir die Schichtdicke nur indirekt über den Durchfluss beschreiben. Ein höherer Durchfluss repräsentiert eine stärkere



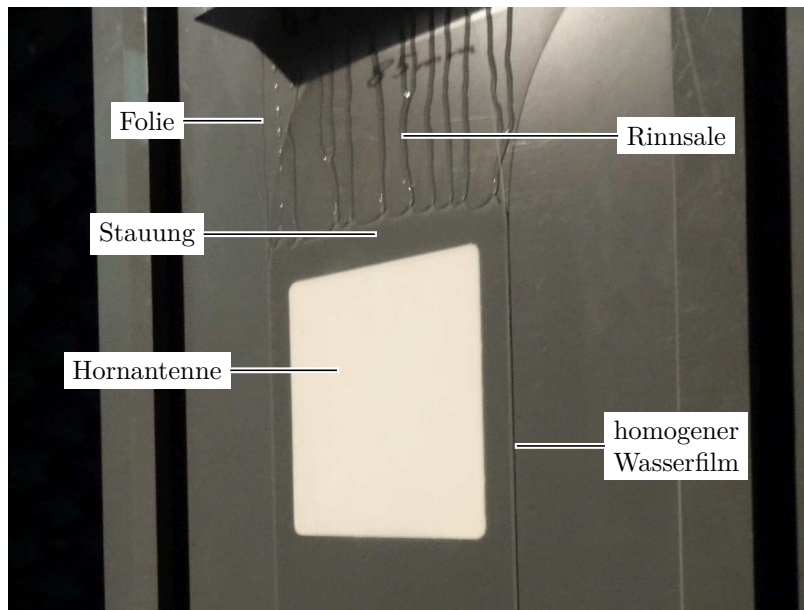
**Abb. 3.8:** Grundplatte mit eingesetzter Hornantenne: Die Zuleitung versorgt das Verteilnetzwerk mit Wasser. Das Verteilnetzwerk teilt den Fluss in 16 gleich große Rinnäle auf. Am unteren Ende der Grundplatte wird das Wasser mit der Auffangrinne aufgefangen und über den Abfluss dem Reservoir zurückgeführt.

Schichtdicke. Abbildung 3.9 zeigt, wie die einzelnen Rinnäle mit Hilfe der Folie einen homogenen Wasserfilm generieren. Für die eigentliche Vermessung der Hornantenne wurde die Antennenmesskammer des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik verwendet. In ihr wurde mithilfe des Nahfeld-Scanners der Firma Nearfield Systems, Inc. (NSI) das Nahfeld planar vermessen und im Anschluss wurden diese Daten mit der Software NSI2000 prozessiert. Resultat dieser Prozessierung ist das Fernfeld der Antenne, von dem der Antennenwirkungsgrad  $\eta$  sowie der Richtfaktor  $D$  abgeleitet werden. Der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  der Antenne wurde gesondert mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (ZVK 10 MHz – 40 GHz) von der Firma Rhode & Schwarz gemessen. Der Volumenstrommesser gibt den ihn durchfließenden Volumenstrom durch Pulse wieder. Ein Puls entspricht einem Volumen von 0,118 ml, wobei 8500 Pulse einem Liter entsprechen. Durch die Frequenz der Pulse  $f_{\text{Pulse}}$  lässt sich der Volumenstrom wie folgt berechnen:

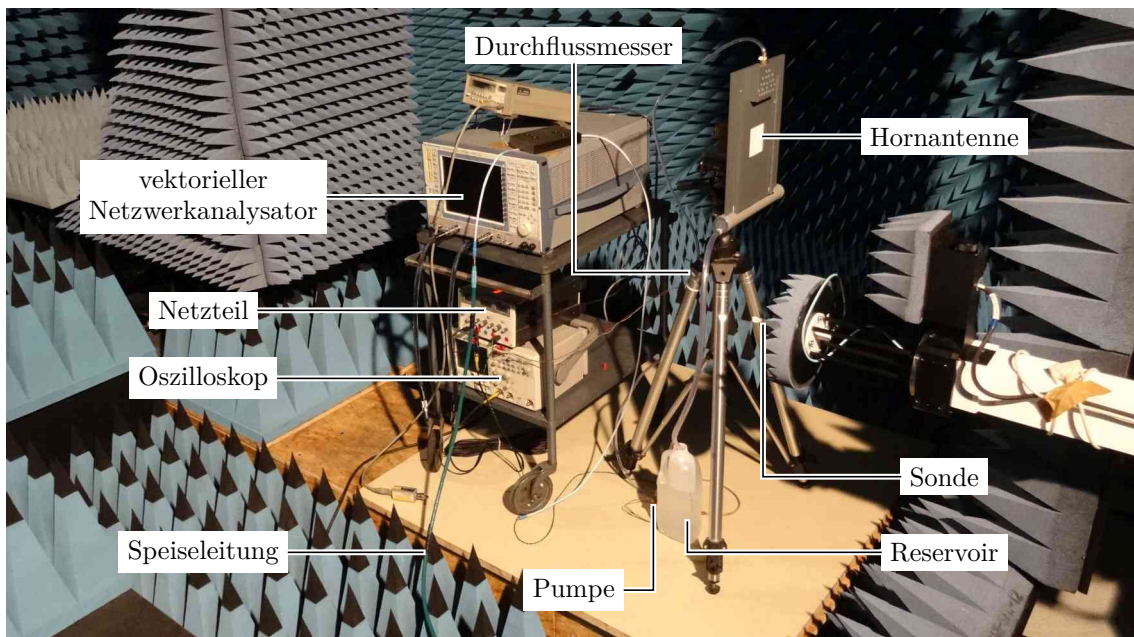
$$Q = \frac{f_{\text{Pulse}}}{\text{Hz}} \frac{1000}{8500} \text{ml s}^{-1} \quad (3.16)$$

Die Pulsfrequenz des Volumenstrommessers wurde mit Hilfe eines Oszilloskops ermittelt und laut der Formel in den Volumenstrom umgerechnet.

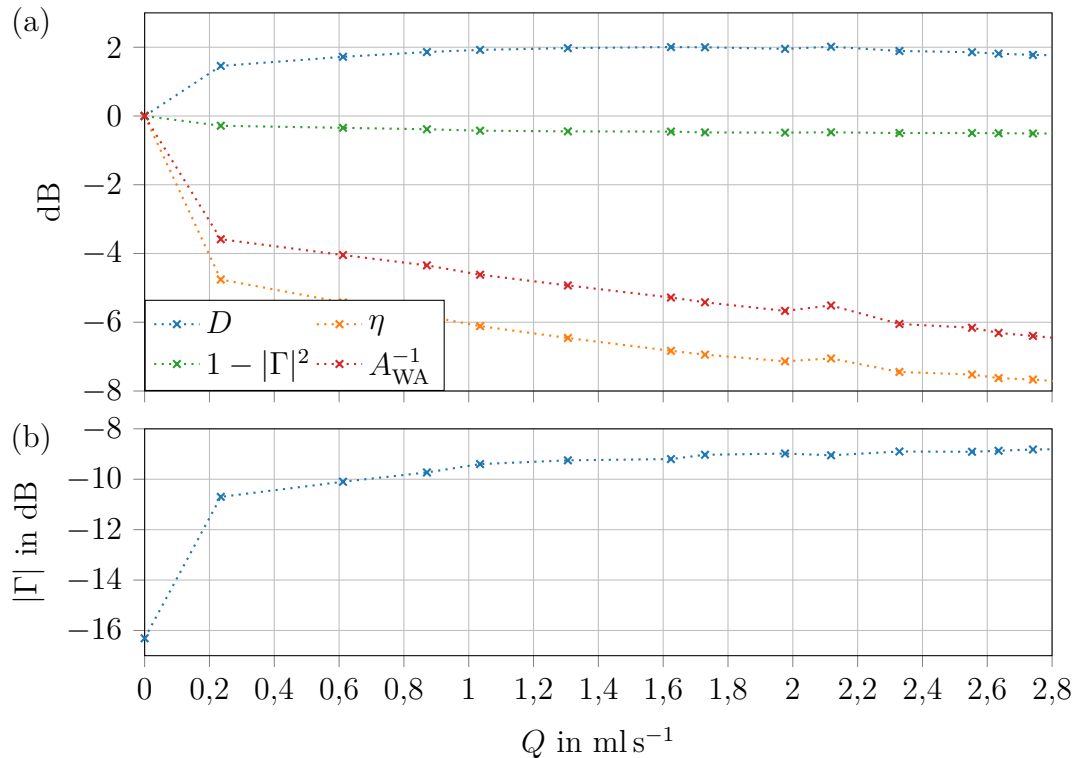
Abbildung 3.10 zeigt die Hornantenne mit Aufbau und Messinstrumenten in der Antennenmesskammer.



**Abb. 3.9:** Hornantenne im benetzten Zustand: Aus den vom Verteilnetzwerk gelieferten Rinnsalen entsteht zwischen der Folie und der Grundplatte ein homogener Wasserfilm (vgl. [55]).



**Abb. 3.10:** Messaufbau in der Antennenmesskammer: Aus dem Reservoir wird, mithilfe der Pumpe, das destillierte Wasser über den Durchflussmesser zu der Hornantenne gepumpt. Die Pumpe wird mit dem Netzteil betrieben. Das Oszilloskop bestimmt den Volumenstrom durch den Durchflussmesser. Für die Messung des Eingangsreflexionsfaktors  $\Gamma$  wird der vektorielle Netzwerkanalysator verwendet. Bei der eigentlichen Nahfeld-Messung wird die Antenne mit dem Nahfeld-Scanner über die Speiseleitung verbunden und das Nahfeld wird mit der Sonde im Raster planar gemessen.



**Abb. 3.11:** Messergebnisse der Parameter (gemeinsame Abszissenachse): (a) Richtfaktor  $D$ , Antennenwirkungsgrad  $\eta$  und Anpassungseffizienz  $1 - |\Gamma|^2$ , jeweils bezogen auf den trockenen Fall ( $Q = 0 \text{ ml s}^{-1}$ ) als Funktion von  $Q$ ; (b) Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  als Funktion von  $Q$  (vgl. [55])

### 3.4.2 Messergebnisse

Bei der ersten Messung wurde die Antenne im trockenen Fall mit Folie aber ohne Wasserfilm vermessen und die ermittelten Ergebnisse dienten danach als Referenz für die restlichen Messungen der Messreihe. Somit bekommen wir einen Bezug zu der trockenen Antenne.

Der Messablauf war für alle Messungen gleich. Zuerst wurde jeweils der Durchfluss und somit der Wasserfilm eingestellt. Sobald sich ein konstanter Durchfluss eingestellt hatte, wurde der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  der Antenne vermessen. Im Anschluss wurde die Antenne mit der Speiseleitung des Nahfeld-Scanners verbunden und eine planare Messung initialisiert. Nach der planaren Messung begann der Ablauf von vorne mit einer anderen Schichtdicke.

Abbildung 3.11 zeigt die Resultate der Messreihe in Abhängigkeit vom Volumenstrom  $Q$ .

Es zeigt sich, dass der Richtfaktor der Hornantenne mit steigender Schichtdicke, also bei einem höheren Volumenstrom, zunimmt. Die Messung bestätigt damit die Ergebnisse aus der Simulation. Die Messung bestätigt darüber hinaus, dass die

Verluste durch die Verschlechterung der Anpassungseffizienz den geringsten Beitrag zu der Wet-Antenna-Dämpfung haben. Der größte Beitrag zu dieser Dämpfung entsteht durch den abnehmenden Antennenwirkungsgrad. Da die Generierung von niedrigen Volumenströmen (kleiner  $0,2 \text{ ml s}^{-1}$ ) nicht möglich war, liegen in diesem Bereich keine Messungen vor. Allein zwischen der Messung der trockenen Antenne und der dünnsten vermessenen Schichtdicke wächst die Wet-Antenna-Dämpfung um 3,6 dB an. Das ist ein Indiz dafür, dass schon kleine Schichtdicken zu einer starken Dämpfung führen, wie es schon die Simulationsergebnisse zeigen.

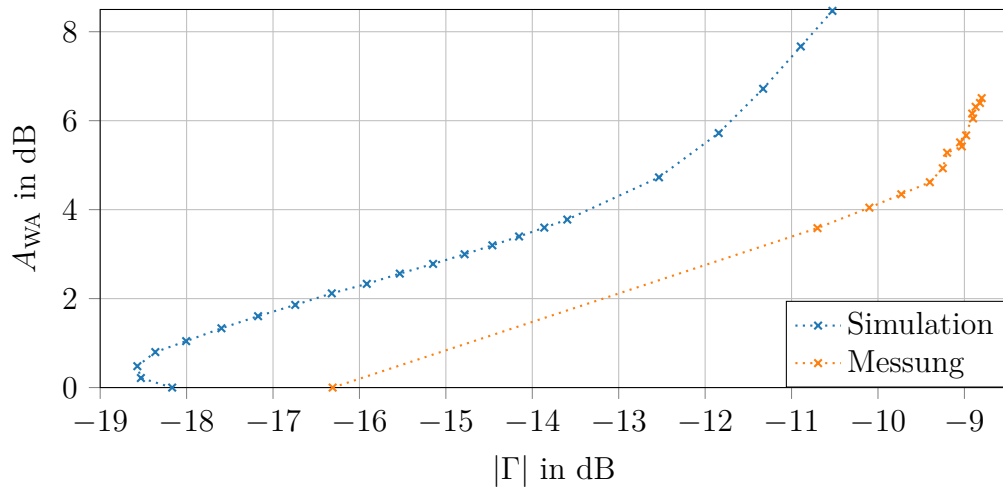
## 3.5 Vergleich zwischen Simulation und Messung

Ein direkter quantitativer Vergleich des Simulationsergebnisses mit dem Messergebnis ist nicht möglich, da der Grad der Nässe bei der Simulation durch die Schichtdicke des Wasserfilms bestimmt wird und bei der Messung durch den Volumenstrom des Wassers. Da die Geschwindigkeit des Wassers zwischen der Grundplatte und der Folie nicht bekannt ist, können wir die Schichtdicke auch nicht bestimmen. Somit ist nur ein qualitativer Vergleich zwischen der Simulation und dem Messergebnis möglich.

Sowohl die Simulation als auch die Messung haben gezeigt, dass der Richtfaktor  $D$  mit zunehmender Wasserfilmdicke zuerst steigt, bis er ab einem Scheitelpunkt wieder sinkt. Während dieser Scheitelpunkt bei der Simulation bei einer Wasserfilmdicke von  $130 \mu\text{m}$  erreicht wird, liegt er bei der Messung bei einem Volumenstrom von etwa  $1,8 \text{ ml s}^{-1}$ . Vergleicht man die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen, so scheint es, als würde die Messung (0 bis  $2,8 \text{ ml s}^{-1}$ ) nur den Simulationsausschnitt von 0 bis  $150 \mu\text{m}$  darstellen.

Abbildung 3.12 zeigt die Wet-Antenna-Dämpfung in Abhängigkeit von dem Eingangsreflexionsfaktor der Antenne, sowohl für die Simulation als auch für die Messung. Der Versatz zwischen der Simulation und der Messung kann etwa durch Fertigungstoleranzen der Hornantenne oder durch die dem Herstellungsprozess geschuldete Oberflächenrauheit entstehen. Eine weitere Einflussquelle liegt in der Wahl der Referenzebene der Eingangsreflexionsfaktor-Messung. Bei der Simulation liegt die Referenzebene direkt an dem Hohlleiterport der Antenne, da der VNA bei der Messung mit einem koaxialen Kalibrier-Kit kalibriert und über einen Koaxial-zu-Hohlleiter-Adapter mit der Hornantenne verbunden wurde. Somit liegt zwischen der Referenzebene und der Antenne der Adapter. Zu berücksichtigen ist auch, dass das in der Simulation verwendete Modell zur Beschreibung der Permittivität des Wassers eine konstante Temperatur von  $25^\circ\text{C}$  annimmt, aber während der Messung die Temperatur des Wassers nicht stabilisiert wurde.

Prinzipiell ist es technisch realisierbar, den Eingangsreflexionsfaktor der Richtfunkantenne einer Richtfunkstrecke im Betrieb zu messen, wohingegen dies bei dem Richtfaktor und dem Antennenwirkungsgrad sehr umständlich ist. Indem man den Eingangsreflexionsfaktor misst, kann man den Beitrag der Anpassungseffizienz zu



**Abb. 3.12:** Direkter Vergleich zwischen den Simulations- und Messergebnissen: Die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  als Funktion vom Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ . Mit zunehmender Nähe auf dem Radom verschlechtert sich die Anpassung der Antenne ( $|\Gamma|$  steigt) und die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  steigt (vgl. [55])

der Wet-Antenna-Dämpfung direkt bestimmen. Dieser Beitrag spielt im Vergleich zu den beiden anderen Beiträgen vom Richtfaktor und dem Antennenwirkungsgrad zwar eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 3.6 und Abbildung 3.11), doch die Ergebnisse der Simulation und der Messung zeigen, dass der Eingangsreflexionsfaktor ein Indikator für die Wet-Antenna-Dämpfung ist (Abbildung 3.12). Zusammenfassend eröffnet der Eingangsreflexionsfaktor der Antenne einen Zugang zur Bestimmung der Wet-Antenna-Dämpfung.

## 4 Feldexperiment zur Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts

Dieses Kapitel stellt das Feldexperiment vor, mit dem der Wet-Antenna-Effekt unter realistischen Bedingungen im Frequenzbereich von 18 GHz bis 40 GHz untersucht wird.

Dazu wird zunächst das Konzept zum Messen der Pfaddämpfung bei dem Experiment präsentiert. Anschließend wird das Testgelände mit den dortigen meteorologischen Messinstrumenten eingeführt. Danach werden das verwendete Stepped-Frequency Continuous Wave (SFCW) Radar Messprinzip erklärt und das für das Experiment entwickelte Millimeterwellen-Instrument, sowie dessen Aufbau und Performanz, präsentiert. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der notwendigen Feldtauglichkeit des Instruments. Abschließend wird durch Messergebnisse des Experiments gezeigt, welchen Einfluss der Wet-Antenna-Effekt auf die Pfaddämpfung hat. Dieser Einfluss führt zu einer Fehlerbildung bei der Ermittlung der Regenintensität.

Dieses Kapitel, vor allem die Abschnitte 4.1, 4.3, 4.4 und 4.5, basiert auf dem wissenschaftlichen Artikel [59].<sup>1</sup>

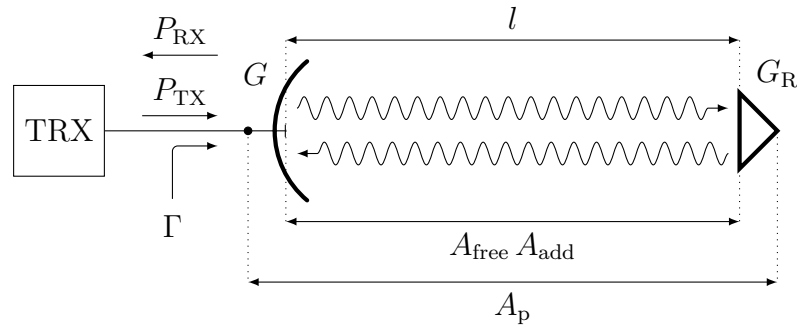
### 4.1 Konzept

Bei einer Richtfunkstrecke handelt es sich um einen bistatischen Aufbau, bei dem eine Antenne als Sendeantenne und eine zweite Antenne als Empfangsantenne fungiert (vgl. Kapitel 2, Abbildung 2.7). Wenn man bei einem bistatischen Link eine Antenne durch einen Reflektor ersetzt, erhält man einen monostatischen Link. Bei diesem Experiment wird ein monostatischer Aufbau verwendet, wie schon bei dem Vorgänger-Experiment ([19], [60]). Für diese Arbeit dient dabei ein Tripelspiegel als Reflektor. Da die Welle zum Ausgangspunkt des Links zurück reflektiert wird, kann die Sendeantenne auch als Empfangsantenne verwendet werden. Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen monostatischen Links.

Das Grundprinzip des Aufbaus können wir folgendermaßen skizzieren. Der Sender regt eine leitungsgebundene Welle an, welche die Antenne in eine Freiraumwelle umwandelt und abstrahlt. Diese abgestrahlte Welle erfährt durch die Distanz und die

---

<sup>1</sup>„Microwave Instrument for Simultaneous Wet Antenna Attenuation and Precipitation Measurement“, erschienen im *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.



**Abb. 4.1:** Schematische Darstellung eines monostatischen Links, wie er bei dem Experiment verwendet wird.

Atmosphäre eine Dämpfung. Der Reflektor reflektiert die Welle, woraufhin sie die Strecke nochmals durchwandert und so dieselbe Dämpfung durch die Atmosphäre und die Distanz erfährt, wie auf dem Hinweg. Bei der Antenne wieder angekommen, die nun als Empfangsantenne fungiert, wird die Welle wieder in eine leitungsgebundene Welle umgewandelt. Diese wird von dem Sender aufgenommen und die Leistung bestimmt. Das Verhältnis zwischen der Empfangsleistung und der Sendeleistung beinhaltet somit unter anderem die Information über die Eigenschaften der Atmosphäre.

Für die Berechnung der Pfaddämpfung  $A_p$  eines monostatischen Links ist zu berücksichtigen, dass die elektromagnetische Welle die Distanz des Links  $l$  auf dem Hin- und Rückweg zweimal durchläuft. Des Weiteren müssen wir den Reflektor in der Leistungsbilanz berücksichtigen, für welche dieser mit seinem Reflektorgewinn  $G_R$  einen leistungsrelevanten Betrag liefert.

$$P_{RX} = P_{TX} (1 - |\Gamma|^2) G \frac{1}{A_{free} A_{add}} G_R \frac{1}{A_{free} A_{add}} G (1 - |\Gamma|^2) \quad (4.1)$$

Bei der Sendeleistung des Senders  $P_{TX}$  handelt es sich um die zur Verfügung stehende Leistung. Durch die Anpassungseffizienz  $1 - |\Gamma|^2$  der Antenne wird berücksichtigt, dass ein Teil der Leistung direkt zum Sender zurück reflektiert wird. Ähnlich verhält es sich bei dem Empfangsfall. Die Empfangsleistung des Senders  $P_{RX}$  entspricht der Leistung, die der Empfänger von der Antenne aufnimmt. Die Freiraumdämpfung  $A_{free}$  und die zusätzliche Dämpfung  $A_{add}$  beschreiben die Einflüsse, welche die Welle zwischen der Antenne und dem Reflektor erfährt. Die für uns später wichtige Dämpfung durch den Regen  $A_{rain}$  ergibt sich dabei aus der zusätzlichen Dämpfung  $A_{add}$ .

Da die Antenne sowohl als Sende- als auch Empfangsantenne verwendet wird, können wir unter der Prämisse, dass die Antenne reziprok ist, einige Vereinfachungen vornehmen. Der Antennengewinn ist im Sendefall gleich dem Antennengewinn im Empfangsfall und darum benennen wir hier den Antennengewinn mit  $G$ , ohne Unterscheidung zwischen Empfangs- oder Sendefall



Bei dem Eingangsreflexionsfaktor der Antenne verhält es sich ähnlich. Im Sendefall beschreibt der Term  $(1 - |\Gamma|^2)$ , wie viel Leistung die Antenne vom Sender aufnimmt. Im Empfangsfall wollen wir wissen, welchen Anteil der Leistung, die die Antenne zur Verfügung stellte, der Empfänger aufnimmt. Für den Empfangsfall beschreibt der Term  $(1 - |\Gamma|^2)$ , wie viel Leistung der Empfänger von der Antenne aufnimmt und entspricht demselben Term, wie in dem Sendefall  $(1 - |\Gamma|^2)$ .

Der Reflektorgewinn  $G_R$  ist die Wirkfläche des Reflektors bezogen auf die Antennenwirkfläche eines isotropen Kugelstrahlers  $A_{\text{iso}}$ :

$$G_R = \frac{A_R}{A_{\text{iso}}} \quad (4.2)$$

Die Antennenwirkfläche eines isotropen Kugelstrahlers  $A_{\text{iso}}$  können wir in Abhängigkeit der Wellenlänge wie folgt berechnen:

$$A_{\text{iso}} = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} \quad (4.3)$$

Die Wirkfläche des Reflektors entspricht dem Radarrückstreuquerschnitt des Reflektors  $\sigma_R$ . Für einen Tripelspiegel, wie in diesem Experiment, erhalten wir nach [61, S. 239]

$$\sigma_R = \frac{4\pi a^4}{3\lambda_0^2} = A_R, \quad (4.4)$$

mit der kurzen Seitenlänge  $a$  des gleichschenkelig-rechtwinkligen Dreiecks. Aus drei solcher Dreiecke besteht der Tripelspiegel. Nun können wir (4.4) und (4.3) in (4.2) einsetzen und erhalten für den Reflektorgewinn

$$G_R = \frac{A_R}{A_{\text{iso}}} = \frac{\sigma}{A_{\text{iso}}} = \frac{\sigma}{\frac{\lambda_0^2}{4\pi}} = \frac{16\pi^2 a^4}{3\lambda_0^4}. \quad (4.5)$$

Da das später vorgestellte Instrument die Pfaddämpfung misst, müssen wir die Formel (4.1) umformen und erhalten für die Pfaddämpfung

$$A_p = \frac{P_{\text{TX}}}{P_{\text{RX}}} = \frac{A_{\text{free}}^2 A_{\text{add}}^2}{G^2 G_R (1 - |\Gamma|^2)^2}. \quad (4.6)$$

Der Aufbau lässt sich auch mit der Radargleichung für den monostatischen Fall (vgl. [62, S. 6 f.]) beschreiben. Aus Gründen der Konsistenz müssen wir noch zwei Annahmen treffen. Zum einen nehmen wir an, dass die Antenne perfekt angepasst ist  $\Gamma = 0$  und zum anderen vernachlässigen wir den Einfluss der Atmosphäre  $A_{\text{add}} = 1$ . Wenn wir dann die Radargleichung expandieren und die Terme ordnen, zeigt sich die Struktur der Formel (4.1):

$$P_{\text{RX}} = \frac{P_{\text{TX}} G^2 \lambda_0^2 \sigma}{(4\pi)^3 l^4} = P_{\text{TX}} G \underbrace{\frac{\lambda_0^2}{(4\pi l)^2}}_{A_{\text{free}}^{-1}} \underbrace{\frac{\sigma}{\frac{\lambda_0^2}{4\pi}}}_{G_R} \underbrace{\frac{\lambda_0^2}{(4\pi l)^2}}_{A_{\text{free}}^{-1}} G \quad (4.7)$$

Nun implementieren wir noch unser Modell für die Wet-Antenna-Dämpfung aus Kapitel 3. Da der Regen prinzipiell den größten Beitrag zu der zusätzlichen Dämpfung liefert, können wir  $A_{\text{add}}$  gleich der Dämpfung durch Regen  $A_{\text{rain}}$  setzen und erhalten für die Pfaddämpfung

$$A_p = \frac{P_{\text{TX}}}{P_{\text{RX}}} = \frac{A_{\text{free}}^2 A_{\text{add}}^2 A_{\text{WA}}^2}{G_{\text{dry}}^2 G_{\text{R}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)^2} \Big|_{A_{\text{add}}=A_{\text{rain}}} = \frac{A_{\text{free}}^2 A_{\text{rain}}^2 A_{\text{WA}}^2}{G_{\text{dry}}^2 G_{\text{R}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)^2}. \quad (4.8)$$

Wie wir in Formel (4.8) sehen, liegen die Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  und die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{\text{WA}}$  jeweils quadriert vor. Dies hat zur Folge, dass die Pfaddämpfung  $A_p$  sensitiv auf Änderungen der beiden Werte reagiert. Das Experiment ist damit gut geeignet, um diese beiden Werte zu untersuchen.

## 4.2 Testgelände

Das verwendete Testgelände befindet sich in Fendt, einem Ortsteil der Gemeinde Peißenberg in der Nähe der Stadt Weilheim in Oberbayern. Bei dem Testgelände handelt es sich um das Voralpen-Observatorium des TERENO-Netzwerks (**TER**restrial **EN**vironmental **O**bservatories) und wird vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU) Atmosphärische Umweltforschung des Karlsruher Instituts für Technologie betrieben.

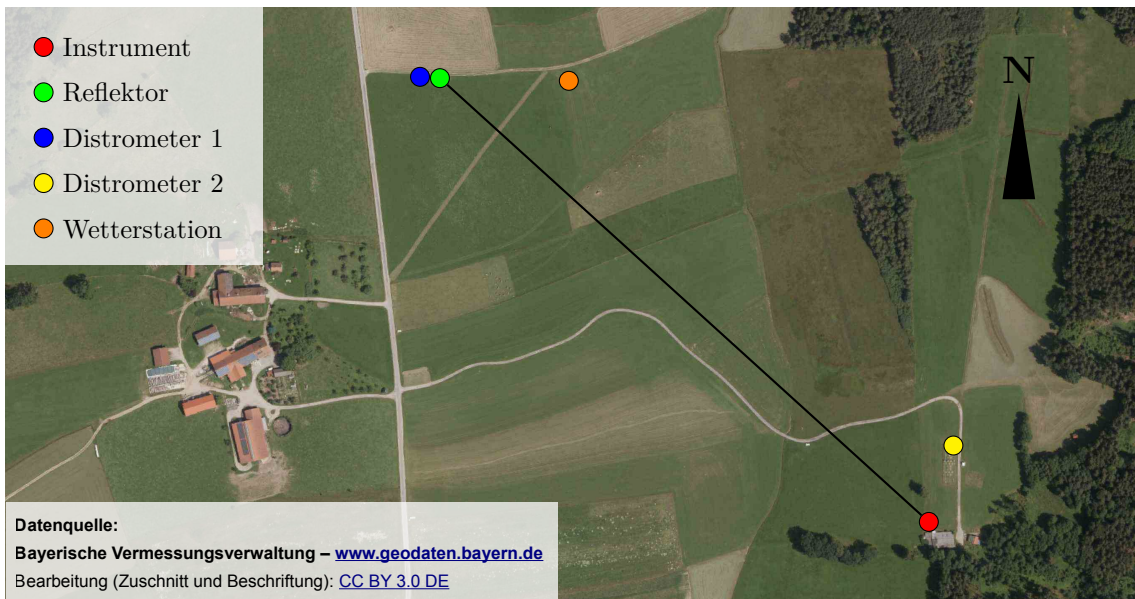
Der Turm, auf dem das Millimeterwellen-Instrument befestigt ist, befindet sich an der Position 47°49'44" Nord, 11°3'56" Ost, 600 m ü. NHN. Abbildung 4.2 zeigt eine Luftbildaufnahme des Testgeländes, in welcher die Positionen der meteorologischen Instrumente (Distrometer und Wetterstation) sowie die Funkstrecke eingezeichnet sind.

Der Abstand zwischen dem Instrument und dem Reflektor beträgt nach Luftbildaufnahmen in etwa 666 m. Direkt neben dem Reflektor befindet sich das Distrometer 1. Das Distrometer 2 befindet sich nördlich des Instruments und die Wetterstation liegt ca. 130 m östlich des Reflektors.

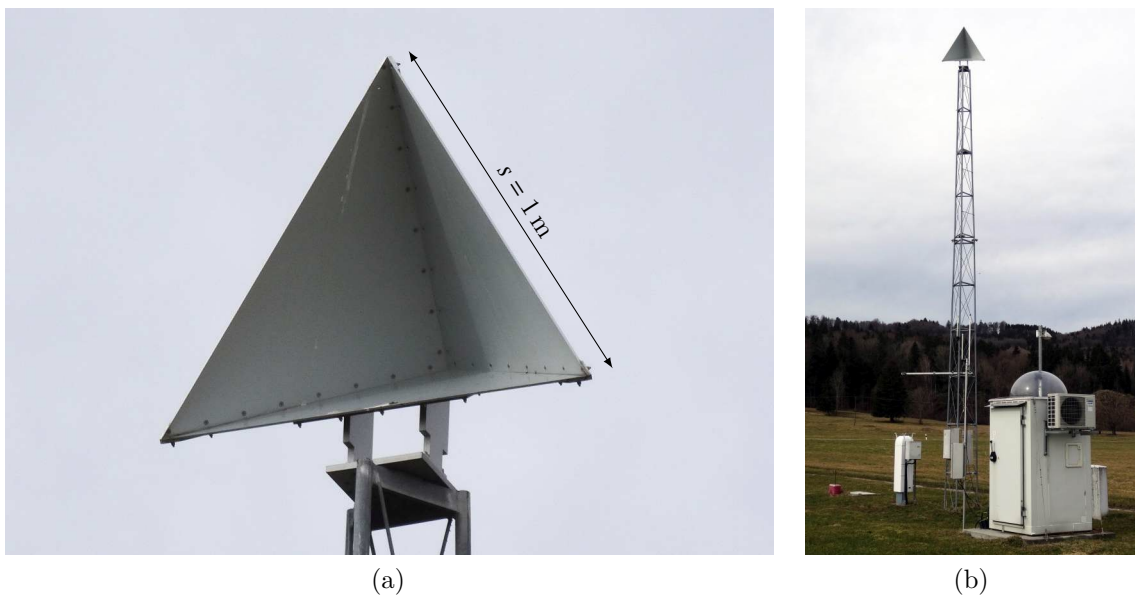
### 4.2.1 Funkstrecke

Die Funkstrecke besteht aus den Antennen des Instruments, dem Reflektor sowie dem Raum zwischen dem Instrument und dem Reflektor. Auf die Antennen des Instruments wird in Abschnitt 4.3 eingegangen. Abbildung 4.3 zeigt den Reflektor, installiert auf dem Turm. Der verwendete Reflektor besteht aus drei gleichschenkligen Dreiecken mit der langen Seite  $s$  und der kurzen Seite  $a$ . Die Seite  $s$  hat eine Länge von 1 m und die kurze Seite ist entsprechend dem Verhältnis  $s = \sqrt{2}a$ , 0,71 m lang.

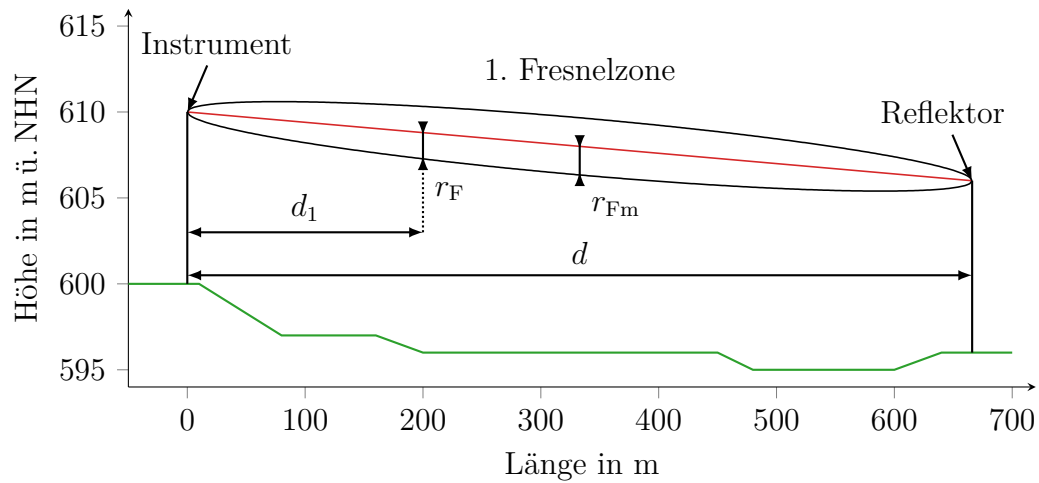
Ob das vorhandene Testgelände beziehungsweise die Funkstrecke für das Instrument geeignet sind, ermitteln wir nun.



**Abb. 4.2:** Luftbildaufnahme des Testgeländes in Fendt (Digitales Orthophoto mit 80 cm Bodenauf-  
 lösung) mit den Positionen der einzelnen Messinstrumente. Der Abstand zwischen dem Reflektor  
 und dem Mikrowellen-Instrument beträgt 666 m.



**Abb. 4.3:** Reflektor auf dem Testgelände in Fendt: (a) Nahaufnahme des Reflektors mit einer  
 Kantenlänge der Apertur von  $s = 1\text{ m}$  und (b) Reflektor mit Turm 10 m über Grund.



**Abb. 4.4:** Längsschnitt der Funkstrecke mit dem Höhenprofil des Geländes und den beiden Türmen (Instrument und Reflektor), sowie der genäherten ersten Fresnelzone nach Gleichung (4.9).

Als erstes betrachten wir dafür die Fresnelzone der Funkstrecke. Die erste Fresnelzone wird durch die Punkte entlang einer Funkstrecke, die einen Gangunterschied von  $\lambda_0/2$  zur direkten Verbindung zwischen Sender und Empfänger aufweisen, begrenzt. Somit erhalten wir für die Fresnelzone ein Ellipsoid, in dessen Brennpunkten sich die Antennen, beziehungsweise in unserem Fall die Antenne und der Reflektor, befinden. Man kann von einer quasi freien Ausbreitung sprechen, wenn sich in diesem Ellipsoid keine Hindernisse, wie zum Beispiel Bäume oder Häuser, befinden [63, S. 73 f.]. Der Radius  $r_F$  der erste Fresnelzone ist von der Position entlang der Funkstrecke abhängig und lässt sich wie folgt nähern [64, S. 82]:

$$r_F = 17,3 \text{ m} \sqrt{\frac{\frac{d_1}{\text{km}} \frac{d-d_1}{\text{km}}}{\frac{d}{\text{km}} \frac{f}{\text{GHz}}}} \quad (4.9)$$

In der Mitte der Funkstrecke hat die Fresnelzone ihre größte Ausdehnung. Wir erhalten den Radius in der Mitte  $r_{Fm}$  der ersten Fresnelzone wie folgt [63, S. 74]:

$$r_{Fm} = 15,8 \text{ m} \sqrt{\frac{\lambda_0}{\text{m}} \frac{d}{\text{km}}} \quad (4.10)$$

In Tabelle 4.1 sind die Radien der ersten Fresnelzone in der Mitte der Funkstrecke  $r_{Fm}$  für die sechs verwendeten Antennen ausgewertet. Abbildung 4.4 zeigt den Längsschnitt des Geländes und die erste Fresnelzone der Funkstrecke bei 18 GHz. Bei der niedrigsten Frequenz hat das Ellipsoid der Fresnelzone die größte Ausdehnung. Deshalb reicht die Betrachtung dieses Falles aus, um zu zeigen, dass die Funkstrecke unter dem Aspekt der Fresnelzone für das Instrument geeignet ist. Betrachten wir nun Abbildung 4.4, sehen wir, dass die erste Fresnelzone keinen Kontakt zu

dem Höhenprofil der Landschaft hat und es so zu keiner Beeinträchtigung des Funkfeldes durch den Boden kommt. Des Weiteren steht nördlich des Instruments ein Baum, der eventuell das Funkfeld beeinträchtigen könnte. Betrachten wir aber die Luftbildaufnahme 4.2 können wir abschätzen, dass zwischen dem Baum und der direkter Verbindung zwischen Instrument und Reflektor mehr als  $r_{\text{Fm}} = 1,7 \text{ m}$  liegen. Somit ist bei dem Experiment die erste Fresnelzone frei von Hindernissen.

Da wir bei unserem Modell der Pfaddämpfung (siehe Gleichung (4.8)) von Fernfeldkonditionen ausgehen, müssen wir nun überprüfen, ob diese mit den verwendeten Antennen und dem Reflektor auch erfüllt werden. Dazu berechnen wir die Grenze des reaktiven Nahfelds  $d_{\text{RNF}}$  und die Grenze des strahlenden Nahfelds  $d_{\text{FF}}$ , ab dem die Fernfeldbedingung herrscht [50, S. 34 ff.]. Das reaktive Nahfeld endet in einem Abstand von

$$d_{\text{RNF}} = 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda_0}}, \quad (4.11)$$

mit  $\lambda_0$  als Wellenlänge im freien Raum und  $D$  als Durchmesser der Antenne beziehungsweise als Durchmesser des Reflektor-Umkreises  $D_{\Delta}$ . Da der Reflektor, frontal betrachtet, ein gleichseitiges Dreieck mit der Seitenlänge  $s = 1 \text{ m}$  ist, erhalten wir für den Durchmesser des Umkreises

$$D_{\Delta} = \frac{2s}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ m}. \quad (4.12)$$

Die Grenze, ab der die Fernfeldbedingungen vorherrschen, lässt sich wie folgt abschätzen:

$$d_{\text{FF}} = 2 \frac{D^2}{\lambda_0}, \quad (4.13)$$

Zusätzlich muss noch die Bedingung  $D > \lambda_0$  erfüllt sein.

Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse für die Grenzen aller sechs Funkfelder. Da sich die Nahfeld-Bereiche der Antennen nicht mit den Nahfeld-Bereichen des Reflektors überschneiden, ist die Fernfeldkondition erfüllt und unser Modell gültig.

Mit dem vom Hersteller angegebenen Öffnungswinkel  $\Theta$  der Antennen können wir nun abschätzen, ob es zwischen der Antenne und dem Reflektor zu einer Bodenreflexion kommt. Für diese Abschätzung vernachlässigen wir das Höhenprofil und vereinfachen die Betrachtung so, als würden sich das Instrument und der Reflektor 10 m über derselben Höhe befinden. Relevant ist der Punkt  $B$ , bei dem die elektromagnetische Welle auf den Boden auftrifft und reflektiert wird. Trifft die Welle erst nach der Hälfte der Strecke auf den Boden, dann erreicht die vom Boden reflektierte Welle den Reflektor nicht und die Funkstrecke ist mehrwegefrei. In diesem Fall ist nur die direkte Verbindung relevant. Mit der vereinfachten Betrachtung erhalten wir ein rechtwinkliges Dreieck mit der Hypotenuse zwischen dem Instrument und

Antenne	$f$	$r_{\text{Fm}}$	Antenne			Reflektor		
			$D$	$d_{\text{RNF}}$	$d_{\text{F}}$	$D_{\Delta}$	$d_{\text{RNF}}$	$d_{\text{F}}$
A	18,000 GHz	1,7 m	0,39 m	0,9 m	18,3 m	1,15 m	2,8 m	160,0 m
B	22,235 GHz	1,5 m	0,39 m	1,0 m	22,5 m	1,15 m	3,0 m	197,6 m
C	25,375 GHz	1,4 m	0,39 m	1,1 m	25,7 m	1,15 m	3,1 m	225,6 m
D	28,500 GHz	1,3 m	0,39 m	1,1 m	28,9 m	1,15 m	3,3 m	253,3 m
E	34,800 GHz	1,2 m	0,39 m	1,2 m	35,3 m	1,15 m	3,5 m	309,3 m
F	38,500 GHz	1,1 m	0,39 m	1,2 m	39,0 m	1,15 m	3,6 m	342,2 m

**Tab. 4.1:** Ergebnisse für den Radius der ersten Fresnelzone in der Mitte der Funkstrecke  $r_{\text{Fm}}$ , sowie für die Grenze für das reaktive Nahfeld  $d_{\text{RNF}}$  und die Grenze  $d_{\text{F}}$ , ab der die Fernfeldbedingungen erfüllt werden, jeweils für Antenne und Reflektor.

dem Punkt  $B$  und der Ankathete mit Länge  $h$ . Der Winkel zwischen Hypotenuse und Ankathete entspricht  $90^\circ$  minus des halben Öffnungswinkels der Antenne. Die Gegenkathete  $x$  entspricht dem Abstand zwischen Mast und Punkt  $B$ :

$$x = h \tan \left( 90^\circ - \frac{\Theta}{2} \right) \quad (4.14)$$

Zuerst betrachten wir Antenne A, da diese den größten Öffnungswinkel der sechs Antennen besitzt. Bei einem Öffnungswinkel von  $3,2^\circ$  trifft die elektromagnetische Welle nach 358,0 m auf den Boden. Den kleinsten Öffnungswinkel besitzt die Antenne E mit  $1,6^\circ$ . Bei diesem Öffnungswinkel trifft die elektromagnetische Welle erst nach 716,2 m auf den Boden und somit erst nach dem Reflektor (666 m). Selbst bei der Antenne mit dem größten Öffnungswinkel trifft die Welle erst nach der Hälfte der Strecke auf den Boden, so dass die Funkstrecke mehrwegefrei ist. Diese Abschätzung ist stark vereinfacht und berücksichtigt nicht, dass die Antenne auch außerhalb des Öffnungswinkels Energie abstrahlt.

### 4.2.2 Distrometer

Das Distrometer ist ein meteorologisches Messinstrument, das die Anzahl der Tropfen, deren Größe sowie deren Geschwindigkeit misst. Aus diesen Daten kann sowohl die Regenrate bestimmt werden als auch die Verteilung der Tropfengröße (DSD). In dieser Arbeit werden die Daten von den Distrometern als vergleichende Messung der Regenintensität verwendet. Bei den beiden Distrometern handelt es sich um das Modell Parsivel<sup>2</sup> von der Firma OTT. Abbildung 4.5 zeigt die beiden Distrometer auf dem Testgelände in Fendt. Alle 60 s liefern die Distrometer Messdaten, aus denen für unsere Verwendung die Regenintensität extrahiert wird.

Ein Distrometer besteht, auf die wichtigsten Komponenten reduziert, aus einer Laserdiode und einem Laserempfänger. Durch den Niederschlag wird der Laserstrahl



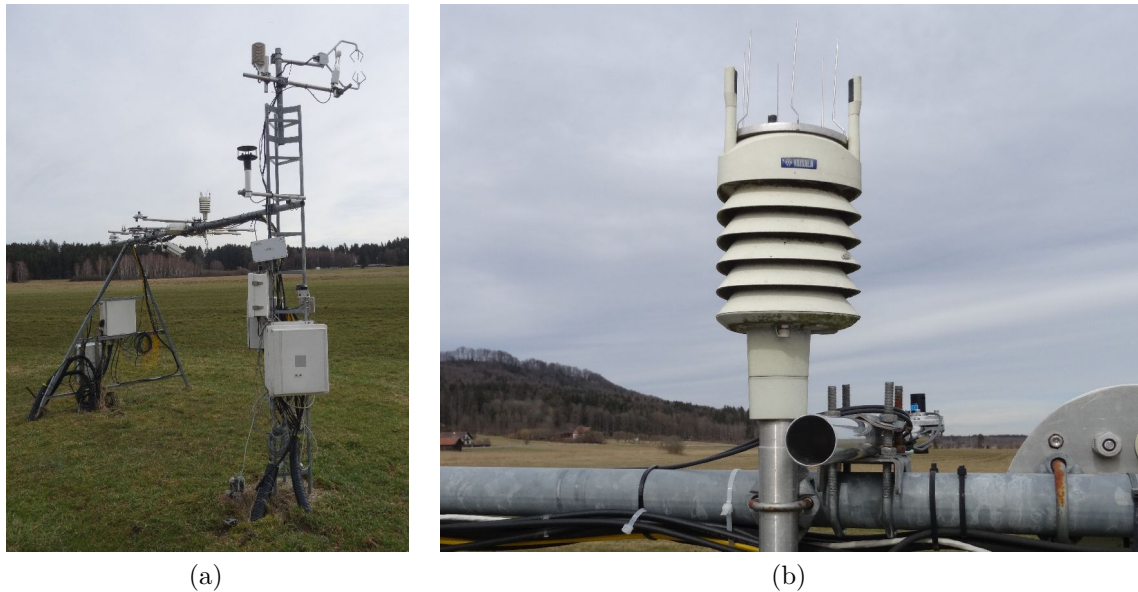
**Abb. 4.5:** Meteorologische Instrumente auf dem Testgelände in Fendt: (a) Distrometer 1 bei dem Reflektor und (b) Distrometer 2 in der Nähe des Millimeterwellen-Instruments.

gedämpft und von diesen Dämpfungswerten kann auf die Größe der Tropfen geschlossen werden. Ergänzend erhält man zu der Tropfengröße auch die Anzahl der Tropfen, sowie die Geschwindigkeit der Tropfen. Durch dieses Messprinzip ist es möglich, Niederschlagsarten wie Regen, Schnee und Hagel zu unterscheiden.

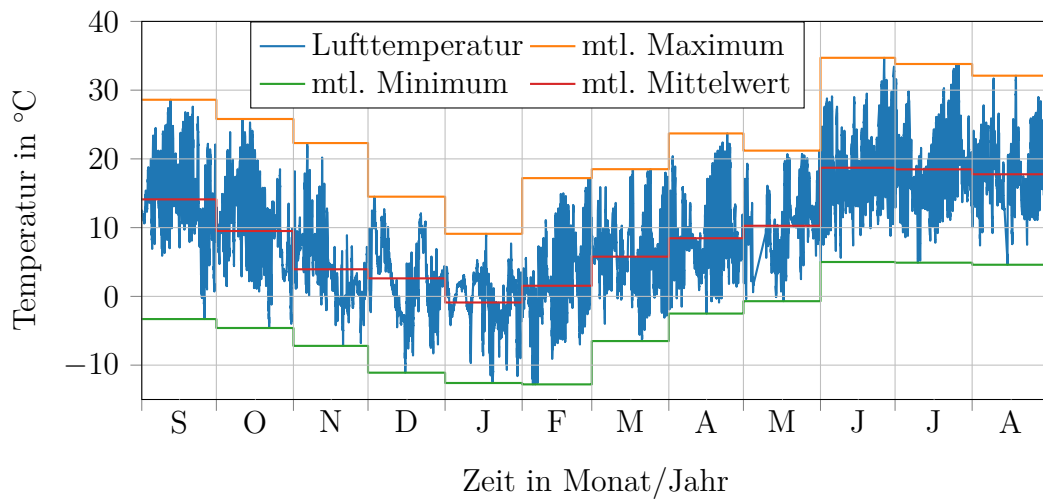
### 4.2.3 Wetterstation

Die Wetterstation in Fendt ist 2,2 m über Grund installiert und vom Typ WXT520 der Firma Vaisala. Sie liefert alle 60 s meteorologische Messdaten wie Windrichtung, Windstärke, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit und Regenintensität. Abbildung 4.6 zeigt die Wetterstation neben anderen Messinstrumenten in Fendt. Die Wetterstation misst die für uns relevante Regenintensität mithilfe eines piezoelektrischen Sensors, welcher den Aufschlag der einzelnen Tropfen detektiert und von der Intensität des Aufschlages auf die Tropfengröße schließt. Aus der Anzahl der Tropfen und deren Tropfengröße kann die Regenintensität berechnet werden.

Abbildung 4.7 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur über ein Jahr vom 1. September 2018 bis zum 31. August 2019. Zusätzlich sind die monatlichen Minima und Maxima sowie die Durchschnittstemperatur dargestellt.



**Abb. 4.6:** Wetterstation auf dem Testgelände in Fendt (130 m östlich von dem Reflektor): (a) Aufbau, an dem die Wetterstation und andere Instrumente installiert sind und (b) Nahaufnahme der Wetterstation: Unter der metallenen Platte auf der Oberseite befindet sich der piezoelektrische Sensor und im Inneren, geschützt vor der Sonne, befindet sich das Thermometer.



**Abb. 4.7:** Verlauf der Lufttemperatur mit einer zeitlichen Auflösung von 60 s, gemessen mit der Wetterstation WXT520 über ein Jahr (1. September 2018 bis zum 31. August 2019) sowie die monatlichen Minima, Maxima und die Durchschnittstemperatur.



## 4.3 Millimeterwellen-Instrument

Dieser Abschnitt behandelt das entwickelte Millimeterwellen-Instrument. Dazu wird das verwendete Messprinzip vorgestellt und der Aufbau des Instruments präsentiert. Die notwendige Kalibrierung des vektoriellen Netzwerkanalysators wird auch beleuchtet. Das Instrument ist für Langzeitmessungen im Außenbereich konzipiert und muss somit robust gegenüber den Umwelteinflüssen des Jahreszyklus sein. Die technischen Vorkehrungen dafür werden deshalb ebenfalls erläutert. Auch eine Kamera ist für das Projekt relevant, denn sie hält auf Fotos fest, ob sich während einer Messung Wasser auf den Radomen befindet oder nicht. Diese optische Überwachung der Radome ist ebenso Bestandteil des vorliegenden Abschnitts. Danach betrachten wir die Datenerfassung und -speicherung. Der Umgang mit den Daten schließt diesen Abschnitt ab.

### 4.3.1 Aufbau und Komponenten

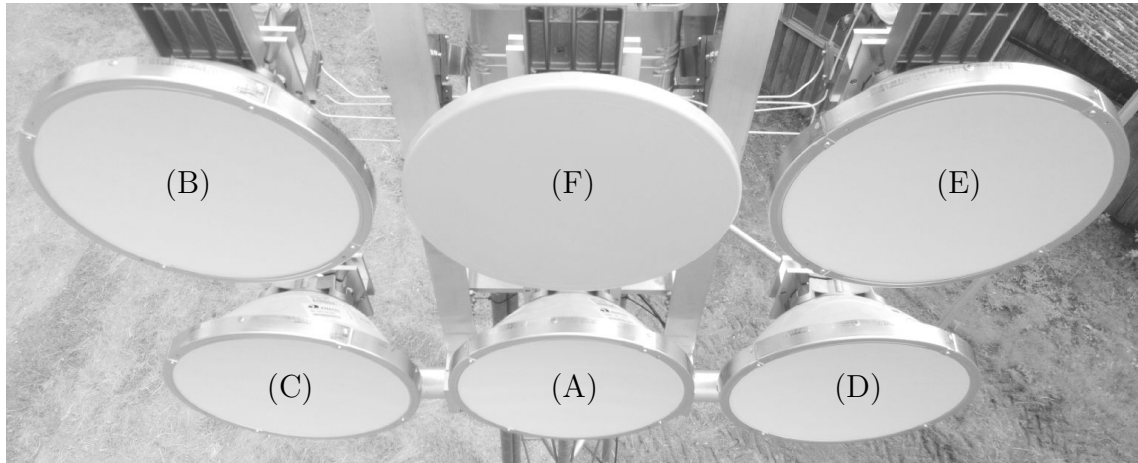
Die für die Messung relevanten Komponenten des Instruments sind zum einen die sechs Richtfunkantennen und zum anderen der vektorielle Netzwerkanalysator, der die Antennen vermisst. Der verwendete Netzwerkanalysator vom Typ MS46122B-040 der Firma Anritsu ist ein vektorieller 2-Tor-Netzwerkanalysator mit einer Betriebsfrequenz von 1 MHz bis 43,5 GHz.

Die verwendeten Richtfunkantennen sind handelsübliche Antennen der Firma Ericsson, wie sie auch in bestehenden Richtfunkstrecken verwendet werden. Die sechs Antennen haben jeweils unterschiedliche Betriebsfrequenzen im Bereich von 18 GHz bis 40 GHz. Abbildung 4.8 zeigt eine Aufnahme der Kamera von den sechs Antennen. Die Antennen haben eine kreisförmige Apertur mit einem Durchmesser von 0,39 m. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die verwendeten Antennen.

Da es sich um dual polarisierte Antennen mit einer horizontalen und einer vertikalen Polarisation handelt, kann mit dem ersten Port des Netzwerkanalysators die eine Polarisation und mit dem anderen Port die andere Polarisation vermessen werden.

Um zwischen den Antennen und deren Polarisation umzuschalten, werden zwei elektromechanische Koaxialschalter verwendet. Diese Schalter vom Typ 87106D der Firma Keysight Technologies haben einen Betriebsfrequenzbereich von 0 Hz bis 40 GHz. Es handelt sich dabei um einen SP6T-Schalter (single pole six throw), bei dem der Eingang mit einem der sechs Ausgänge verschaltet werden kann. Jeder Ausgang ist wiederum über den Anschluss der jeweiligen Polarisation mit einer der sechs Antennen verbunden. Die Anschlüsse der Schalter sind K-Buchsen (2,92-mm-Buchsen) und die Lebensdauer der Schalter ist mit zehn Millionen Schaltzyklen angegeben wobei für die ersten fünf Millionen Schaltzyklen die Performanz garantiert wird.

Alle Koaxialleitungen sind als Semi-Rigid Koaxialkabel ausgeführt und mit K-Steckern konfektioniert. Darunter fallen die zwei Verbindungsleitungen zwischen dem



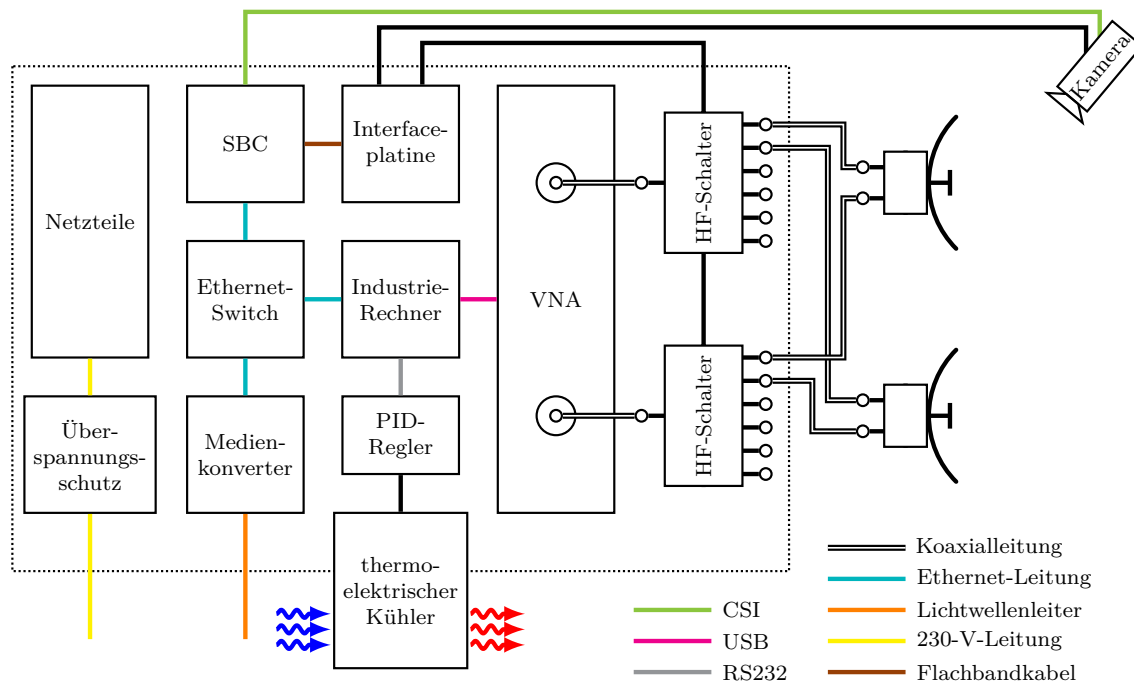
**Abb. 4.8:** Aufnahme der installierten Kamera von den sechs Antennen. (A) ANT2 0.3 18 HPX, (B) ANT2 0.3 23 HPX, (C) ANT2 0.3 24/26 HPX, (D) ANT2 0.3 28 HPX, (E) ANT2 0.3 32 HPX und (F) ANT2 0.3 38 HPX.

Netzwerkanalysator und den beiden Koaxialschaltern sowie die zwölf Verbindungen zwischen den Schaltern und den sechs Antennen. Da die Antennen über Hohlleiteranschlüsse verfügen, werden die Koaxialleitungen über einen Hohlleiter-Koax-Adapter mit den Antennen verbunden. Antenne A und B benötigen einen K-Buchse-WR42-Adapter, Antenne C und D einen K-Buchse-WR34-Adapter und die beiden Antennen E und F benötigen K-Buchse-WR28-Adapter.

Der Netzwerkanalysator und die Koaxialschalter befinden sich zum Schutz in einer Kiste aus Aluminium. In dieser Kiste befindet sich auch die Steuereinheit für den Netzwerkanalysator. Diese Steuereinheit ist ein Industriecomputer, der für den Dauerbetrieb geeignet und nur für die Steuerung des Netzwerkanalysators zuständig ist. Dazu ist der Computer mit dem Netzwerkanalysator via USB verbunden. Für den Datenaustausch ist der Industriecomputer mit einem Ethernet-Switch in der

Antenne	Produktname	$\frac{D}{m}$	$\frac{G}{dBi}$	$\frac{ \Gamma }{dB}$	$\Theta$	Hohlleiter
A	ANT2 0.3 18 HPX	0,39	34,3	$\leq -14$	$3,2^\circ$	WR 42
B	ANT2 0.3 23 HPX	0,39	35,6	$\leq -14$	$3,0^\circ$	WR 42
C	ANT2 0.3 24/26 HPX	0,39	36,9	$\leq -14$	$2,5^\circ$	WR 34
D	ANT2 0.3 28 HPX	0,39	38,3	$\leq -14$	$2,2^\circ$	WR 34
E	ANT2 0.3 32 HPX	0,39	39,6	$\leq -14$	$1,8^\circ$	WR 28
F	ANT2 0.3 38 HPX	0,39	40,3	$\leq -14$	$1,6^\circ$	WR 28

**Tab. 4.2:** Herstellerangaben für die sechs verwendeten Richtfunkantennen: Durchmesser  $D$  der Antenne, Antennengewinn  $G$ , maximaler Eingangreflexionsfaktor  $|\Gamma|$  und der Öffnungswinkel  $\Theta$ . Die Antenne E wird außerhalb des vom Hersteller spezifizierten Bereichs betrieben.



**Abb. 4.9:** Schematischer Aufbau des Messinstrumentes mit den verwendeten Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten.

Kiste verbunden. Auf dem Industriecomputer läuft die ShockLine™ VNA<sup>2</sup> Software der Firma Anritsu, die den Netzwerkanalysator steuert.

Der Einplatinencomputer (SBC<sup>3</sup>) ist ebenfalls mit dem Ethernet-Switch verbunden. Dieser Einplatinencomputer ist vom Typ Raspberry Pi 3 Model B+ und ist der Hauptrechner des Instruments. Er initialisiert die einzelnen Messungen und ist für das korrekte Speichern der Messdaten zuständig. Des Weiteren steuert er die zwei elektromechanischen Koaxialschalter, damit die zu vermessende Antenne mit dem Netzwerkanalysator verbunden ist. Dafür verfügt der Einplatinencomputer über eine eigens entwickelte Schnittstellenplatine, über die er die Schalter schaltet und auch kontrolliert, ob der richtige Schaltpfad aktiv ist.

Für die Kommunikation nach außen ist der Ethernet-Switch mit einem Medienkonverter verbunden, der das interne Netzwerk des Instruments über Lichtwellenleiter mit der lokalen EDV-Infrastruktur und dem Internet verbindet. Durch die Lichtwellenleiter ist das interne Netzwerk von der lokalen EDV-Infrastruktur galvanisch getrennt und bietet somit Schutz vor Überspannungsschäden, zum Beispiel in Folge eines Gewitters.

Das Instrument wird über das lokale Niederspannungsnetz elektrisch versorgt und zum Schutz der verbauten Komponenten im Inneren des Instruments wird dazu

<sup>2</sup>englisch: vector network analyzer

<sup>3</sup>englisch: single board computer

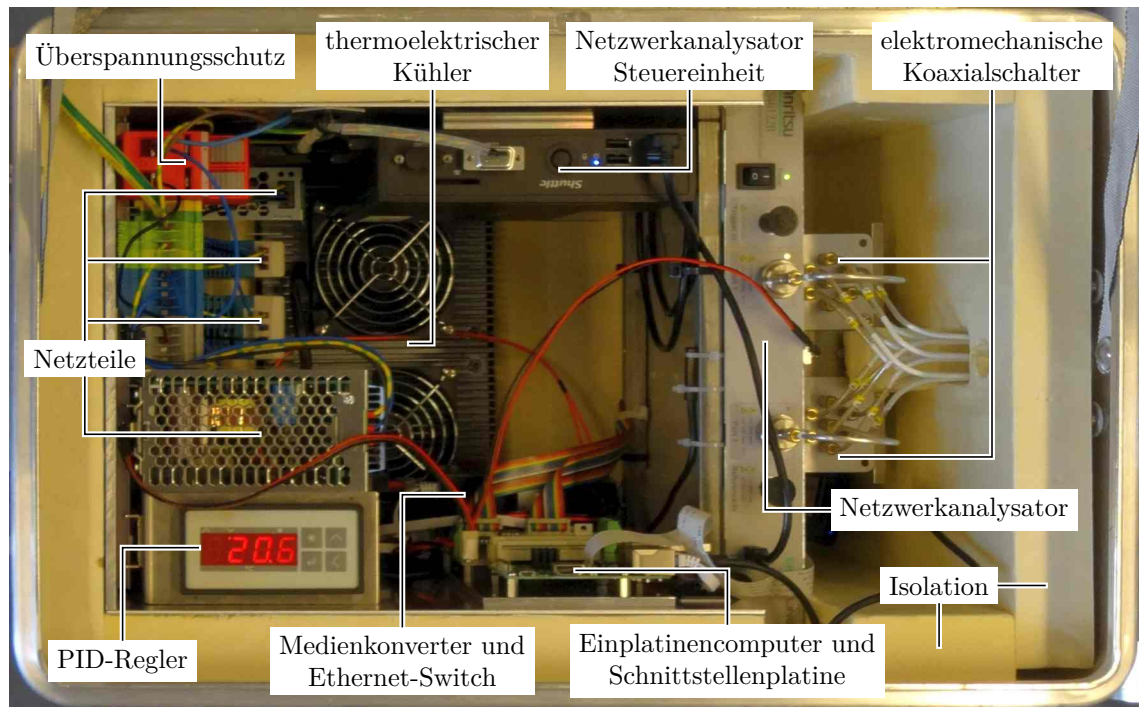


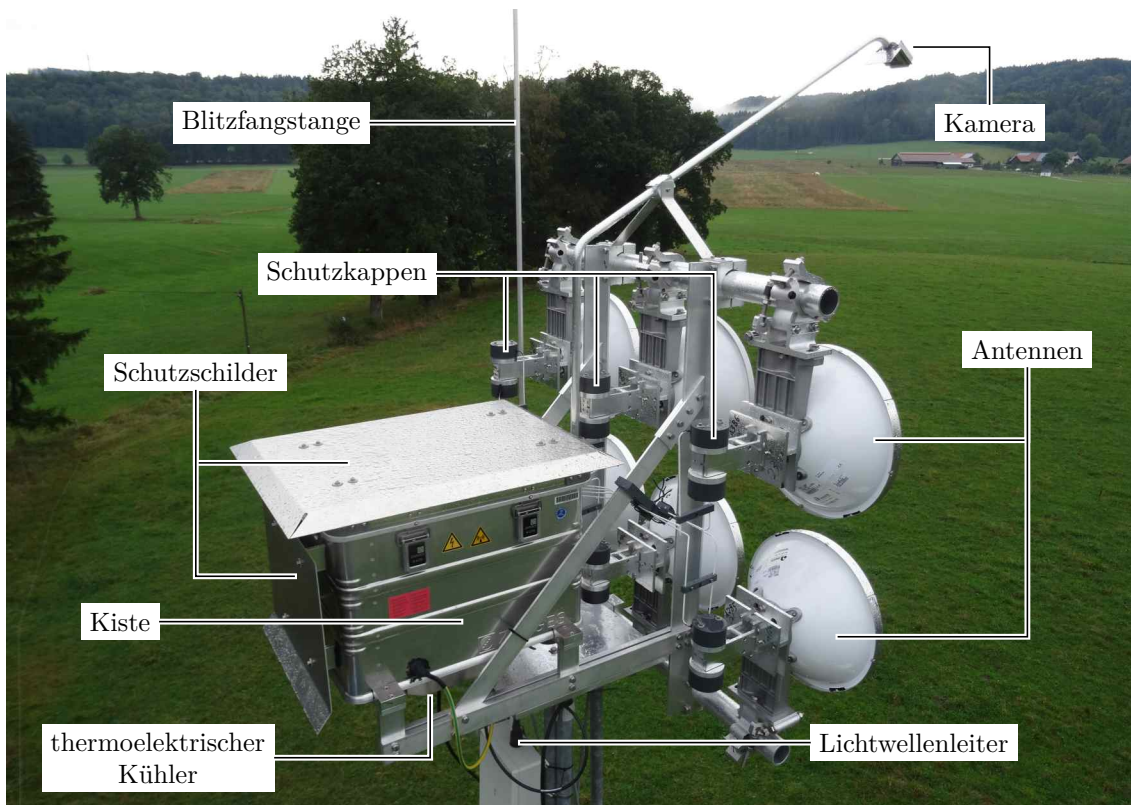
Abb. 4.10: Innenaufbau des Instruments

ein Überspannungsschutz Modul verwendet. Zusätzlich ist das Instrument mit einer Blitzfangstange versehen und die Kiste geerdet.

Die Versorgungsspannung wird von sechs Schaltnetzteilen in drei Spannungsstufen (5 V, 12 V und 24 V) zur Verfügung gestellt. Um eventuelle Störungen der Komponenten zueinander zu reduzieren, sind gewisse Stromkreise voneinander getrennt. Die Versorgung der beiden elektromechanischen Koaxialschalter ist von der Versorgung des thermoelektrischen Kühlers getrennt, da dieser mit hohen Strömen pulswidenmoduliert getrieben wird, und so keine Störungen von der Versorgung des Kühlers auf die Versorgung der Koaxialschalter übertreten können. Auch die Versorgung des vektoriiellen Netzwerkanalysators ist separat von der Versorgung des Industrierechners realisiert, um eventuelle Störungen auf der Versorgung des Industrierechners von der Versorgung des Netzwerkanalysators zu entkoppeln.

Für die Stabilisierung der Temperatur des Instruments ist an der Unterseite ein thermoelektrischer Kühler installiert (siehe Abbildung 4.10 und 4.11). In Unterabschnitt 4.3.5 werden die Relevanz einer Kühlung sowie die Performanz des verwendeten Kühlers behandelt. Thermoelektrische Kühler sind im Vergleich zu Kühlgeräten mit Kompressor vibrations- und verschleißärmer. Ein weiterer Vorteil eines thermoelektrischen Kühlers besteht darin, dass er durch bloßes Umpolen der Spannung sowohl kühlen als auch heizen kann.

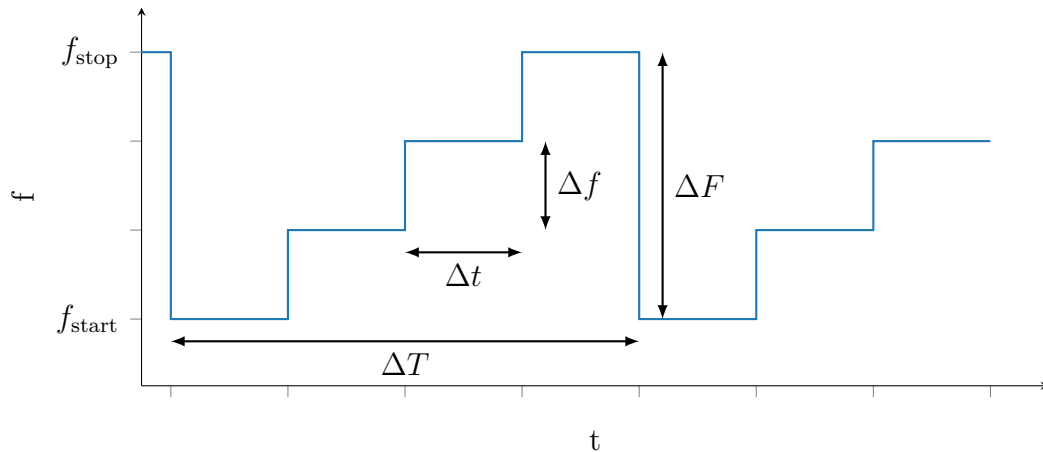
Der verwendete Kühler ist vom Typ FC-OUTS-PS10 der Firma Fuhrmeister



**Abb. 4.11:** Millimeterwellen-Instrument, installiert auf dem Turm in Fendt. Auf der Unterseite der Kiste befinden sich der thermoelektrische Kühler, der Stromanschluss und die Speisung mit dem Lichtwellenleiter (vgl. [59]). Die sechs Antennen sind zum Reflektor im Nordwesten ausgerichtet.

und seine Nutzkühlleistung ist mit 100 W angegeben. Der Kühler wird von einem Peltier-Controller vom Typ TC3212 der Firma CoolTronic mit einem PWM-Signal (Pulsweitenmodulation) getrieben. Dabei handelt es sich um einen PID-Regler mit integrierter Leistungsstufe. Die Ist-Temperatur für den Regler wird mithilfe eines Platin-Messwiderstand PT1000 an der unteren Halterung des Netzwerkanalysators ermittelt.

Die für die optische Untersuchung verwendete Kamera ist am Ende des Auslegers montiert, welcher über die Antennen ragt. Abbildung 4.11 zeigt den Ausleger mit der Kamera. Durch diesen Ausleger hat die Kamera einen perspektivischen Blick auf die sechs Antennen. Das Gehäuse der Kamera wurde eigens für dieses Instrument entwickelt und enthält neben dem Kameramodul auch 16 Infrarot-LEDs zur Beleuchtung. Durch die Orientierung des Sichtfelds der Kamera schräg nach unten und die Verwendung eines kleinen Daches ist gewährleistet, dass das Sichtfeld durch Wasser oder Schnee nicht beeinträchtigt wird. Der Ausleger besteht aus einem Aluminiumrohr, über das der Einplatinencomputer mit dem Kameramodul verbunden ist sowie aus der Versorgung der Infrarot-LEDs. In Unterabschnitt 4.3.6 wird auf



**Abb. 4.12:** Frequenzverlauf eines SFCW-Radars über die Zeit. Die Frequenzspanne  $\Delta F$  definiert die räumliche Auflösung des Systems und der Frequenzschritt  $\Delta f$  limitiert den Eindeutigkeitsbereich.  $\Delta t$  ist die Messzeit eines einzelnen Frequenzpunktes und  $\Delta T$  ist die Messzeit eines ganzen Entfernungsprofils.

den genaueren Aufbau der optischen Überwachung der Radome eingegangen.

### 4.3.2 Stepped-Frequency-Continuous-Wave-Prinzip

Das hier präsentierte Millimeterwellen-Instrument basiert auf dem Prinzip des Stepped-Frequency-Continuous-Wave-Radar (SFCW-Radar). Die Vorgänger-Instrumente ([19] und [60]) verwendeten hingegen das Pulsradar-Prinzip. Das SFCW-Radar-Prinzip wird häufig bei Bodenradaren eingesetzt (vgl. ground penetrating radar [65]). Bei diesem Prinzip wird die örtliche Distanz in der Phase des Signals kodiert. Bei dem FMCW-Radar (frequency modulated continuous wave radar) liegt die Information über den Ort in der Frequenz.

Bei dem SFCW-Radar wird im Unterschied zum FMCW-Radar keine lineare Rampe verwendet, sondern ein Frequenzverlauf in Treppenform mit diskreten Frequenzpunkten. Abbildung 4.12 zeigt die schematische Darstellung eines solchen Verlaufes eines SFCW-Radars.

Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Frequenzpunkten, wie zum Beispiel  $f_n$  und  $f_{n+1}$ , ist der Frequenzschritt

$$\Delta f = f_{n+1} - f_n. \quad (4.15)$$

Der Frequenzschritt  $\Delta f$  definiert den Eindeutigkeitsbereich eines SFCW-Radars, also die maximale Distanz  $r_{\max}$  zwischen dem Radarsystem und einem Radarziel, bei welchem der Ort korrekt wiedergegeben wird:

$$\Delta f = \frac{c_0}{2r_{\max}} \quad (4.16)$$

Die Frequenzspanne  $\Delta F$  zwischen dem Frequenzpunkt mit der höchsten Frequenz  $f_{\text{stop}}$  und dem Frequenzpunkt mit der niedrigsten Frequenz  $f_{\text{start}}$  ist

$$\Delta F = \frac{c_0}{2\Delta r}. \quad (4.17)$$

Für eine Ortsauflösung  $\Delta r$  von 1 m benötigen wir also eine Frequenzspanne  $\Delta F$  von 150 MHz, mit dem gerundeten Wert  $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  für die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ .

Die Größe eines Frequenzschritts  $\Delta f$  berechnet sich durch

$$\Delta f = \frac{c_0}{2r_{\text{max}}}, \quad (4.18)$$

in Abhängigkeit von der maximalen Distanz, die noch im Eindeutigkeitsbereich liegt. Aus Abschnitt 4.2 wissen wir, dass unser Reflektor in einem Abstand von 666 m zum Instrument liegt. Da der Reflektor im Eindeutigkeitsbereich liegen muss, legen wir für  $r_{\text{max}}$  einen Wert von 1000 m fest. Bei 1000 m für den Eindeutigkeitsbereich  $r_{\text{max}}$  benötigen wir einen Frequenzschritt  $\Delta f$  von 150 kHz.

Nun können wir die Anzahl der Frequenzpunkte  $M$  einer Messung ermitteln:

$$M = \left\lceil \frac{\Delta F}{\Delta f} \right\rceil + 1 \quad (4.19)$$

Das Aufrunden des Bruches ist notwendig, da nur ganze Frequenzpunkte möglich sind und so  $M$  auch eine ganze Zahl sein muss ( $M \in \mathbb{N}$ ). Mit den ermittelten Werten für die Frequenzspanne  $\Delta F = 150 \text{ MHz}$  und dem Frequenzschritt  $\Delta f = 150 \text{ kHz}$  kommen wir auf  $M = 1001$  Frequenzpunkte.

Für jeden Frequenzpunkt erhalten wir einen komplexen Messwert und alle  $M$  Messwerte bilden den gemessenen Signalvektor  $s$  ( $s \in \mathbb{C}^M$ ). Dieser Vektor enthält die Summe aller Reflexionen, die das SFCW-Radar misst. Darunter fallen in erster Linie die Reflexionen der Antenne und des Reflektors, aber auch solche, die durch Hindernisse wie Bäume oder Regen entstehen.

Die Information im gemessenen Signalvektor liegt in der Frequenz-Domäne vor und wir müssen sie mithilfe der inversen Fourier-Transformation in die Zeit-Domäne transformieren. Dort erhalten wir die Reflexionswerte in Abhängigkeit von der Laufzeit und diese ist wiederum linear proportional zu dem gewünschten Entfernungsprofil.

Bevor wir die Domäne wechseln, müssen wir noch in der Frequenz-Domäne den Signalvektor  $s$  bearbeiten, um die Qualität des Entfernungsprofils zu verbessern. Um die Nebenkeulenunterdrückung im Entfernungsprofil zu erhöhen, wenden wir auf den Signalvektor  $s$  einen Fenstervektor  $w$  [66], [67] an. Den Blackman-Fenstervektor  $w$  erhalten wir mit der Blackman-Fensterfunktion:

$$w[n] = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right), \quad (4.20)$$

mit der Länge des Fenstervektors  $M$  und  $n \in \{0, 1, \dots, M - 1\}$ . Somit hat der Fenstervektor die Form  $w \in \mathbb{R}^M$ . Nun manipulieren wir den gemessenen Signalvektor  $s$  mit dem Fenstervektor  $w$ , indem die beiden Vektoren elementweise multipliziert werden. Wir erhalten den manipulierten Signalvektor

$$\hat{s}[n] = s[n] w[n] , \quad (4.21)$$

in derselben Form ( $\hat{s} \in \mathbb{C}^M$ ) wie beim ursprünglichen Vektor  $s$ .

Die Fensterfunktion dämpft das beobachtete Signal (coherent gain). Um schlussendlich korrekte Leistungswerte zu bekommen, muss dem Signal im Anschluss diese verlorene Energie wieder zugeführt werden. Bei dieser Korrektur wird durch eine skalare Multiplikation mit dem Kehrwert des Coherent-Gain-Faktors sein Einfluss kompensiert [68]. Der Wert des Coherent-Gain-Faktors beträgt bei dem Blackman-Fenster im Allgemeinen 0,42 [68]. Der Kehrwert des Coherent-Gain-Faktors entspricht dem benötigten Korrekturfaktor, und so erhalten wir einen Korrekturfaktor von 2,381. Bei einem Blackman-Fenster mit der Länge  $M = 1001$  erhalten wir für den Korrekturfaktor einen Wert von 2,383.

Nun können wir von der Frequenz-Domäne in die Zeit-Domäne wechseln. Die inverse Fourier-Transformation liefert das unkompenzierte Entfernungsprofil und mit der Kompensation des Coherent-Gain-Faktors erhalten wir unser gewünschtes Entfernungsprofil

$$R = 2,383 f_{\text{IFFT}}(\hat{s}) . \quad (4.22)$$

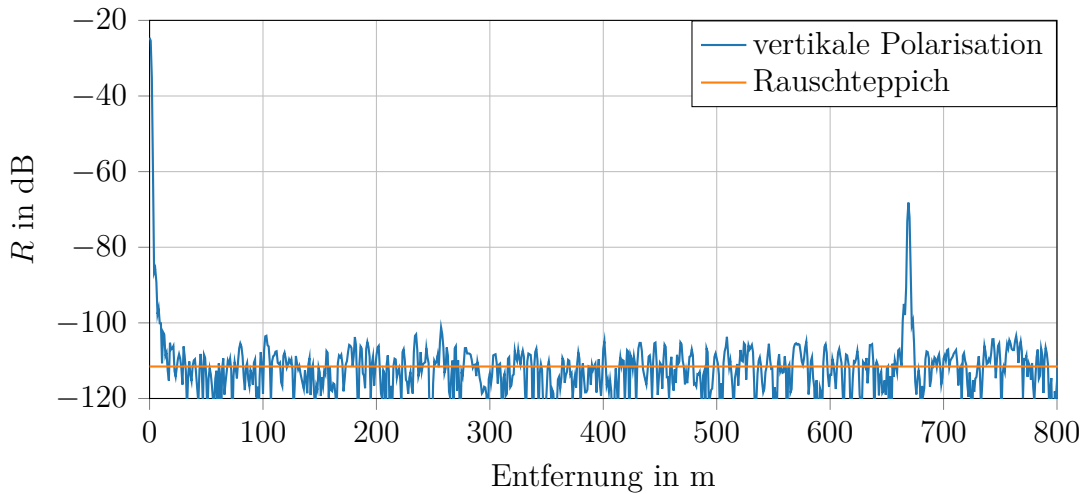
Die Form des Signalvektors vererbt sich auf das Entfernungsprofil  $R \in \mathbb{C}^M$ . Das Entfernungsprofil enthält die Intensität und die Phase der reflektierten Signale, geordnet nach der Entfernung. In der ersten Zelle  $R[0]$  befindet sich die Information über die Reflexionen bei einer Distanz von 0 m, also direkt an der Antenne. Die nächste Zelle  $R[1]$  liefert die Informationen über die Objekte, die sich in einem Abstand von  $\Delta r$  zu dem Radar befinden. Das entspricht allen Reflexionen aus 1 m Entfernung. Die letzte Zelle des Entfernungsprofils  $R[M - 1]$  enthält die Information über die Reflexionen an der Grenze des Eindeutigkeitsbereichs, in unserem Fall 1000 m. Formal lässt sich die Distanz  $r[n]$  einer Zelle im Entfernungsprofil  $R[n]$  wie folgt berechnen:

$$r[n] = n \Delta r , \quad \forall n \in \{0, 1, \dots, M - 1\} \quad (4.23)$$

Abbildung 4.13 zeigt dazu ein gemessenes Entfernungsprofil des Instruments.

In erster Linie interessieren uns bei diesem Experiment die Reflexion in der ersten Zelle, da sie dem Eingangsreflexionsfaktor der Antenne entspricht  $R(0 \text{ m}) = \Gamma$ , sowie die Reflexion in der Zelle von dem Reflektor, da der Betrag dieses Wertes dem Kehrwert der Pfaddämpfung  $R(669 \text{ m}) = A_p^{-1}$  entspricht.





**Abb. 4.13:** Gemessener Verlauf des Entfernungsprofils der Funkstrecke mit der Antenne F bei 38,5 GHz (vertikale Polarisation). Der Eingangsreflexionsfaktor der Antenne befindet sich bei 0 m und die Reflexion des Reflektors bei 669 m. Zusätzlich ist der Rauschteppich bei  $-111,5$  dB eingezeichnet. Die Messung wurde unter optimalen Ausbreitungs-Konditionen durchgeführt.

### 4.3.3 Kalibrierung

Bevor der Netzwerkanalysator für die eigentliche Messaufgabe verwendet werden kann, muss er kalibriert werden. Dabei werden die Systemfehler des Netzwerkanalysators ermittelt um sie später herauszurechnen. Die Referenzebenen für die Kalibrierung liegen bei den äußeren Koaxial-Steckern, welche jeweils über den Hohlleiter-Koax-Adapter mit der Antenne verbunden sind. Dadurch werden auch die Einflüsse der Semi-Rigid Koaxialkabel und der elektromechanischen Schalter herausgerechnet. Somit messen wir die Streuparameter der Antenne direkt an ihren Hohlleiter-Koax-Adaptoren. Da jede Antenne einen eigenen Frequenzbereich hat und über eine eigene Leitung gespeist wird, muss für jede Antenne eine eigene 2-Tor-Kalibrierung durchgeführt werden. Um Drift-Effekte des Netzwerkanalysators zu reduzieren, wird seine Temperatur stabilisiert. Über den Beobachtungszeitraum von einem Jahr wurden dabei keine Drift-Effekte beobachtet.

Für die Kalibrierung wurde ein SOLT-Kalibrier-Kit der Firma Anritsu vom Typ TOSLKF50A-40 verwendet. Da es mit dem Through-Standard des Kalibrier-Kits nicht möglich war, die Ports zu verbinden, wurde für die Through-Messung eine Extraleitung gefertigt. Diese wurde anstelle des Through-Standards verwendet, so dass die Kalibrierung durchgeführt werden konnte.

Die mit der Kalibrierung ermittelten Korrekturterme sind gespeichert und werden beim Start der ShockLine<sup>TM</sup> VNA Software geladen. Somit ist das Instrument nach dem Start des Programms und der Initialisierung auch gleich kalibriert.

Antenne	theoretisch	horizontal			vertikal			$\frac{G_R}{\text{dBi}}$
	$\frac{A_p}{\text{dB}}$	$\frac{A_p}{\text{dB}}$	$\frac{N}{\text{dB}}$	$\frac{D_{\text{meas}}}{\text{dB}}$	$\frac{A_p}{\text{dB}}$	$\frac{N}{\text{dB}}$	$\frac{D_{\text{meas}}}{\text{dB}}$	
A	77,4	78,3	-114,1	35,8	79,9	-115,8	35,9	82,2
B	74,8	75,9	-110,1	34,1	75,5	-115,2	39,7	85,8
C	72,2	73,2	-107,6	34,4	73,3	-112,2	39,0	88,1
D	69,4	71,7	-113,1	41,4	71,2	-115,0	43,8	90,1
E	66,8	67,3	-105,7	38,4	67,5	-110,9	43,4	93,6
F	65,4	67,5	-108,8	41,3	68,2	-111,5	43,4	95,4

**Tab. 4.3:** Kenngrößen des Systems (vgl. [59]): Theoretische und bei optimalen Ausbreitungsbedingungen gemessene Pfaddämpfung  $A_p$  sowie der gemessene Rauschpegel  $N$ . Die Filterbandbreite  $B_{ZF}$  des vektoriellen Netzwerkanalysators beträgt 1000 Hz. Aus den gemessenen Werten  $A_p$  und  $N$  wird der Dynamikbereich  $D_{\text{meas}}$  ermittelt.

### 4.3.4 Dynamikbereich

In diesem Unterabschnitt analysieren wir die Leistungsfähigkeit des Instruments. Dazu werden für die zwölf Messkonfigurationen (sechs Antennen mit jeweils zwei Polarisierungen) die Pfaddämpfung  $A_p$  sowie der Pegel des Rauschteppichs  $N$  unter trockenen Bedingungen ermittelt. Mit den Herstellerangaben aus Tabelle 4.2 und der Linklänge  $d$  können wir mit Gleichung (4.8) die theoretische Pfaddämpfung des Experiments bestimmen und sie mit der gemessenen vergleichen. Tabelle 4.3 zeigt die theoretischen Werte sowie die gemessenen Werte für die Pfaddämpfung  $A_p$ . Des Weiteren wird der gemessene Rauschteppich  $N$  angegeben. Der Rauschteppich wird ermittelt, indem wir im Entfernungsprofil das Signal im Bereich 100 m bis 600 m mitteln. Da in diesem Bereich keine Objekte in das Funkfeld ragen, resultiert der Betrag des Signals in diesem Bereich bloß aus den Rauschprozessen der einzelnen Komponenten, etwa von der Antenne oder vom Netzwerkanalysator.

Die Toleranzen für den Antennengewinn wird mit  $\pm 1$  dB vom Hersteller angegeben. Berücksichtigt man nun, dass der Antennengewinn quadriert in der Gleichung (4.8) vorliegt, führt dies zu einer Streuung bei der theoretischen Pfaddämpfung  $A_p$  von  $\pm 2$  dB.

Wir müssen nun die maximale Regenintensität, die wir mit diesem Aufbau messen können, abschätzen. Dafür benötigen wir die Schwundreserve des Systems, welche dem Dämpfungswert entspricht, bei dem der Peak des Reflektors im Rauschen untergeht. Dieser Dämpfungswert ist die Messdynamik  $D_{\text{meas}}$ , mit der wir die Regenintensität messen können. Wenn wir diese Messdynamik als maximalen Wert für die Dämpfung durch Regen  $A_{\text{rain}}$  verwenden, erhalten wir mit dem Power-Law (siehe Kapitel 2, Gleichung 2.37) die maximale Regenintensität. Die ermittelten Werte für die Messdynamik zeigt Tabelle 4.3 und die maximale Regenintensität liegt dementsprechend, abhängig von Frequenz und Polarisation, zwischen  $120 \text{ mm h}^{-1}$  und  $300 \text{ mm h}^{-1}$ .

### 4.3.5 Temperaturregelung und Wetterbeständigkeit

Da das Instrument über das ganze Jahr permanent betrieben wird, muss es robust gegenüber dem Klima der Umgebung sein.

Die exponierte Lage des Instruments auf einem Masten hat zur Folge, dass im Sommer durch die direkte solare Bestrahlung die Oberflächentemperatur des Instruments höher ist als die Lufttemperatur. Im Winter wiederum kann durch Wind die Oberflächentemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur stark sinken. Hitze und Kälte sind damit große Herausforderungen für die Entwicklung eines feldtauglichen Instruments. Zum einen ist es notwendig, die im Instrument verbauten elektronischen Komponenten vor zu hohen beziehungsweise zu niedrigen Temperaturen zu schützen, da sonst ein Defekt auftreten kann. Zum anderen ist es für die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen wichtig, dass die Temperatur des vektoriellen Netzwerkanalysators über alle Messungen möglichst konstant bleibt.

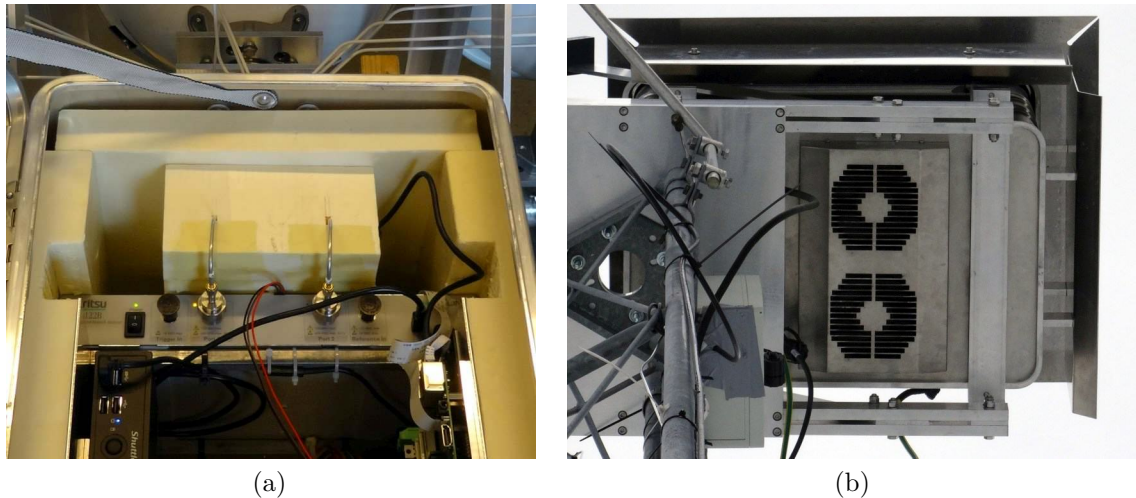
Eine weitere Herausforderung ist die Feuchtigkeit. Die verbauten Baugruppen müssen vor der Feuchtigkeit geschützt werden, da es zum Beispiel durch Kondensation bei fallender Temperatur zu Defekten bei den Komponenten kommen kann.

Auf Grund dieser Rahmenbedingungen sind eine Temperaturregelung und eine Abdichtung für das Instrument notwendig. Beginnen wir mit der Nässe beziehungsweise der Feuchtigkeit. Die Oberseite und die beiden Seitenwände nach Südosten beziehungsweise Südwesten sind mit Schutzschildern aus Aluminium ausgestattet (siehe Abbildung 4.11). Besonders das Dach verhindert, dass sich auf der Oberseite der Kiste Wasser sammeln und so in sie eindringen kann. Die Kiste ist zusätzlich hermetisch dicht und alle Durchbrüche, etwa für die Anschlüsse der Antennen, wurden nachträglich abgedichtet. Die Außenseite des Kühlers erfüllt die Schutzart IP66 und ist zusätzlich an der Unterseite der Kiste montiert, um stehendes Wasser auf dem Kühler zu vermeiden. Um die Antennen vor der Feuchtigkeit zu schützen, sind die zwölf Anschlüsse der Antennen durch Kappen aus PVC und Dichtungselementen vor Nässe gesichert. Der Notwendigkeit der Allwetterfestigkeit geschuldet, ist das gefertigte Gehäuse der Kamera wasserdicht.

Nun beschäftigen wir uns mit der Temperaturstabilisierung des Instruments. Wie schon oben erwähnt, haben die Schutzschilde auch eine Funktion bei dem Temperaturmanagement. Zum einen reflektieren sie durch ihre metallische Oberfläche Teile der solaren Strahlung, zum anderen entsteht durch die Abstandshalter ein Luftspalt zwischen der Kiste und den Schutzschildern, welcher zusätzlich thermisch isoliert.

Die Innenwände der Kiste sind mit 40 mm starken Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) verkleiden, um so die Außenseite der Kiste von ihrem Innenleben zu isolieren. Da durch die Durchführung der zwölf Semi-Rigid Koaxialkabel zu den beiden elektromechanischen Koaxialschaltern eine Kältebrücke entsteht, sind diese mit einer zusätzlichen Kappe aus extrudiertem Polystyrol isoliert (siehe Abbildung 4.14).

Ein thermoelektrische Kühler dient als Wärmepumpe und sorgt für die Stabili-



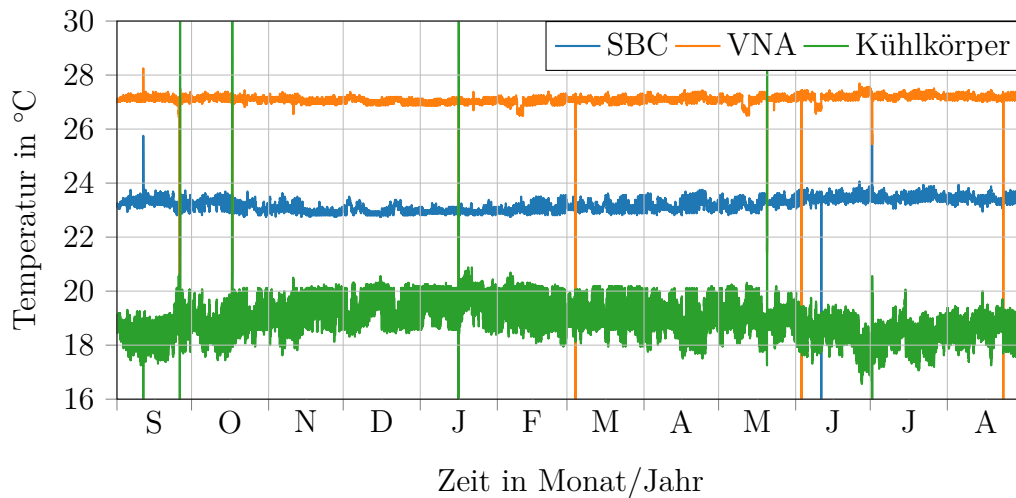
**Abb. 4.14:** (a) Zusätzliche Isolierung der elektromechanischen Koaxialschalter und (b) Kühler des Instruments, von unten betrachtet.

sierung der Temperatur. Der verwendete thermoelektrische Kühler kann zu diesem Zweck sowohl kühlen, also einen Wärmetransport von innen nach außen bewirken, als auch heizen, also einen Wärmetransport von außen nach innen bewirken. Der thermoelektrische Kühler besteht für diese Aufgaben aus zwei Kühlkörpern, für die Außenseite (siehe Abbildung 4.14) und für die Innenseite der Kiste (siehe Abbildung 4.10). Die beiden Kühlkörper haben jeweils zwei Lüfter, um den Wärmetransport zu erhöhen. Besonders die Lüfter des inneren Kühlkörpers sorgen für eine Verteilung des temperierten Luftstroms. Die Kühlkörper sind außerdem durch thermoelektrische Elemente (Peltier-Elemente) verbunden, die den eigentlichen Wärmetransport bewirken.

Eine Temperatursteuerung treibt den thermoelektrischen Kühler, der je nach Notwendigkeit den Innenraum heizt oder kühlt, so dass sich ein thermisches Gleichgewicht im Innenraum einstellt. Da die temperaturempfindliche Komponente der vektorielle Netzwerkanalysator ist, befindet sich dort auch der Temperatursensor der Temperatursteuerung. Somit wird die Temperatur des vektorielle Netzwerkanalysators auf  $23^{\circ}\text{C}$  stabilisiert.

Im Innenraum überwachen drei zusätzliche Thermosensoren vom Typ DS18S20 das Temperaturmanagement. Dazu messen sie die Temperatur des vektoriiellen Netzwerkanalysators, der Interfaceplatine des Einplatinencomputers sowie des Kühlkörpers im Innenraum. Abbildung 4.15 zeigt den Verlauf der gemessenen Temperatur der drei Sensoren über ein Jahr vom 1. September 2018 bis 1. September 2019, jeweils 00:00 Uhr UTC<sup>4</sup>. Der Temperatursensor am vektoriiellen Netzwerkanalysator hat über diesen Zeitraum einen Erwartungswert von  $27,12^{\circ}\text{C}$  mit einer Standardabweichung

<sup>4</sup>englisch: coordinated universal time (koordinierte Weltzeit)



**Abb. 4.15:** Temperaturverlauf der Sensoren im Instrument über ein Jahr, vom 01.09.2018 00:00 Uhr UTC bis 01.09.2019 00:00 Uhr UTC. Etwa alle 17,5s werden die Temperaturen der drei Sensoren ausgelesen. Der Sensor von dem Einplatinencomputer befindet sich auf der Interfaceplatine, der Sensor von dem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) ist direkt an dem VNA angebracht und der dritte Sensor misst die Temperatur an dem inneren Kühlkörper.

von 0,17K. Die Ausreißer in dem Diagramm resultieren aus Stromausfällen (siehe Logdaten in Anhang A).

### 4.3.6 Optische Überwachung der Radome

Zur optischen Überwachung der Antennen mit Fokus auf ihre Radome dient eine Kamera, die oberhalb der Antennen mithilfe eines Auslegers montiert ist (siehe 4.11). Durch diese Kamera wird der Zustand der Radome visuell dokumentiert und die Art der Benetzung kann untersucht werden. Abbildung 4.16 zeigt dazu drei Aufnahmen der Radome mit der internen Kamera unter unterschiedlichen Bedingungen (trocken, benetzt und mit Schnee bedeckt).

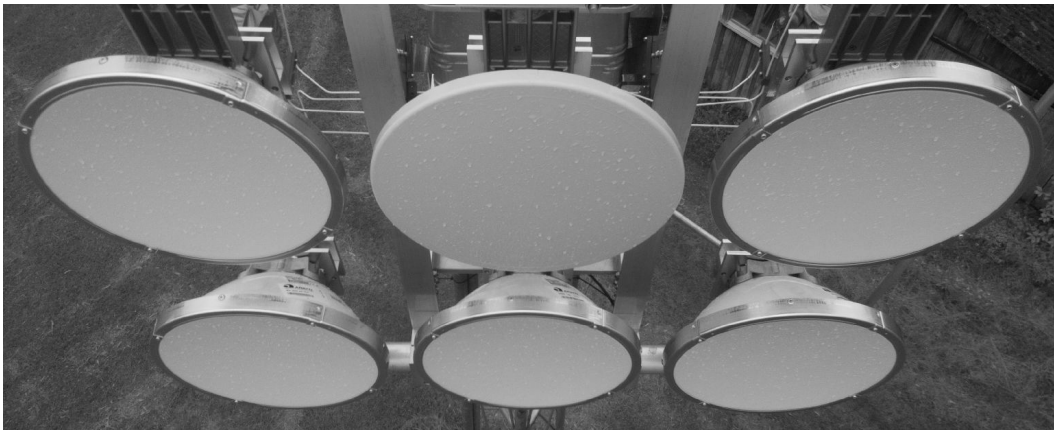
Die Kamera besteht aus einem 8 Megapixel Kameramodul ohne Infrarotfilter und ist direkt mit dem Einplatinencomputer über CSI<sup>5</sup> verbunden. Das Modul ist von 16 Infrarot-LEDs umgeben, die die Radome mit IR-Licht ausleuchten. Da die Kamera keinen Infrarotfilter hat, können so Aufnahmen von den Radomen gemacht werden. Die Infrarot-LEDs werden von dem Einplatinencomputer über die Schnittstellenplatine gesteuert.

Während des Betriebes des Instruments wird alle 60s ein Bild der Radome aufgenommen und gespeichert. Bei der Aufnahme wird auch die IR-Ausleuchtung aktiviert, um so unter allen Lichtbedingungen ein geeignetes Bild der Radome zu bekommen.

<sup>5</sup>englisch: camera serial interface



(a)



(b)



(c)

**Abb. 4.16:** Aufnahmen der internen optischen Überwachung von den Radomen des Instruments: (a) Trocken am 17. Mai 2019, (b) während eines Regenereignisses am 20. Juni 2019 und (c) mit Schnee bedeckt am 03. Februar 2019.

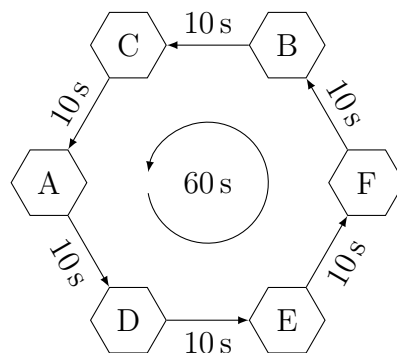
### 4.3.7 Datenerfassung und -speicherung

Dieser Unterabschnitt behandelt die Datenerfassung und -speicherung des Instruments. Unter die Datenerfassung fallen hauptsächlich die Messroutine des vektoriellen Netzwerkanalysators `ATTRRA2_ROUTINE.py`, die Monitoringroutine von den drei Temperatursensoren im Innenraum des Instruments `ATTRRA2_MONITOR.py` sowie die Routine für die Kameraaufnahmen `ATTRRA2_CAM.py`. Diese drei Routinen sind unabhängig voneinander und sind für die jeweilige Datenspeicherung verantwortlich. Aber auch Logdaten werden gespeichert, die zum Beispiel einen Neustart des Systems oder Fehler protokollieren.

Die Routine für die Kamera `ATTRRA2_CAM.py` macht alle 63s eine Aufnahme der Radome als JPEG mit einer Größe von 2 MiB. So fallen in der Woche 9600 Aufnahmen an, mit einer Gesamtgröße von 18,7 GiB. Diese Daten werden auf einer externen Festplatte im Instrument gespeichert. Für eine einfache Handhabung der Daten werden alle Bilder einer Woche in einem Ordner gespeichert.

Die Daten der Temperaturüberwachung des Systems `ATTRRA2_MONITOR.py` werden in einer HDF5-Datei gespeichert. Die Daten bestehen aus einem Zeitstempel in UTC sowie den Temperaturwerten der drei Sensoren (VNA, SBC und innerer Kühlkörper). Jede Woche wird eine neue HDF5-Datei generiert. Eine Datei mit den Messwerten von einer Woche hat eine Größe von etwa 7,9 MiB. Zusätzlich protokolliert diese Routine auch den Neustart des Systems, zum Beispiel nach einem Stromausfall. Dies ist für die anschließende Auswertung der Daten hilfreich, um Anomalien zu erklären. Die Logdatei mit den über ein Jahr protokollierten Einträgen befindet sich in Anhang A.

Die dritte Routine, `ATTRRA2_ROUTINE.py`, initialisiert alle 10s eine neue Messung mit dem vektoriellen Netzwerkanalysator, verarbeitet die gewonnenen Daten und speichert sie in einer HDF5-Datei.



**Abb. 4.17:** Ablauf der Messroutine des Instruments: Alle 10s (inklusive Messzeit) wird eine Antenne horizontal und vertikal vermessen. Nach der Messpause wird eine andere Antenne mit den elektromechanischen Koaxialschaltern ausgewählt und eine neue Messung initialisiert. Innerhalb von 60s werden so alle sechs Antennen, von Antenne A bis Antenne B, vermessen.

## 4 Feldexperiment zur Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts

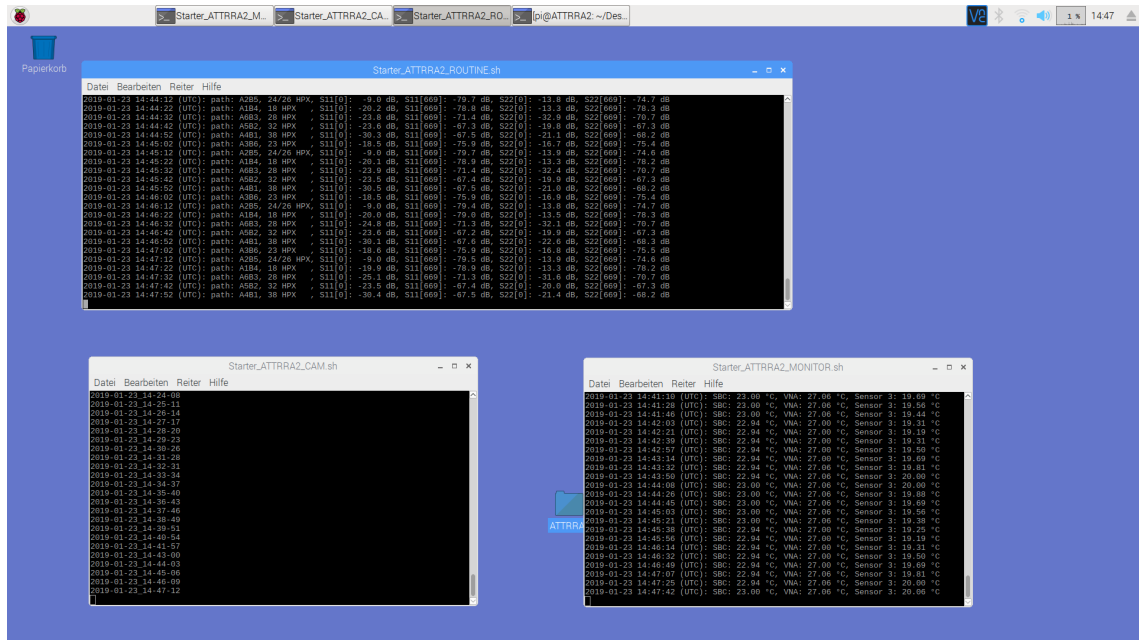
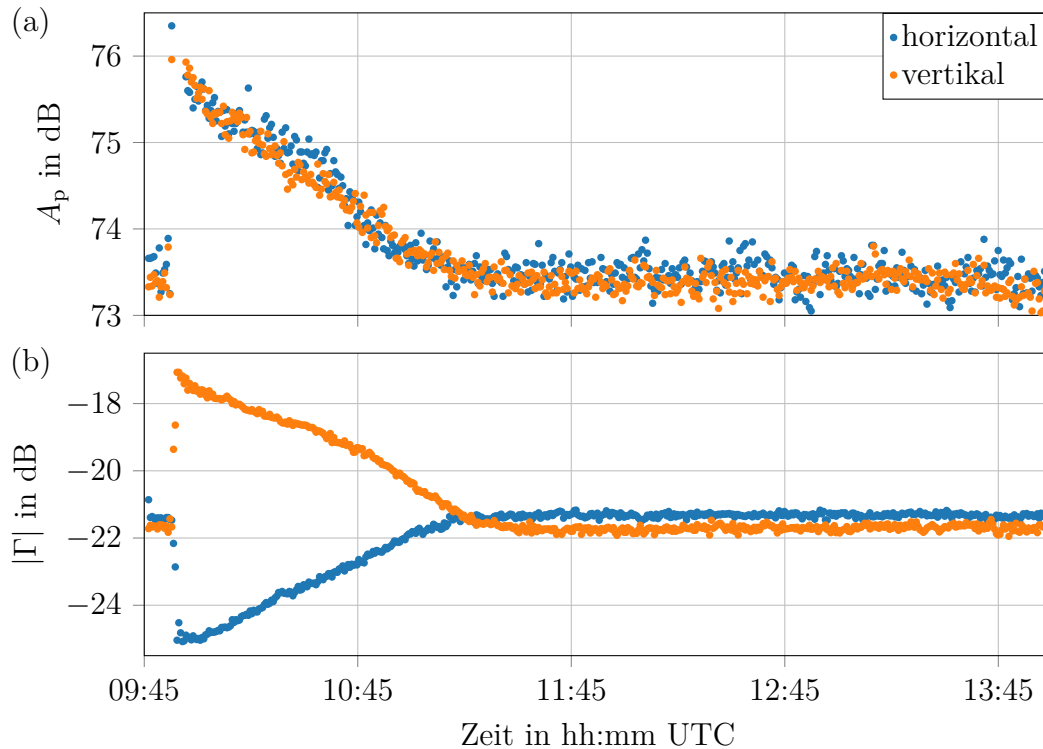


Abb. 4.18: Desktopumgebung unter Linux mit den drei Messroutinen: ATTRRA2\_ROUTINE.py (oben), ATTRRA2\_MONITOR.py (rechts unten) und ATTRRA2\_CAM.py (links unten).

Vor der eigentlichen Vermessung der Antenne verbinden die beiden elektromechanischen Koaxialschalter die gewünschte Antenne mit dem vektoriiellen Netzwerkanalysator. Nach 100 ms Wartezeit je Schalter wird der Netzwerkanalysator in den Modus entsprechend der zu vermessenden Antenne versetzt und eine Einzelmessung gestartet. Die Schaltzeit der elektromechanischen Koaxialschalter beträgt 15 ms. Eine Wartezeit von 100 ms stellt sicher, dass die ausgewählte Antenne auch wirklich mit dem VNA verbunden ist, wenn die Messung beginnt. Anschließend werden die Messdaten gespeichert und die Routine wartet auf die nächste Messung. Abbildung 4.17 illustriert den Ablauf der Messroutine. Alle 60 s wird jede der sechs Antennen vermessen. Dies generiert einen Zeitstempel in UTC sowie die Messvektoren für die vier Streuparameter. Wie schon bei der Datensicherung der Temperatursensoren, so werden auch bei den Messwerten des Netzwerkanalysators die Daten einer Woche in einer Datei gespeichert. So fallen in der Woche rund 3,6 GiB Daten an. Diese Routine protokolliert auch gewisse Zustände wie die korrekte Initialisierung des Systems oder eventuelle Fehlermeldungen wie Verbindungsprobleme zu dem vektoriiellen Netzwerkanalysator und seinem Steuerungscomputer. Anhang B zeigt einen Ausschnitt aus dieser Logdatei.

Abbildung 4.18 zeigt die drei Routinen, wie sie auf dem Einplatinencomputer ausgeführt werden. Jede Routine wird bei einem Neustart von einem eigenen Shell-Script gestartet. Die Routine ATTRRA2\_ROUTINE.py rechnet das Entfernungprofil für beide Polarisationen aus und gibt die Werte für Antenne und Reflektor an.





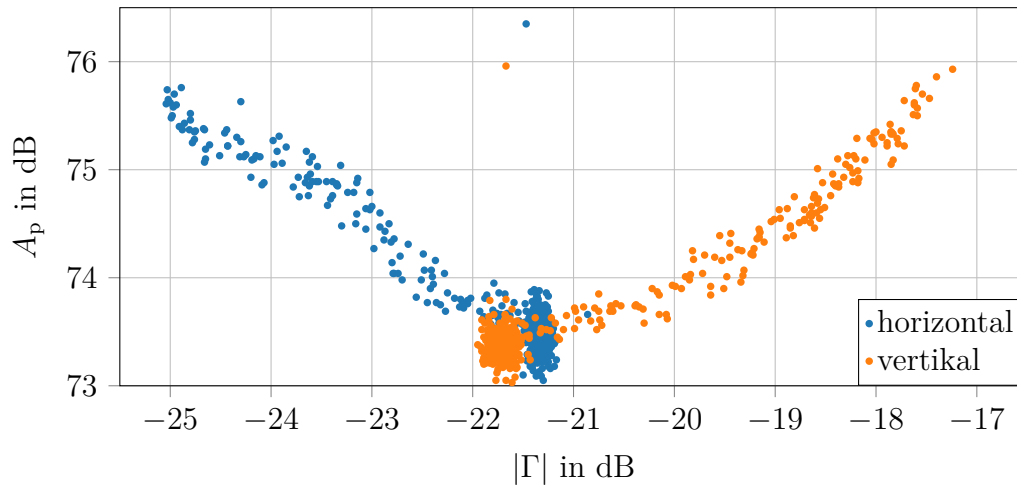
**Abb. 4.19:** Antenne C: Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne.

## 4.4 Messergebnisse

Um zu zeigen, dass das Instrument für die Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts geeignet ist, wurde ein Versuch durchgeführt. Dabei wurden die Radome der Antennen mithilfe eines Drucksprühers mit destilliertem Wasser benetzt. Während des anschließenden Trocknungsprozesses wurden der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  und die Pfaddämpfung  $A_p$  der Antennen mit dem Instrument gemessen. Dieses Experiment fand am 28. August 2018 zwischen 09:45 und 14:00 UTC statt. Da es während des Experiments keinen Niederschlag gab, resultiert die gemessene zusätzliche Pfaddämpfung  $A_{\text{add}}$  nur von dem Wasser auf den Radomen. Das beweist, dass die Änderung der Pfaddämpfung nur vom Wet-Antenna-Effekt rührt. Durch diesen Umstand ist das Experiment auch geeignet, um die Erkenntnisse aus Kapitel 3 zu überprüfen. Auch dort kann die Dämpfung nur von der Nässe auf dem Radom kommen.

Für dieses Experiment wurde auch die Messrate erhöht, so dass alle 5 s eine Antenne vermessen wurde und in 60 s jede der sechs Antennen folglich zweimal vermessen wurde. Die Resultate dazu befinden sich in Anhang C.

Diese ersten Messergebnisse zeigen, dass das Instrument für die Untersuchung



**Abb. 4.20:** Antenne C: Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$  (gleicher Datensatz wie in Abbildung 4.19). Die Punktwolken im Bereich  $-22 \text{ dB} < |\Gamma| < -21 \text{ dB}$  zeigen die Performanz im abgetrockneten Fall.

des Wet-Antenna-Effekts geeignet ist. Des Weiteren decken sich die Beobachtungen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Simulation und der Nahfeldmessung aus dem Kapitel 3. Ebenso hat sich der Ansatz bewährt, den Eingangsreflexionsfaktor einer Antenne als Indikator zu verwenden, denn auch dieser Versuch hat bestätigt, dass Wasser auf dem Radom den Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$  verändert. Wie sich hingegen der Indikator in Abhängigkeit von der Nässe genau verhält, ob sich also die Anpassung der Antenne mit steigender Wet-Antenna-Dämpfung verbessert oder verschlechtert, kann nicht allgemein beantwortet werden. So hat sich beispielsweise bei der Antenne C (siehe Abbildung 4.19) bei der vertikalen Polarisierung die Anpassung mit sinkender Wet-Antenna-Dämpfung verbessert und der Eingangsreflexionsfaktor wurde kleiner. Dieses Verhalten wurde auch in Kapitel 3 beobachtet. Bei der horizontalen Polarisierung hingegen verschlechterte sich die Anpassung der Antenne mit sinkender Wet-Antenna-Dämpfung. Bei der Antenne mit der höchsten Betriebsfrequenz (Antenne F) verbesserte sich die Anpassung während des Trocknungsprozesses (sinkende Wet-Antenna-Dämpfung) zuerst und verschlechterte sich dann wieder (siehe Anhang C.6). Dieser Verlauf ist ein Indiz dafür, dass es bei einer gewissen Schichtdicke der Benetzung auf dem Radom zu einer Resonanz kommt.

Betrachten wir nun die Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion vom Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ . Abbildung 4.20 zeigt diesen Verlauf für Antenne C und wir erkennen dort die Abhängigkeit zwischen der Pfaddämpfung und dem Eingangsreflexionsfaktor. Da die Änderung der Pfaddämpfung die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  ist, können wir schlussfolgern, dass die Wet-Antenna-Dämpfung vom Eingangsreflexionsfaktor abhängt. Die Art dieser Abhängigkeit, ob der Eingangsreflexionsfaktor mit der Wet-Antenna-Dämpfung also steigt oder sinkt, ist von Antenne zu Antenne unterschiedlich.

Sogar bei derselben Antenne kann die Abhängigkeit von Polarisation zu Polarisation unterschiedlich ausfallen.

## 4.5 Langzeit-Messungen

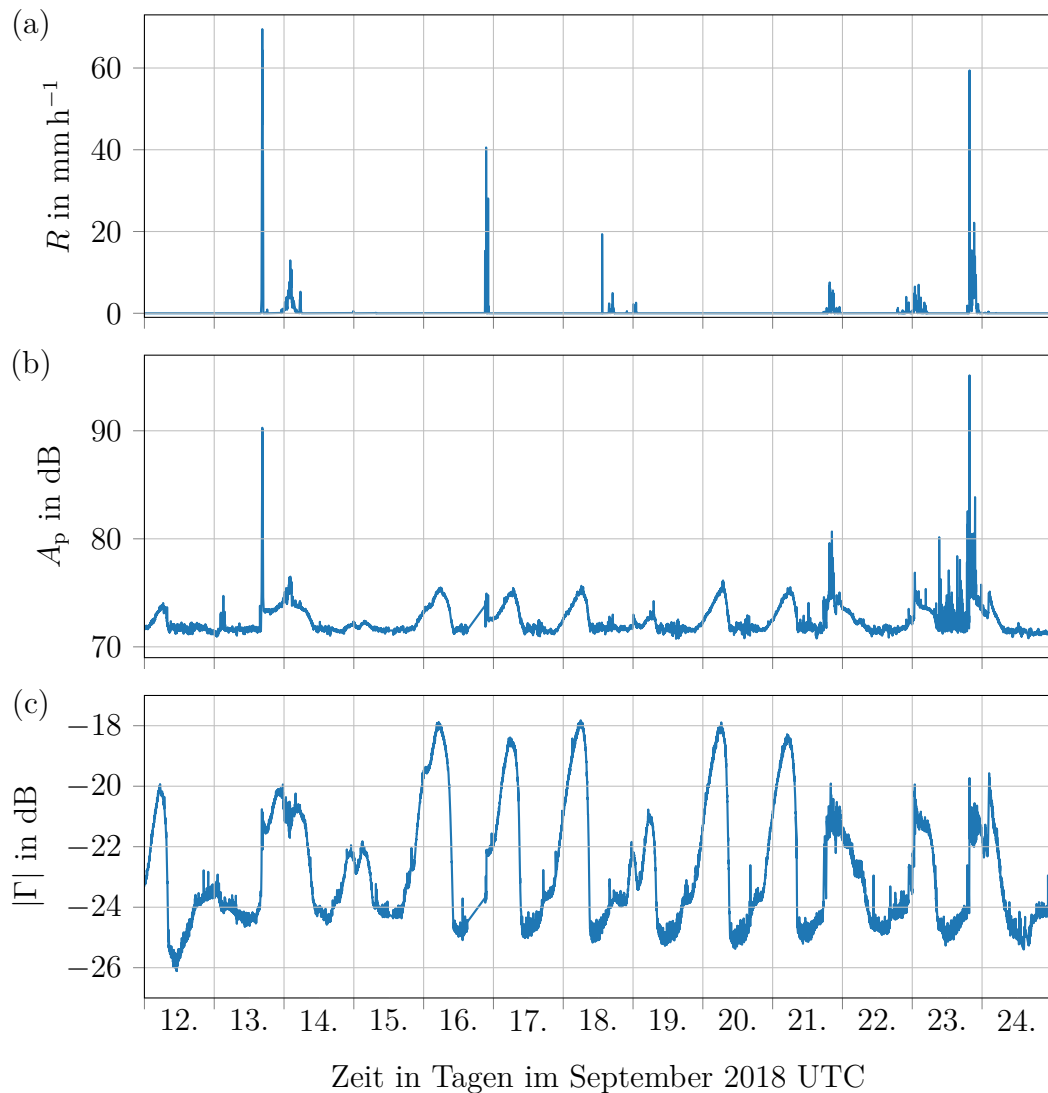
Nun betrachten wir die Messergebnisse des Instruments unter realen Konditionen, also unter dem Einfluss von echten meteorologischen Phänomenen. Außerdem werden in diesem Abschnitt Messreihen über einen längere Zeitspanne präsentiert.

Abbildung 4.21 zeigt den Verlauf der Regenintensität, gemessen mit dem Distrometer 1 sowie die Pfaddämpfung  $A_p$  und den Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ . Die dargestellten Ergebnisse sind die Messwerte von der Antenne D (28,5 GHz) mit der horizontalen Polarisation. In dem abgebildetem Zeitraum von 13 Tagen vom 12. September 00:00 UTC bis 25. September 00:00 UTC gab es unterschiedliche Wetterlagen. Anhang D enthält für den obigen Zeitraum die Ergebnisse für alle sechs Antennen.

Zum einen gab es im Beobachtungszeitraum einige Regenereignisse (siehe Regenintensität  $R$  in Abbildung 4.21), zum anderen auch Tage, an denen sich Tau auf den Radomen bilden konnte.

Betrachten wir zum Beispiel die Tau-Bildung am 20. September. Von den Distrometern wissen wir, dass es währenddessen nicht geregnet hat. Somit verursacht die Benetzung des Radoms den Anstieg der Pfaddämpfung  $A_p$ . Die Pfaddämpfung im trockenen Fall beträgt bei der Antenne D (horizontale Polarisation) 71,7 dB (vgl. Tabelle 4.3). Bei diesem Tau-Ereignis hat die Pfaddämpfung ein Maximum bei 76,2 dB. Die Differenz zwischen den beiden Werten ergibt dementsprechend die maximale Dämpfung durch den Wet-Antenna-Effekt und entspricht hier 4,5 dB. Da die Wet-Antenna-Dämpfung in der Leistungsbetrachtung zweimal berücksichtigt werden muss, einmal für den Sendefall und einmal für den Empfangsfall, erhalten wir für die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA} = 2,2$  dB. Mit der Tau-Bildung und dem Anstieg der Pfaddämpfung  $A_p$  verändert sich auch der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ . Wie schon in dem Versuch in Abschnitt 4.4, zeigt sich auch hier, dass zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  und dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  eine Korrelation besteht.

Nun betrachten wir den Wet-Antenna-Effekt nach einem Regenereignis am späten Nachmittag des 13. Septembers. Am Anfang des Regenereignisses steigt der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  sprunghaft an. Die Pfaddämpfung bleibt nach dem Regenereignis konstant, da die Radome mit Wasser benetzt sind und nicht abtrocknen. Auch auf den Aufnahmen der Kamera erkennt man, dass sich die Tropfenmuster auf den Radomen nach 16:50 UTC nicht mehr ändern. Um 17:00 UTC beträgt die Pfaddämpfung 73,4 dB. Somit errechnet sich eine Wet-Antenna-Dämpfung von  $A_{WA} = 0,9$  dB nach dem Regenereignis. Der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  sinkt erst am nächsten Tag, als das Radom wieder trocken ist, auf das Niveau von vor dem Regenereignis.



**Abb. 4.21:** Verlauf der Messergebnisse bei 28,5 GHz (Antenne D), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$ , gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

Zusammenfassend ist das Instrument auch für Langzeitbeobachtungen der Pfaddämpfung  $A_p$  und des Eingangsreflexionsfaktors  $\Gamma$  geeignet. Die Messergebnisse zeigen eine Korrelation zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  und dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  und bestätigen die Beobachtungen in Kapitel 3 sowie den ersten Versuch in Abschnitt 4.4.

Vor allem bei den Tau-Ereignissen sehen wir eine starke Änderung des Eingangsreflexionsfaktors  $\Gamma$  sowie eine starke Korrelation zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung

$A_{WA}$  und dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ .

Schlussendlich ist der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  deshalb ein geeigneter Indikator zum Detektieren des Wet-Antenna-Effekts.



## 5 Entwicklung eines Wet-Antenna-Korrekturverfahrens

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Detektion und der Korrektur des Wet-Antenna-Effekts bei Richtfunkstrecken anhand des Eingangsreflexionsfaktors. Dazu betrachten wir als erstes das Zusammenspiel zwischen der Pfaddämpfung, dem Wet-Antenna-Effekt und dem Eingangsreflexionsfaktor der Antenne. Basierend auf diesen Betrachtungen wird die ideale Wet-Antenna-Korrekturfunktion eingeführt. Anschließend wird die Methodik vorgestellt, mit der die Performanz der Korrekturverfahren mithilfe von meteorologischen Instrumenten ermittelt wird. Die Pfaddämpfungswerte sowie die dazugehörigen Eingangsreflexionsfaktor, die in diesem Kapitel verwendet werden, stammen von dem Feldexperiment. Ausgehend von einem Baseline-Verfahren wird die Vergleichsgrundlage für die folgenden Korrekturverfahren geschaffen. Daraufhin wird ein Korrekturverfahren präsentiert, welches den Einfluss des Wet-Antenna-Effekts anhand des Betrags des Eingangsreflexionsfaktors abschätzt. Danach wird dieses Korrekturverfahren erweitert, damit der komplexe Wert des Eingangsreflexionsfaktors für die Wet-Antenna-Korrektur verwendet werden kann. Im Anschluss werden die beiden Korrekturverfahren mit den Resultaten des Baseline-Verfahrens und den Messergebnissen der meteorologischen Instrumente gegenüber gestellt und deren Performanz anhand der Korrelation diskutiert.

### 5.1 Eingangsreflexionsfaktor und Wet-Antenna-Dämpfung

Von der Simulation und der Messung einer benetzten Hornantenne (siehe Kapitel 3) wissen wir, dass Nässe auf der Antennenoberfläche alle drei Antennenparameter Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ , Richtfaktor  $D$  und Antennenwirkungsgrad  $\eta$  beeinflusst. Des Weiteren bestätigt das Feldexperiment unter realen Umweltbedingungen, dass der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  sensitiv auf die Benetzung der Antennenabdeckung reagiert (siehe Kapitel 4). Die bisherigen Erkenntnisse in dieser Arbeit haben gezeigt, dass der Einfluss des Eingangsreflexionsfaktors den geringsten Anteil an dem Wet-Antenna-Effekt hat. Dennoch kann man ihn als Indikator für den Wet-Antenna-Effekt verwenden, da er von den drei Parametern der Einzige ist, den man direkt in situ bei einer Antenne messen kann. Diese Messung ist darüber hinaus bei zukünftigen Richtfunkssystemen mit geringem Hardware-Aufwand realisierbar. Durch solch eine

Messung erhält man den Einfluss des Wet-Antenna-Effekts auf den Eingangsreflexionsfaktor und kann diesen direkt bestimmen.

Eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass man von dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  auf die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  schließen kann. Betrachtet man die Wet-Antenna-Dämpfung als Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor, zeigt sich meist, dass man von dem einen Wert auf den anderen Wert schließen kann, so dass der Eingangsreflexionsfaktor ein tauglicher Indikator ist.

Die Pfaddämpfung  $A_p$  des Feldexperiments können wir laut Gleichung (4.8) mit der Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$  aus Gleichung (3.14) wie folgt schreiben:

$$A_p = \frac{A_{\text{free}}^2 A_{\text{rain}}^2 A_{WA}^2}{G_{\text{dry}}^2 G_R (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)^2} \quad \text{mit} \quad A_{WA} = \frac{G_{\text{dry}} (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)}{G (1 - |\Gamma|^2)} \quad (5.1)$$

Da das Feldexperiment monostatisch aufgebaut ist, kommen alle Terme bis auf den Reflektorgewinn  $G_R$  und die Pfaddämpfung  $A_p$  quadriert vor. Somit handelt es sich zum Beispiel bei  $A_{\text{free}}$  um die Freiraumdämpfung für eine Strecke (Instrument zu Reflektor). Zu berücksichtigen ist, dass wir in diesem Kapitel die beiden Antennenparameter Richtfaktor  $D$  und Antennenwirkungsgrad  $\eta$  zum Antennengewinn  $G = \eta D$  zusammenfassen, da bei dem Feldexperiment die einzelnen Anteile von  $D$  und von  $\eta$  nicht separat gemessen werden können.

Eine Korrektur basierend auf dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  kann folgendermaßen erfolgen:

$$A_{\text{rain}}^2 = \frac{A_p}{f_{\text{corr}}(\Gamma)} \quad (5.2)$$

Dabei berücksichtigt die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  nicht nur die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$ , sondern auch die Pfaddämpfung im trockenen Fall.

Analytisch betrachtet hat die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  somit die Form:

$$f_{\text{corr}}(\Gamma) = \frac{A_{\text{free}}^2 A_{WA}^2}{G_{\text{dry}}^2 G_R (1 - |\Gamma_{\text{dry}}|^2)^2} \quad (5.3)$$

Im Idealfall sind alle Parameter, bis auf die Wet-Antenna-Dämpfung  $A_{WA}$ , konstant.

In der Realität unterliegen diese Parameter jedoch gewissen Schwankungen über die Zeit, wie sie zum Beispiel durch Alterungsprozesse der Richtfunkstrecke hervorgerufen werden. Diese Degeneration über die Zeit kommt davon, dass sich bei den Antennen die Ausrichtung ändert und so die Hauptstrahlrichtung der Antenne nicht mehr auf das gewünschte Ziel weist. Beim Feldexperiment ist der Reflektor das Ziel, bei einer Richtfunkstrecke die gegenüberliegende Empfangsantenne. Die Ursache dieser Änderungen liegt zum Beispiel in den Schraubverbindungen, die sich durch Vibrationen oder durch Temperaturschwankungen lösen, so dass sich die Ausrichtung ändert.

Für die Wet-Antenna-Korrektur ist es das Ziel, eine Näherung zu finden, bei der die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  nur vom Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  abhängig ist.



## 5.2 Bewertung der Performanz

Um das Potenzial eines Korrekturverfahrens zu bewerten, werden die meteorologischen Messdaten als Referenz herangezogen. Wie schon in Kapitel 4 beschrieben, gibt es drei Messinstrumente auf dem Messgelände (Distrometer 1, Distrometer 2 und die Wetterstation), die die Regenintensität  $R$  messen.

Eine etablierte Methode zum quantitativen Bewerten zweier Messverfahren ist das Ermitteln des Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation). Dabei wird der lineare Zusammenhang zwischen zwei Messgrößen bestimmt. In dieser Arbeit wird der lineare Zusammenhang zwischen der Regenintensitätsmessung mit dem Feldexperiment und der Regenintensitätsmessung mit einem der drei meteorologischen Instrumente bestimmt.

Für den Vergleich von Regenintensitäten wird der Korrelationskoeffizient  $r_{X,Y}$  wie folgt berechnet:

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (R_X[i] - \bar{R}_X) (R_Y[i] - \bar{R}_Y)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (R_X[i] - \bar{R}_X)^2 \sum_{i=0}^{n-1} (R_Y[i] - \bar{R}_Y)^2}} \quad (5.4)$$

Dabei ist  $R_X$  die Messwertreihe des Instruments X und  $R_Y$  die Messwertreihe des Instruments Y.  $\bar{R}_X$  und  $\bar{R}_Y$  sind die arithmetischen Mittelwerte der jeweiligen Messwertreihen. Beide Reihen haben die Länge  $n$ . Da die Abtastzeitpunkte unter Umständen bei den zu vergleichenden Instrumenten nicht dieselben sind, muss die Datenreihe des Instruments Y vor der Berechnung des Korrelationskoeffizienten an die Datenreihe des Instruments X angepasst werden. Bei diesem Resampling erhält man eine Datenreihe von Instrument Y mit denselben Abtastzeitpunkten wie bei Instrument X. In dieser Arbeit wird das Resampling durch die lineare Interpolation realisiert. Nach der Konvertierung wird mit der Gleichung (5.4) der Korrelationskoeffizient  $r_{X,Y}$  zwischen der Regenintensität  $R_X$  des Instruments X und der Regenintensität  $R_Y$  des Instruments Y berechnet.

Der Korrelationskoeffizient hat einen Wertebereich von  $r_{X,Y} \in [-1, 1]$ . Bei einem Korrelationskoeffizienten von  $r_{X,Y} = 1$  sind die beiden Datenreihen  $R_X$  und  $R_Y$  vollständig korreliert. Ein Wert von  $r_{X,Y} = 0$  wiederum sagt aus, dass die beiden Datenreihen  $R_X$  und  $R_Y$  unkorreliert sind.

Für die Bewertung der Messinstrumente heißt dies, dass bei einem Korrelationskoeffizienten von  $r_{X,Y} = 1$  die beiden Instrumente dieselbe Regenintensität messen. Dieser Aussage geht die Annahme voraus, dass aufgrund des geringen Abstands zwischen den vier Instrumenten die gleichen Regenintensitäten vorherrschen, da es sich um dieselbe Erscheinung des Phänomens handelt.

Nach dieser Bewertung ist es Ziel eines Korrekturverfahrens, einen möglichst hohen Korrelationskoeffizienten zu erhalten.

Der Korrelationskoeffizient  $r_{F,D1}$  beschreibt die Korrelation zwischen der gemessenen Regenintensität des Feldexperiments und der gemessenen Regenintensität des

Distrometers 1. Der Korrelationskoeffizient  $r_{D2,W}$  beschreibt respektive die Korrelation zwischen der gemessenen Regenintensität des Distrometers 2 und der gemessenen Regenintensität der Wetterstation.

### 5.3 Regenintensität ohne Wet-Antenna-Korrektur

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie aus der Pfaddämpfung  $A_p$  ohne Wet-Antenna-Korrektur die Regenintensität ermittelt wird. Dieses Verfahren dient später als Vergleich für die anderen Korrekturverfahren, welche auf dem Eingangsreflexionsfaktor basieren.

In Kapitel 2 wurde das grundlegende Verfahren vorgestellt, wie man die Regenintensität anhand der Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  berechnet. Das Feldexperiment liefert die Pfaddämpfung  $A_p$  über die Zeit und die Pfaddämpfung abzüglich der Pfaddämpfung im trockenen Fall liefert die zusätzliche Dämpfung. Hier nehmen wir an, dass die ganze zusätzliche Dämpfung durch den Regen verursacht wird und so gleich  $A_{\text{rain}}$  ist. Einflüsse wie die Dämpfung durch Gase werden hier vernachlässigt.

Im trockenen Fall hat die Pfaddämpfung den geringsten Wert, erfährt aber über die Zeit einen Alterungsprozess (siehe 5.1), der zu einem Anstieg der Dämpfung führen kann. Diese Grunddämpfung der Richtfunkstrecke lässt sich mit einer Baseline darstellen. Diese Baseline bildet des Weiteren Schwankungen über die Zeit ab, wie sie zum Beispiel durch die oben beschriebenen Alterungsprozesse hervorgerufen werden.

Abbildung 5.1 zeigt zum einen die Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von der Zeit und die dazugehörige Baseline sowie die durch die Pfaddämpfung ermittelte Regenintensität des Feldexperiments und zum anderen die gemessene Regenintensität des Distrometers 1.

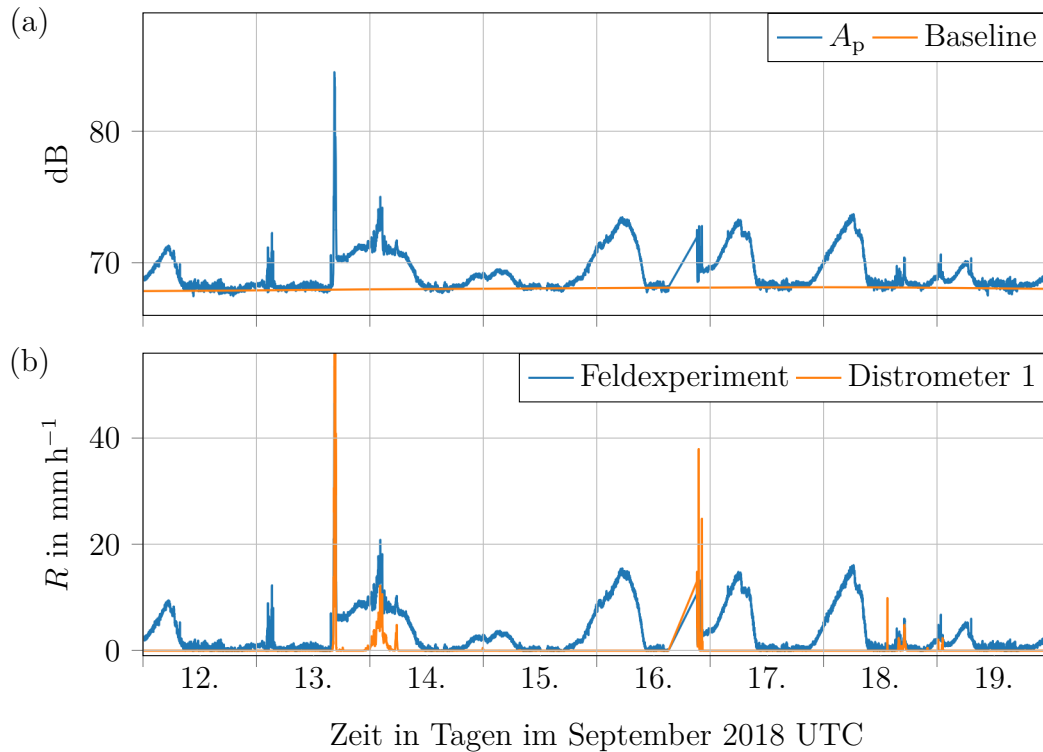
In dieser Arbeit wird die Baseline mithilfe dem Asymmetric-Least-Squares-Smoothing (siehe [69]) in der Dezibel-Domäne ermittelt. Die empirisch ermittelten Algorithmus-Parameter sind  $p = 0,0025$  für die Asymmetrie und  $\lambda = 1 \cdot 10^{11}$  für die Glättung. Der Algorithmus wird nach 10 Iterationen beendet.

Die Dämpfungswerte der Pfaddämpfung  $A_p$ , die über die Baseline hinausgehen, sind zusätzliche Dämpfungen und werden der Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  zugeschrieben:

$$A_{\text{rain}}^2 = \frac{A_p}{\text{Baseline}} \quad (5.5)$$

Ermittelte Werte von  $A_{\text{rain}}$ , die kleiner als 0 dB sind, werden auf 0 dB gesetzt. Basierend auf dieser Dämpfung  $A_{\text{rain}}$  wird mithilfe des Power-Laws (siehe Unterabschnitt 2.5.1) die Regenintensität  $R$  berechnet.

Man kann gut erkennen, wie die Dämpfung durch den Tau oder durch die benetzte Antenne nach einem Regenereignis zu einem Fehler der ermittelten Regenintensität führt. Der Wet-Antenna-Effekt trägt maßgeblich zu einer Überschätzung der Regenintensität bei. Der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts nach einem Regenereignis

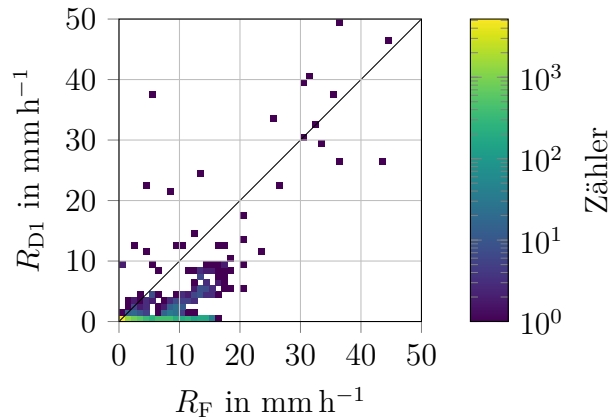


**Abb. 5.1:** (a) Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  bei 34,8 GHz (Antenne E) mit horizontaler Polarisation und der Baseline als Funktion der Zeit in einem Beobachtungszeitraum von acht Tagen. (b) Regenintensität, einmal gemessen mit dem Distrometer 1, sowie einmal ermittelt vom Schwund. Am Nachmittag des 13. Septembers kann man ein Regenereignis mit anschließender Benetzung der Antenne gut erkennen. Im Zeitraum vom 15. September nachts bis zum 16. mittags kann man den Verlauf eines Tau-Ereignisses beobachten.

lässt sich besonders gut in der Nacht vom 13. auf den 14. September 2018 beobachten. Des Weiteren erkennt man, dass Tau auf der Antenne zu einem stärkeren Wet-Antenna-Effekt führen kann, als die Benetzung nach einem Regenereignis.

Vergleicht man in dem betrachteten Zeitbereich die Regenintensität des Feldexperiments mit der Regenintensität des Distrometers 1, erhält man einen Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1} = 0,424$ .

Abbildung 5.2 zeigt das zweidimensionale Histogramm von der mit dem Distrometer gemessene Regenintensität  $R_{D1}$  und der korrespondierenden unkorrigierten Regenintensität  $R_F$ , gemessen mit dem Feldexperiment. Im Idealfall, wenn die Werte, die mit dem Feldexperiment ermittelt werden, den Werten entsprechen, die mit dem Distrometer gemessen werden, befinden sich alle Punkte auf der 1-zu-1-Gerade. Bei den hier gezeigten unkorrigierten Werten befinden sich die meisten Punkte hingegen unterhalb dieser Gerade. Das heißt wiederum, dass die Regenintensität mit dieser Methode tendenziell überschätzt wird. Vor allem die zu der Regenintensität  $R_{D1} = 0 \text{ mm h}^{-1}$  korrespondierenden Werte für  $R_F$  weichen teilweise sehr stark von  $0 \text{ mm h}^{-1}$  ab. Dies



**Abb. 5.2:** Zweidimensionales Histogramm mit der mit dem Distrometer 1 gemessenen Regenintensität  $R_{D1}$  und der unkorrigierte Regenintensität  $R_F$ . Die Häufigkeit wird logarithmisch farbig kodiert. Man erkennt, dass die Regenintensität von dem Feldexperiment überschätzt wird. Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Regenintensitäten beträgt  $r_{F,D1} = 0,424$ .

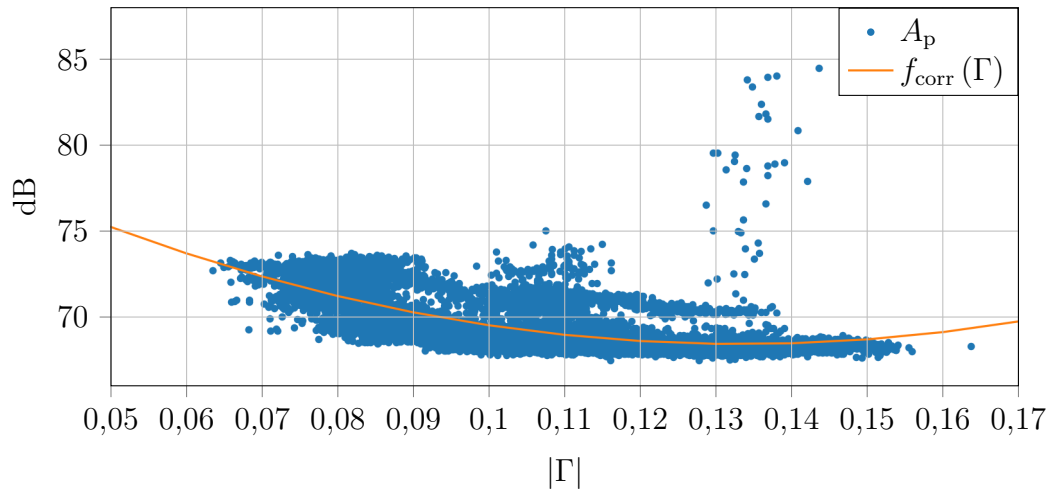
liegt vor allem daran, dass während der Tau-Ereignisse die Pfaddämpfung  $A_p$  steigt und diese zusätzliche Dämpfung als Niederschlag interpretiert wird, obwohl es keinen Niederschlag gibt. Es ist naheliegend, dass die Abweichung zwischen den beiden Regenintensitäten  $R_{D1}$  und  $R_F$  in dem Cluster  $0 \text{ mm h}^{-1} < R_{D1} < 10 \text{ mm h}^{-1}$  vom Wet-Antenna-Effekt kommt, wie er bei einer benetzten Antenne nach und während eines Regenereignisses auftritt.

## 5.4 Regenintensität mit skalarer Wet-Antenna-Korrektur

Bei der skalaren Korrektur ist die Korrekturfunktion abhängig vom Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ . Das Feldexperiment ermittelt nebst der Pfaddämpfung  $A_p$  auch den komplexen Wert des Eingangsreflexionsfaktors  $\Gamma$ . Bei der skalaren Korrektur wird aber nur der Betrag des Eingangsreflexionsfaktors verwendet.

In Kapitel 4 wurde das Verhalten zwischen der Pfaddämpfung und dem Eingangsreflexionsfaktor mit dem Wet-Antenna-Effekt schon erörtert. Abbildung 5.3 zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion vom Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  über denselben achttägigen Beobachtungszeitraum, wie in Abschnitt 5.3.

Die Idee hinter der Korrektur ist zum einen, dass der Eingangsreflexionsfaktor sensitiv auf die Benetzung der Antenne ist und zum anderen, dass die Dämpfung durch den Regen innerhalb eines Zeitraums kurzzeitig auftritt im Vergleich zum Wet-Antenna-Effekt, da es Zeit braucht, bis die Antenne abtrocknet. Nach dieser Idee beschreibt eine Regressionsanalyse zu der Datenwolke die Dämpfung  $A_p$  als Funktion von  $\Gamma$  ohne die Dämpfungsanteile des Regens  $A_{\text{rain}}$ . Da die Datenpunkte



**Abb. 5.3:** Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von dem Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , gemessen bei 34,8 GHz (Antenne E) mit horizontaler Polarisation über denselben Zeitraum von acht Tagen, wie in Abbildung 5.1. Die Parameter  $[k_0, k_1, k_2] = [85,85 \text{ dB}, -261,3 \text{ dB}, 979,6 \text{ dB}]$  für die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$  wurden durch Ausgleichsrechnung ermittelt.

mit Dämpfungsanteilen von Regen in geringerer Zahl vorkommen, haben sie bei der Regressionsanalyse einen geringen Einfluss auf die Funktion. Nach Gleichung (5.2) ist eine solche Regressionsanalyse gleich der Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$

Für die Wet-Antenna-Korrekturfunktion wird hier ein Polynom zweiten Grades verwendet:

$$10 \log_{10}(f_{\text{corr}}(|\Gamma|)) \text{ dB} = k_0 + k_1 |\Gamma| + k_2 |\Gamma|^2 \quad (5.6)$$

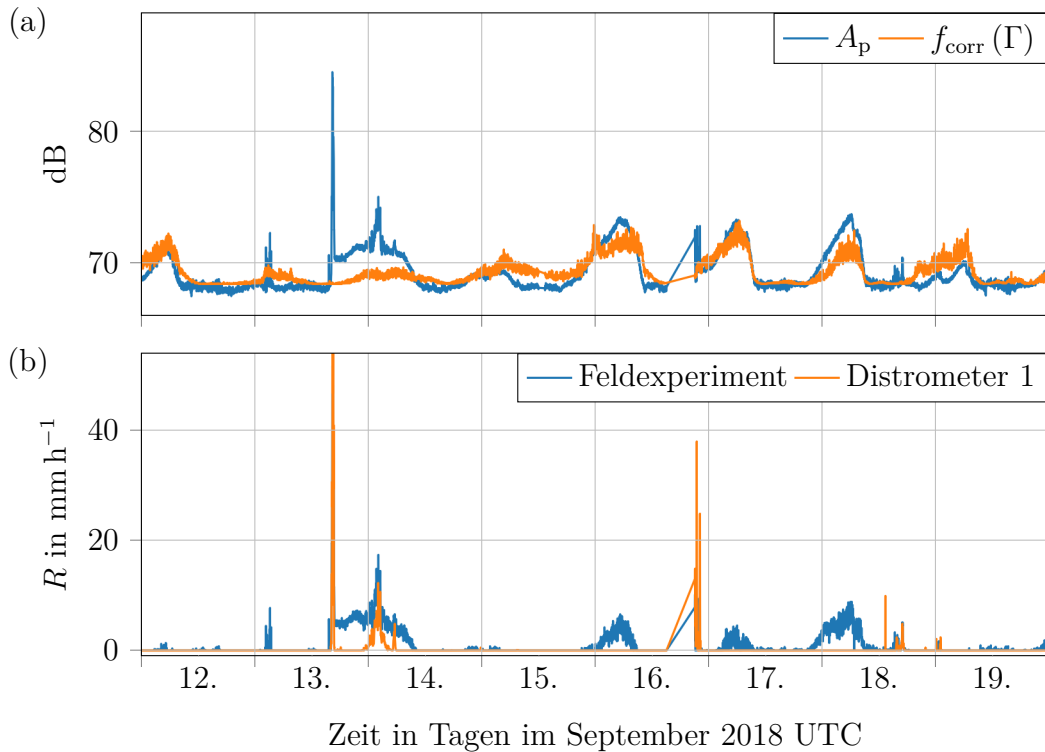
Die drei Parameter  $[k_0, k_1, k_2]$  werden durch Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) ermittelt, indem die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$  an die Datenwolke  $A_p(|\Gamma|)$  in der Dezibel-Domäne angepasst wird. Die Einheit der Parameter ist dB.

Die Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  wird ähnlich berechnet, wie bei dem Verfahren mit der Baseline, nur dass anstelle der Baseline die Korrekturfunktion verwendet wird:

$$A_{\text{rain}}^2 = \frac{A_p}{f_{\text{corr}}(|\Gamma|)} \quad (5.7)$$

Auch hier werden die Werte von  $A_{\text{rain}}$ , die kleiner als 0 dB sind, auf 0 dB gesetzt, bevor die Regenintensität mithilfe des Power-Laws ermittelt wird.

Abbildung 5.4 zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von der Zeit und die dazugehörige Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$ , sowie die ermittelte Regenintensität des Feldexperiments und die gemessene Regenintensität des Distrometers 1. Vor allem bei den Tau-Ereignissen kann man gut erkennen, wie die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$  den Einfluss des Taus auf der Antenne berücksichtigt. Vergleicht man

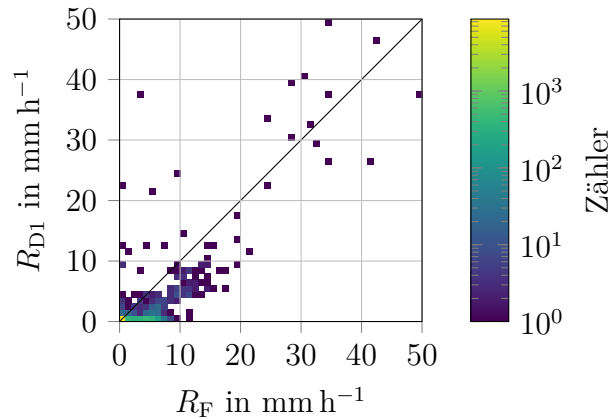


**Abb. 5.4:** (a) Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  bei 34,8 GHz (Antenne E) mit horizontaler Polarisation und der Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$  (basierend auf dem Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ ) als Funktion von der Zeit in einem Beobachtungszeitraum von acht Tagen. (b) Regenintensität, einmal gemessen mit dem Distrometer 1, sowie einmal ermittelt aus dem Schwund.

die ermittelte Regenintensität mit der skalaren Korrektur (Abbildung 5.4) mit der Regenintensität ohne Korrektur (Abbildung 5.1), reduziert sich die Überschätzung der Regenintensität.

In dem beobachteten Zeitraum sind im Vergleich zu den Regenereignissen viele Tau-Ereignisse. Dies hat zur Folge, dass durch die Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(|\Gamma|)$  vor allem der Einfluss der Tau-Ereignisse berücksichtigt wird. In Abbildung 5.3, erkennt man, dass sich 2 dB oberhalb der Korrekturfunktion ein länglicher Cluster befindet. Dieser Cluster rührt von der Benetzung der Antenne während und nach dem Regenereignis in der Nacht vom 13. zum 14. September. Dieser Einfluss wird durch die Korrekturfunktion nicht berücksichtigt. Betrachtet man die besagte Nacht in Abbildung 5.4 erkennt man, dass der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts unterschätzt und eine höhere Regenintensität ermittelt wird.

Vergleicht man in dem betrachteten Zeitbereich die Wet-Antenna-korrigierte Regenintensität des Feldexperiments mit der Regenintensität des Distrometers 1, bekommt man einen Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1} = 0,702$ . In Relation zu dem Verfahren ohne Wet-Antenna-Korrektur hat sich die Korrelation zwischen der Regenintensität,



**Abb. 5.5:** Zweidimensionales Histogramm mit der mit dem Distrometer 1 gemessenen Regenintensität  $R_{D1}$  und der skalar korrigierten Regenintensität  $R_F$ . Die Häufigkeit wird logarithmisch farblich kodiert. Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Regenintensitäten beträgt  $r_{F,D1} = 0,702$ .

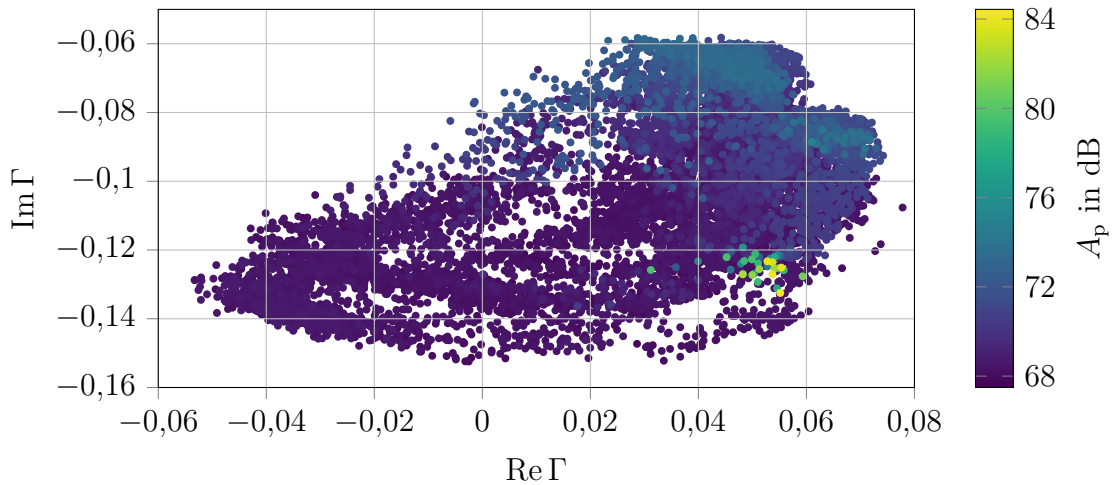
gemessenen mit dem Distrometer 1 und der Regenintensität, ermittelt mit dem Feldexperiment, stark verbessert.

Abbildung 5.5 zeigt das zweidimensionale Histogramm von der mit dem Distrometer gemessenen Regenintensität  $R_{D1}$  und der korrespondierenden skalar korrigierten Regenintensität  $R_F$ , gemessen mit dem Feldexperiment. Im direkten Vergleich zum Ergebnis der unkorrigierten Regenintensität in Abbildung 5.2 fällt auf, dass die Überschätzung in der Zeile  $R_{D1} = 0 \text{ mm h}^{-1}$ , in die vor allem die Tau-Ereignisse fallen, zurückgegangen ist. Die Häufigkeit in der Zelle  $R_{D1} = R_F = 0 \text{ mm h}^{-1}$  beträgt bei dem unkorrigierten Fall 5182 und hier, bei der skalaren Korrektur, 8647. Der Cluster mit den Werten  $R_{D1} > 0 \text{ mm h}^{-1}$  hat sich, im Vergleich zu den unkorrigierten Werten, der 1-zu-1-Gerade angenähert.

## 5.5 Regenintensität mit vektorieller Wet-Antenna-Korrektur

Da das Feldexperiment den komplexen Eingangsreflexionsfaktor liefert, stellt sich auch die Frage, ob auch in der Phase eine Information über den Wet-Antenna-Effekt enthalten ist und ob diese gegebenenfalls zur Verbesserung der Schätzgenauigkeit genutzt werden kann. Diese zusätzliche Information kann bei der Korrektur der Dämpfungswerte einen Mehrwert liefern. Netzwerkanalysatoren, die nicht nur den Betrag sondern auch die Phase ermitteln, werden als vektorielle Netzwerkanalysatoren bezeichnet und in Anlehnung an diese Notation wird das hier vorgestellte Korrekturverfahren auch vektorielles Korrekturverfahren genannt.

Betrachtet man die Pfaddämpfung  $A_p \in \mathbb{R}$  als Funktion von dem komplexen Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma \in \mathbb{C}$ , handelt es sich dabei um eine Abbildung von



**Abb. 5.6:** Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von dem Realteil und dem Imaginärteil des Eingangsreflexionsfaktors  $\Gamma$ , gemessen bei 34,0 GHz (Antenne E) mit horizontaler Polarisation über denselben Zeitraum von acht Tagen, wie in Abbildung 5.3. Das Regenereignis am Nachmittag des 13. Septembers entspricht dem Cluster mit der stärksten Pfaddämpfung (größer 80 dB).

einer komplexen Zahl zu einer reellen Zahl ( $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$ ). Stellt man den komplexen Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  durch seinen Realteil  $\text{Re } \Gamma$  und seinen Imaginärteil  $\text{Im } \Gamma$  dar, erhält man eine Abbildung von einer zweidimensionalen reellen Zahl zu einer reellen Zahl ( $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ). Bei der hier präsentierten vektoriellen Wet-Antenna-Korrektur wird der Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  in dieser vektoriellen Form betrachtet.

Abbildung 5.6 zeigt den Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$  in dessen komplexer Ebene. Der Wert der Pfaddämpfung  $A_p$  wird in dieser Darstellung farblich kodiert. Bei den Daten handelt es sich wieder um die Messdaten, wie sie schon bei den anderen beiden Verfahren verwendet wurden. Die Idee für die Korrektur ist dieselbe, wie bei der skalaren Wet-Antenna-Korrektur. Eine Regressionsanalyse der Datenwolke  $A_p$  als Funktion von  $\Gamma$  repräsentiert die Pfaddämpfung ohne die Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  (vgl. Abschnitt 5.4).

Bei der Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  handelt es sich um eine Abbildung von einer zweidimensionalen reellen Zahl zu einer eindimensionalen reellen Zahl ( $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ). Als



Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  wird ein Polynom vierten Grades verwendet:

$$10 \log_{10}(f_{\text{corr}}(\Gamma)) \text{dB} = [k_0 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6 \quad k_7 \quad k_8] \begin{bmatrix} 1 \\ \text{Re } \Gamma \\ \text{Im } \Gamma \\ \text{Re } \Gamma \text{ Im } \Gamma \\ \text{Re}^2 \Gamma \\ \text{Im}^2 \Gamma \\ \text{Re}^2 \Gamma \text{ Im } \Gamma \\ \text{Re } \Gamma \text{ Im}^2 \Gamma \\ \text{Re}^2 \Gamma \text{ Im}^2 \Gamma \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Die neun Parameter  $[k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8]$  des Polynoms werden, wie schon bei der skalaren Korrektur, durch eine Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) ermittelt. Die Parameter  $k_x$  haben die Einheit dB. Die durch die Ausgleichsrechnung erhaltene Regressionsanalyse der Datenwolke, beziehungsweise die Korrekturfunktion, ergibt somit eine Fläche.

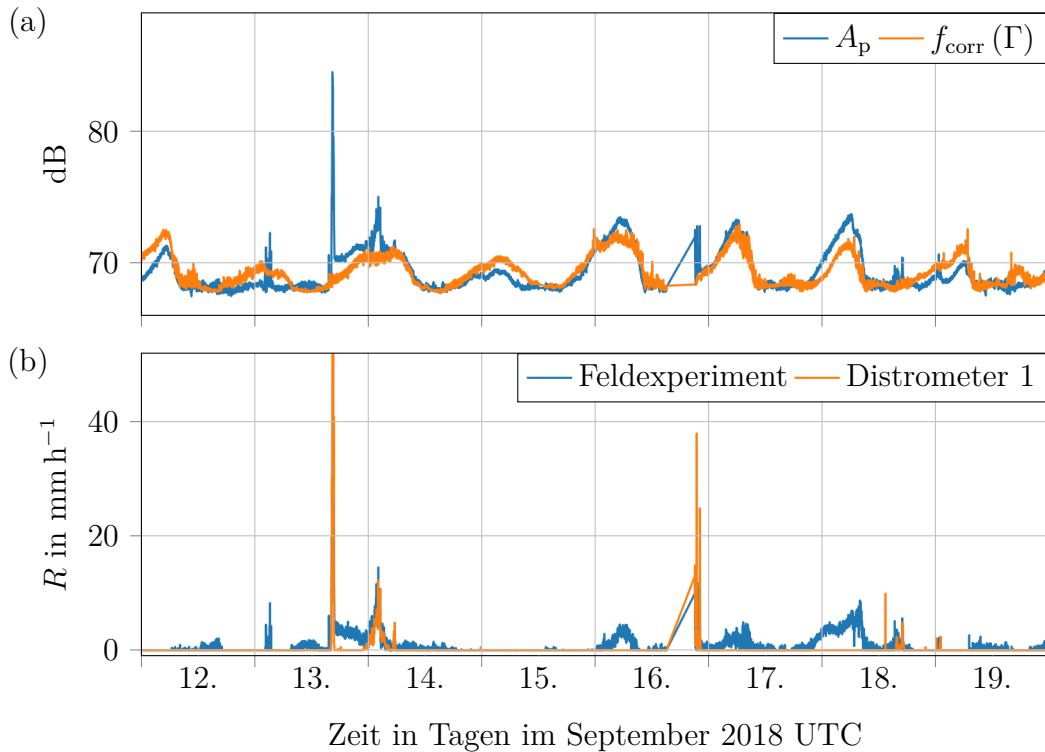
Die Dämpfung durch den Regen  $A_{\text{rain}}$  wird analog zu dem skalaren Verfahren wie folgt ermittelt:

$$A_{\text{rain}}^2 = \frac{A_p}{f_{\text{corr}}(\Gamma)} \quad (5.9)$$

Hier werden auch wieder die Werte von  $A_{\text{rain}}$ , die kleiner als 0 dB sind, auf 0 dB gesetzt und anschließend wird anhand dieser modifizierten Werte die Regenintensität ermittelt.

Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  als Funktion von der Zeit und der mit der Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  ermittelten Korrekturwerte. Des Weiteren werden der Verlauf der Regenintensität, gemessen mit dem Distrometer 1, sowie die Regenintensität, gemessen mit dem Feldexperiment nach der vektoriellen Wet-Antenna-Korrektur, dargestellt. Die Korrektur der Tau-Ereignisse zeigt eine vergleichbare Performanz wie bei der skalaren Korrektur. Betrachtet man das Regenereignis in der Nacht vom 13. auf den 14. September, zeigt sich bei der vektoriellen Korrektur, im Vergleich zu der skalaren, eine deutliche Verbesserung der ermittelten Regenintensität. Da sich der Cluster des Taus in einem anderen Bereich der komplexen Ebene von  $\Gamma$  ausdehnt, als der Cluster von der Benetzung, die durch Regen entsteht, kann man mit der Korrekturfunktion die beiden Fälle besser unterscheiden. Der Einfluss der benetzten Antennen nach dem Regenereignis wird somit mit der vektoriellen Korrektur höher angenommen und folglich besser kompensiert, als bei der skalaren Korrektur.

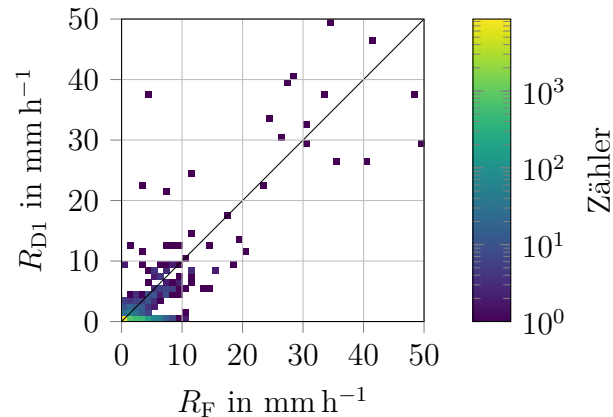
Da die Korrekturfunktion eine Fläche beschreibt, kann diese die unterschiedlichen Cluster besser nachbilden. Bei den hier gezeigten Messwerten hat die Benetzung der Antenne durch ein Regenereignis teilweise einen größeren Einfluss auf die Pfaddämpfung  $A_p$ , als die Benetzung durch Tau (vgl. Abbildung 5.3).



**Abb. 5.7:** (a) Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  bei 34,8 GHz (Antenne E) mit horizontaler Polarisierung und der Korrekturfunktion  $f_{\text{corr}}(\Gamma)$  (basierend auf dem komplexen Eingangsexpressionsfaktor  $\Gamma$ ) als Funktion von der Zeit in einem Beobachtungszeitraum von acht Tagen. (b) Regenintensität, einmal gemessen mit dem Distrometer 1, sowie einmal ermittelt aus dem Schwund.

Vergleicht man nun im betrachteten Zeitbereich die vektoriell Wet-Antenna-korrigierte Regenintensität des Feldexperiments mit der Regenintensität des Distrometers 1, erhält man einen Korrelationskoeffizienten von  $r_{F,D1} = 0,775$ . Im direkten Vergleich zum skalaren Korrekturverfahren kann durch das vektorielle Verfahren die Korrelation zu dem Distrometer 1 erhöht werden.

Abbildung 5.8 zeigt das zweidimensionale Histogramm von der mit dem Distrometer gemessenen Regenintensität  $R_{D1}$  und der korrespondierenden, vektoriell korrigierten Regenintensität  $R_F$ , gemessen mit dem Feldexperiment. Im direkten Vergleich zu der unkorrigierten und der skalar korrigierten Regenintensität  $R_F$  fällt auf, dass bei der vektoriellen Korrektur der Cluster mit den Werten  $R_{D1} > 0 \text{ mm h}^{-1}$  sich nun nahe der 1-zu-1-Geraden befindet. Dies wird auch von dem hohen Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1} = 0,775$  beschrieben. Verglichen mit Distrometer 1 überschätzt das Feldexperiment mit dem vektoriellen Korrekturverfahren die Regenintensität leicht.



**Abb. 5.8:** Zweidimensionales Histogramm mit der mit dem Distrometer 1 gemessenen Regenintensität  $R_{D1}$  und der vektorieLL korrigierten Regenintensität  $R_F$ . Die Häufigkeit wird logarithmisch farblich kodiert. Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Regenintensitäten beträgt  $r_{F,D1} = 0,775$ . Die meisten Punkte befinden sich nahe der 1-zu-1-Geraden.

## 5.6 Bewertung

In diesem Abschnitt werden die beiden vorgestellten Wet-Antenna-Korrekturverfahren auf ihre Leistungsfähigkeit hin verglichen. Dabei wird für alle sechs Antennen und jeweils für die beiden Polarisierungen die Pfaddämpfung  $A_p$  gemessen. Anhand dieser zwölf Pfaddämpfungen wird die Regenintensität jeweils einmal ohne Korrekturverfahren, einmal mit dem skalaren Korrekturverfahren und einmal mit dem vektorieLL Korrekturverfahren ermittelt. Somit erhält man von dem Feldexperiment 36 Regenintensitäten für den achttägigen Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 20. September 00:00 UTC im Jahr 2018. Die meteorologischen Instrumente, welche in der Nähe des Feldexperiments installiert sind, liefern die Vergleichswerte.

Tabelle 5.1 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Regenintensitäten, die das Feldexperiment ermittelt und den Regenintensitäten, die die drei meteorologischen Messinstrumente messen. Dabei beschreiben die Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  und  $r_{F,D2}$  die Korrelation zwischen dem Messergebnis des Feldexperiments und dem Distrometer 1 beziehungsweise dem Distrometer 2. Der Korrelationskoeffizient  $r_{F,W}$  beschreibt wiederum die Korrelation zwischen dem Feldexperiment und der Wetterstation. Die Regenintensität des Feldexperiments wird für jede der sechs Antennen und für die beiden Polarisierungen ermittelt. Bei der Berechnung der Regenintensitäten wird zunächst kein Wet-Antenna-Korrekturverfahren angewendet, um den Vergleichswert zu erhalten. Danach kommen die beiden vorgestellten Wet-Antenna-Korrekturverfahren zur Anwendung.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen den drei meteorologischen Messinstrumenten sind bei der Bewertung der Ergebnisse hilfreich. Für den achttägigen Beobachtungszeitraum hat der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Distrometern den Wert

Antenne		Wet-Antenna-Korrekturverfahren								
		keines			skalares			vektorielles		
		H/V	$r_{F,D1}$	$r_{F,D2}$	$r_{F,W}$	$r_{F,D1}$	$r_{F,D2}$	$r_{F,W}$	$r_{F,D1}$	$r_{F,D2}$
A	H	0,272	0,306	0,269	0,372	0,414	0,374	0,421	0,465	0,422
A	V	0,462	0,490	0,470	0,594	0,625	0,613	0,677	0,711	0,700
B	H	0,442	0,469	0,441	0,809	0,850	0,816	0,819	0,859	0,830
B	V	0,424	0,438	0,416	0,544	0,563	0,536	0,786	0,799	0,782
C	H	0,384	0,401	0,385	0,354	0,362	0,365	0,334	0,338	0,347
C	V	0,465	0,470	0,467	0,387	0,382	0,395	0,607	0,601	0,618
D	H	0,461	0,476	0,457	0,845	0,859	0,845	0,853	0,849	0,860
D	V	0,471	0,487	0,463	0,841	0,859	0,831	0,847	0,847	0,839
E	H	0,424	0,449	0,424	0,702	0,742	0,702	0,775	0,804	0,786
E	V	0,462	0,487	0,459	0,514	0,545	0,510	0,577	0,599	0,581
F	H	0,484	0,510	0,483	0,846	0,875	0,855	0,874	0,894	0,889
F	V	0,483	0,512	0,479	0,610	0,647	0,607	0,837	0,867	0,847

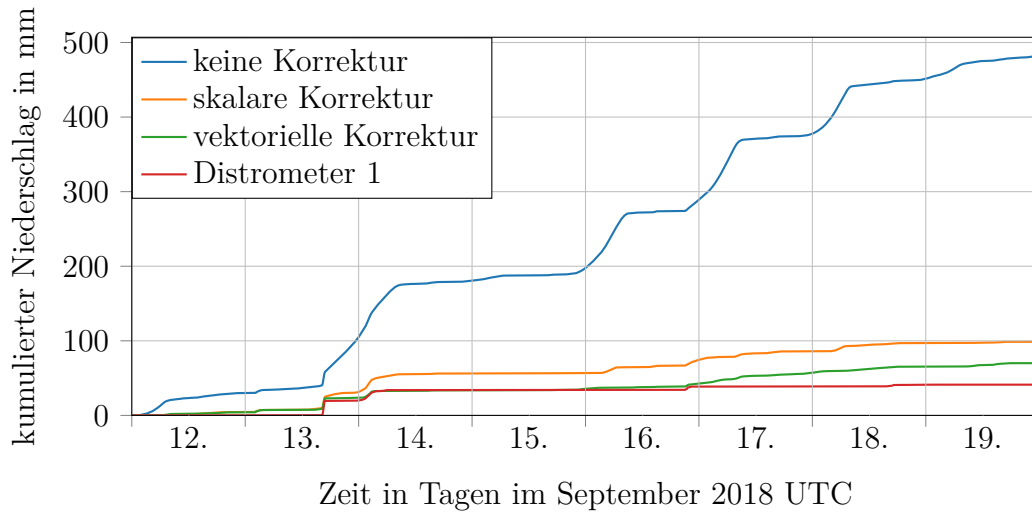
**Tab. 5.1:** Korrelationskoeffizienten zwischen der mit dem Feldexperiment ermittelten Regenintensität und den drei meteorologischen Messinstrumenten Distrometer 1  $r_{F,D1}$ , Distrometer 2  $r_{F,D2}$  und Wetterstation  $r_{F,W}$ . Bei der Berechnung der Regenintensität werden einmal kein Korrekturverfahren, einmal das skalare Verfahren und einmal das vektorielle Verfahren verwendet, um die jeweilige Regenintensität zu ermitteln. Beobachtungszeitraum: 12. September 00:00 UTC bis zum 20. September 00:00 UTC im Jahr 2018.

$r_{D1,D2} = 0,856$ . Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Distrometer 1 und der Wetterstation hat den Wert  $r_{D1,W} = 0,967$  und zwischen dem Distrometer 2 und der Wetterstation herrscht ein Korrelationskoeffizient von  $r_{D2,W} = 0,875$ .

Die Korrelation zwischen der Wetterstation und dem Distrometer 1, beide in der Nähe des Reflektors, ist besonders stark. Dies kann daran liegen, dass der Abstand zwischen diesen beiden Instrumenten geringer ist als der Abstand zu Distrometer 2 in der Nähe des Feldexperiments.

Bei einigen Antennen erhält man mithilfe der hier präsentierten Korrekturverfahren Werte für den Korrelationskoeffizienten (zum Beispiel  $r_{F,D1}$ ) in der Größenordnung der Korrelationskoeffizienten zwischen den meteorologischen Messinstrumenten. Betrachtet man die Unterschiede zwischen den Korrelationskoeffizienten der meteorologischen Instrumente und berücksichtigt man, dass die meteorologischen Instrumente jeweils die Regenintensität an einem Punkt messen und das Feldexperiment einen Mittelwert der Regenintensität entlang der Funkstrecke liefert, stellt man fest, dass das Erreichen dieser Größenordnung ein Zeichen für die Eignung der Korrekturverfahren ist.

Sowohl das skalare als auch das vektorielle Korrekturverfahren liefern Werte der

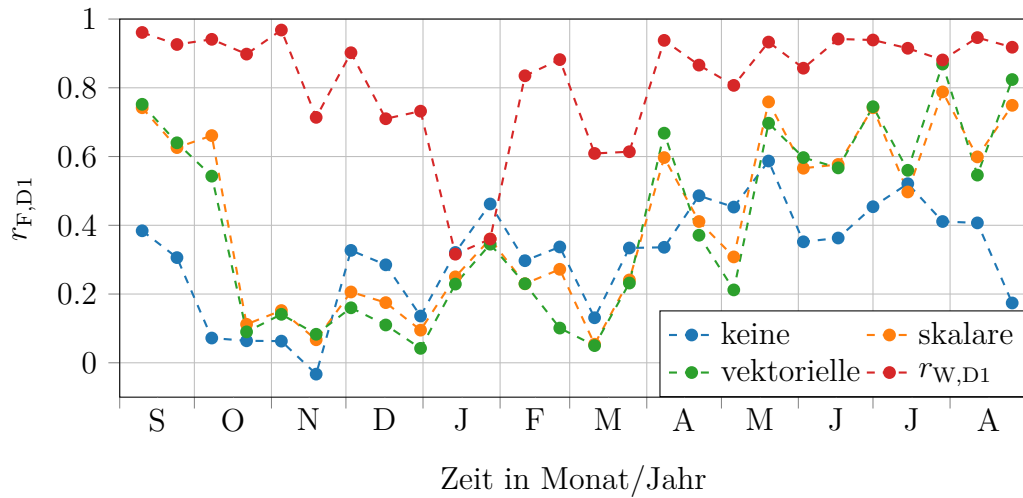


**Abb. 5.9:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 38,5 GHz (Antenne F mit horizontaler Polarisation) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriiellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

Regenintensität mit einer höheren Korrelation zu den meteorologischen Instrumenten, als die unkorrigierte Regenintensität. Es zeigt sich auch, dass das vektorielle Korrekturverfahren meist eine bessere Performanz liefert, als das skalare Verfahren. Die Ergebnisse aus Tabelle 5.1 zeigen, dass das vektorielle Verfahren bei Antenne C bei der horizontalen Polarisation eine leicht schlechtere Performanz abliefern als das skalare Verfahren. Der Beitrag der Phase des Eingangreflexionsfaktors  $\Gamma$  liefert somit einen Mehrwert über die Benetzung der Antenne.

Aufgrund des Wet-Antenna-Effekts überschätzt dieses Verfahren die Regenintensität oft. Berechnet man die akkumulierte Niederschlagsmenge anhand der oben ermittelten Regenintensitäten, zeigt sich eine Drift zwischen dem Wert des Distrometers und dem Wert von dem Feldexperiment. Abbildung 5.9 zeigt die Verläufe der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit für das Distrometer 1, sowie für die drei Regenintensitäten aus Feldexperiment bei 38,5 GHz (Antenne F) mit horizontaler Polarisation ohne Korrektur, mit skalarer Korrektur und mit vektoriieller Korrektur. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Feldexperiment und dem Distrometer 1 nimmt bei diesem Setup folgende Werte an:  $r_{F,D1} = 0,484$  für den Fall, dass keine Korrektur stattfindet,  $r_{F,D1} = 0,846$  für die skalare Korrektur und  $r_{F,D1} = 0,874$  für die vektoriielle Korrektur. Im Anhang E befinden sich die Verläufe der kumulierten Niederschlagsmengen für die restlichen Antennen mit beiden Polarisationen.

Betrachten wir nun die Performanz des skalaren und des vektoriiellen Korrekturverfahrens im Vergleich zur unkorrigierten Regenintensität über den Zeitraum von einem Jahr.



**Abb. 5.10:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 28,5 GHz (Antenne D, vertikaler Polarisierung) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur. Die jeweiligen Korrekturkoeffizienten werden alle vierzehn Tage berechnet und über denselben Zeitraum wird der jeweilige Korrelationskoeffizient ermittelt. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Wetterstation und dem Distrometer  $r_{W,D1}$  dient als Vergleich.

Abbildung 5.10 zeigt die Korrelation zwischen den Regenintensitäten, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 28,5 GHz und vertikaler Polarisierung und gemessen mit dem Distrometer 1 über ein Jahr. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird dreimal berechnet: ohne Wet-Antenna-Korrektur, mit der skalaren Korrektur und mit der vektoriellen Korrektur. Zum Vergleich wird zusätzlich der Korrelationskoeffizient zwischen der Wetterstation und dem Distrometer  $r_{W,D1}$  gezeigt. Der Beobachtungszeitraum über ein Jahr beginnt am 03.09.2018 um 00:00 Uhr UTC und endet am 02.09.2019 um 00:00 Uhr UTC. Alle vierzehn Tage, beginnend mit dem Zeitraum vom Montag den 03.09.2018 um 00:00 Uhr UTC bis zum Montag den 17.09.2018 um 00:00 Uhr UTC, werden die jeweiligen Korrekturkoeffizienten  $k_0$  bis  $k_2$  beziehungsweise  $k_0$  bis  $k_8$  ermittelt. In diesem vierzehntägigen Zeitraum sind die Korrekturkoeffizienten konstant. Die Regenintensität in diesem Zeitraum wird mithilfe der Korrekturfunktion berechnet und anschließend mit der Regenintensität, gemessen mit dem Distrometer 1, verglichen und der Korrelationskoeffizient  $r_{F,D1}$  ermittelt.

Betrachten wir die Verläufe der Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  für die drei Modi erkennt man, dass die Korrelation in den kälteren Monaten Oktober bis März abnimmt. Dieser Einbruch der Korrelation bei der Regenschätzung auf Basis von Schwunddaten ist charakteristisch für dieses Verfahren (siehe [9]). Über das ganze Jahr werden dieselben Parameter  $a$  und  $b$  für die Regenschätzung verwendet. Nach der Art

des Niederschlags, wie etwa Regen, Graupel oder Schnee, wird hier nicht unterschieden. Ebenfalls werden der Einfluss der Temperatur und die damit verbundene Änderung der Permittivität des Wassers nicht berücksichtigt.

Im Vergleich dazu liefert das Feldexperiment in den wärmeren Monaten April bis Oktober eine gute Schätzung der Regenintensität: Vor allem in den Sommermonaten ist die Korrelation sehr hoch.

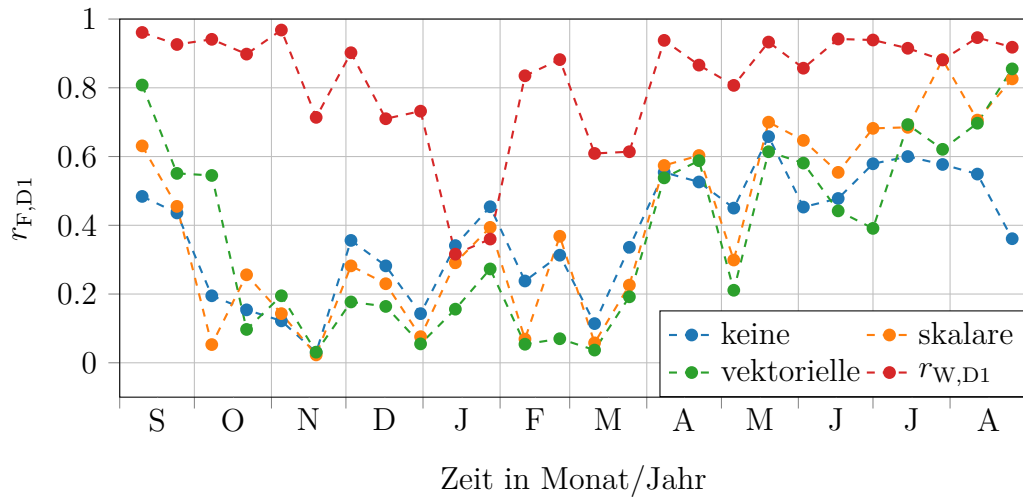
Vergleichen wir nun die drei Verfahren miteinander. In den kalten Monaten ist der Korrelationskoeffizient bei den drei Verfahren meist unter  $r_{F,D1} = 0,4$ . Wie oben beschrieben, kann dies an der mäßigen Eignung der hier verwendeten Parameter  $a$  und  $b$  liegen, da der Niederschlag in diesen Monaten oft aus Schnee besteht. Die Parameter  $a$  und  $b$  nach [54] beschreiben das Dämpfungsverhalten von Regen. Tendenziell liefert die Regenschätzung ohne Korrektur in diesen Monaten eine bessere Performanz ab, als die Verfahren mit Korrektur.

In den warmen Monaten zeigt sich ein anderes Bild. Sowohl das skalare als auch das vektorielle Korrekturverfahren erhöhen die Korrelation im Vergleich zum unkorrigierten Verfahren. Teilweise liegt die Korrelation zwischen dem Feldexperiment und dem Distrometer 1  $r_{F,D1}$  in derselben Größenordnung, wie die Korrelation zwischen der Wetterstation und dem Distrometer 1  $r_{W,D1}$ . So erhalten wir für den September 2018 teilweise Korrelationskoeffizienten von  $r_{F,D1} = 0,75$  für die beiden Wet-Antenna-Korrekturverfahren. Im Vergleich dazu liegt der Korrelationskoeffizient  $r_{F,D1}$  bei der Regenintensität ohne Korrektur unter 0,4.

Die vektorielle Korrektur liefert bei 28,5 GHz mit vertikaler Polarisation keine signifikante Verbesserung der Korrelation im Vergleich zum skalaren Verfahren.

In Abbildung 5.11 wird der Verlauf des Korrelationskoeffizienten, wie in Abbildung 5.10, bei der Frequenz 38,5 GHz (Antenne F) und vertikaler Polarisierung gezeigt. Hier zeigt sich ein größerer Unterschied zwischen den zwei Korrekturverfahren. Im Zeitraum September bis Anfang Oktober ist die Korrelation bei dem vektoriellen Verfahren signifikant höher als bei dem skalaren Verfahren. In den Monaten April bis August liefert das skalare Verfahren eine gleich starke bis teilweise bessere Korrelation als das vektorielle Verfahren. Der charakteristische Verlauf des Korrelationskoeffizienten über das Jahr, mit einer schwachen Korrelation in den kälteren Monaten und einer stärkeren Korrelation in den wärmeren Monaten, ist auch hier zu erkennen.

Im Anhang F befinden sich die Resultate für die restlichen Antennen mit beiden Polarisierungen. Bei der Antenne A (18 GHz) und der Antenne C (25,375 GHz) kommt es mit der Zeit zu einer Verschlechterung der Korrelation  $r_{F,D1}$  nahe 0. Diese Verschlechterung betrifft sowohl die horizontale als auch die vertikale Polarisation. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass sich bei den Speisepunkten der Antenne Wasser sammelt und in das Innere der Antenne kriecht. Bei einer Kontrolle am 11.09.2018 wurde unter den Schutzkappen der Speisepunkte Kondenswasser festgestellt und daraufhin wieder trocken gelegt. Zusätzlich wurde die Abdichtung der Schutzkappen erneuert. Darum ist es naheliegend, dass mit der Zeit wieder Wasser unter die Schutzkappen eindringen konnte und so in die Antenne gelangte.



**Abb. 5.11:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 38,5 GHz (Antenne F, horizontale Polarisierung) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur. Die jeweiligen Korrekturkoeffizienten werden alle vierzehn Tage berechnet und über denselben Zeitraum wird der jeweilige Korrelationskoeffizient ermittelt. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Wetterstation und dem Distrometer  $r_{W,D1}$  dient als Vergleich.

Betrachtet man alle zwölf Resultate über ein Jahr (siehe Anhang F), kann man nicht pauschal von einer stärkeren Korrelation bei dem vektoriellen Korrekturverfahren im Vergleich zum skalaren Verfahren ausgehen, obwohl bei dem vektoriellen Korrekturverfahren zusätzliche Informationen vorhanden sind.

Korrekturfunktionen, die den Unterschied zwischen den beiden Arten der Benetzung, nach einem Regenereignis oder einem Tau-Ereignis besser abbilden, liefern eine bessere Performanz bei der Wet-Antenna-Korrektur. Zum Beispiel kommt es bei gleich großen Eingangsreflexionsfaktor  $\Gamma$ , bei Regenereignissen und Tau-Ereignissen, zu einer unterschiedlichen Wet-Antenna-Dämpfung (vergleiche Abbildung 5.3). Dieser Unterschied lässt sich durch die unterschiedliche Art der Benetzung erklären.

Bei einem Tau-Ereignis bilden sich auf der Antennenabdeckung viele kleine Tropfen, die mit der Zeit größer werden, bis sie schließlich abperlen oder abtrocknen. Die Benetzung ist bei Tau prinzipiell gleichmäßiger als bei Regen.

Während eines Regenereignisses, bei dem auch die Antenne beregnet wird, ändert sich die Benetzung auf der Antennenabdeckung sehr dynamisch. Daher ist die Benetzung bei einem solchen Ereignis wesentlich ungleichmäßiger als bei Tau. Nach einem Regenereignis bleiben nur einzelne größere Tropfen auf der Antennenabdeckung, da durch das Beregnen die Tropfen permanent abperlen. Dies befreit die Antennenabdeckung von einem Teil der Benetzung.

Unterschiedliche Arten der Benetzung, ob vom Tau oder vom Regen, führen



zu unterschiedlichen Zusammenhängen zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung und dem Eingangsreflexionsfaktor und so führt eine gemeinsame Korrekturfunktion zu einem Fehler bei der Korrektur. In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass das Verhalten der Wet-Antenna-Dämpfung zum Eingangsreflexionsfaktor bei einer Antenne für die beiden Polarisationen unterschiedlich sein kann und ungleiche Performanzen bei der Wet-Antenna-Korrektur liefert (siehe Antenne A und Antenne B in Tabelle 5.1). Auch aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen der Antennen, der resultierenden unterschiedlichen Wellenlängen und der unterschiedlichen Permittivität des Wassers ist das Verhalten der Antennen nicht gleich.



## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Dissertation ist die Untersuchung des Einflusses von Wasser auf dem Radom einer Richtfunkantenne auf ihre Performanz. Diese Veränderung der Performanz, wie sie zum Beispiel durch die Benetzung nach einem Regen entsteht, wird auch Wet-Antenna-Effekt genannt und führt zu einem zusätzlichen Beitrag bei der Pfaddämpfung bei Richtfunkstrecken. Wenn anhand des durch Regen hervorgerufenen Schwunds der Richtfunkstrecken die Regenintensität geschätzt wird, dann führt der zusätzliche Beitrag durch den Wet-Antenna-Effekt allerdings zu einer Überschätzung der Regenintensität und somit zu einem Fehler. Ziel ist es, diesen Fehler zu reduzieren.

Für ein besseres Verständnis des Wet-Antenna-Effekts wird in dieser Arbeit zuerst der Einfluss einer homogenen Wasserschicht auf eine ebene Welle untersucht. Bei diesem stark vereinfachten Modell besteht der Wet-Antenna-Effekt zum einen aus den dielektrischen Verlusten in der Wasserschicht und zum anderen aus der Leistung der reflektierten Welle. Beide Beiträge sind von der Permittivität des Wassers und der Schichtdicke abhängig.

Um die Auswirkung einer homogenen Wasserschicht auf dem Radom einer realen Antenne zu untersuchen, wurde eine Pyramiden-Hornantenne mit einer Wasserschicht modelliert und die drei Antennenparameter Richtfaktor, Antennenwirkungsgrad und Eingangsreflexionsfaktor wurden simuliert. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Simulation sind, dass die Benetzung auf alle drei Parameter einen Einfluss hat und dass sich die Wet-Antenna-Dämpfung mit diesen drei Parametern beschreiben lässt. Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurde eine baugleiche Pyramiden-Hornantenne konstruiert, unter Zuhilfenahme eines Wasserkreislaufes mit einem homogenen Wasserfilm benetzt und in einer Antennenmesskammer vermessen. Die Messergebnisse bestätigen das in der Simulation gezeigte Verhalten der Antenne.

Für die Untersuchung von realistischen Benetzungen auf Radomen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Feldexperiment mit sechs dual polarisierten Richtfunkantennen entwickelt und gebaut. Bei diesem Feldexperiment handelt es sich um ein Stepped-Frequency-Continuous-Wave-Radar (18 GHz bis 40 GHz), das nacheinander die sechs Antennen vermisst. Mithilfe dieses Instruments und eines Reflektors wurde eine monostatische Richtfunkstrecke mit einer einfachen Länge von 666 m auf einem Feld errichtet. Das Feldexperiment liefert die komplexen Eingangsreflexionsfaktoren von den einzelnen Antennen sowie die zugehörigen Pfaddämpfungen. In der Pfaddämpfung sind der Richtfaktor und der Antennenwirkungsgrad enthalten. Deren Produkt wird als Antennengewinn bezeichnet. Dass die Benetzung des Radoms einen

Einfluss auf den Eingangsreflexionsfaktor und den Antennengewinn hat, wurde auch durch das Feldexperiment bestätigt. Des Weiteren zeigt sich, dass zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung und dem Eingangsreflexionsfaktor eine Korrelation besteht.

Um die Regenintensität über den Schwund zu schätzen, muss der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts auf die Pfaddämpfung bereinigt werden. Deshalb wurde basierend auf der Korrelation zwischen dem Eingangsreflexionsfaktor und der Wet-Antenna-Dämpfung ein Korrekturverfahren entwickelt. Anhand eines Beobachtungszeitraums wird dabei die Korrekturfunktion durch Ausgleichsrechnung ermittelt. Es wurden dafür zwei Verfahren vorgestellt. Das eine stützt sich ausschließlich auf den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors, während das andere auch die Phase des Eingangsreflexionsfaktors auswertet. Als Vergleichswert dient die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität ohne Korrektur.

### **6.1 Wissenschaftlichen Forschungsfragen: Antworten**

In der Einführung wurden vier wissenschaftliche Fragen formuliert, welche in dieser Arbeit beantwortet wurden. Im folgenden werden die Antworten auf diese Fragen zusammengefasst:

#### **1. Wie setzt sich der Wet-Antenna-Effekt zusammen?**

Die Simulations- und Messergebnisse der Pyramiden-Hornantenne aus Kapitel 3 zeigen, dass Nässe und Feuchtigkeit auf dem Radom einer Antenne die drei Antennenparameter Richtfaktor, Antennenwirkungsgrad und Eingangsreflexionsfaktor beeinflusst. Der Wet-Antenna-Effekt setzt sich somit aus der Veränderung dieser Parameter in Abhängigkeit von der Benetzung zusammen. Aus diesen drei Antennenparametern folgt deshalb ein Model für die Wet-Antenna-Dämpfung (Gleichung (3.14)). Die Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss des Eingangsreflexionsfaktors den geringsten Beitrag zu dem Wet-Antenna-Effekt liefert. Den größten Anteil an dem Wet-Antenna-Effekt hat der Antennenwirkungsgrad, welcher sich durch die dielektrischen Verluste im Wasser auf dem Radom verschlechtert. Der Richtfaktor kann sich erhöhen oder verringern, je nach Benetzung. Zudem ist er ein Beitrag zu der gesamten durch den Wet-Antenna-Effekt hervorgerufenen Dämpfung. Die Experimente mit dem Feldexperiment in Kapitel 4 zeigen, dass auch der Eingangsreflexionsfaktor einen reduzierenden Beitrag zum Wet-Antenna-Effekt liefern kann. In diesem Fall nimmt die Antenne mehr Leistung von dem Sender auf.

## **2. Kann man den Wet-Antenna-Effekt direkt registrieren?**

Sowohl die Untersuchung der Pyramiden-Hornantenne als auch die Ergebnisse des Feldexperiments zeigen, dass der Eingangsreflexionsfaktor der Antenne sensitiv auf eine Benetzung des Radoms reagiert. Eine Veränderung des Eingangsreflexionsfaktors ist ein starkes Indiz für eine Wasserbenetzung der Antenne und dementsprechend auch ein Indikator für den Wet-Antenna-Effekt. Von den drei Antennenparametern ist der Eingangsreflexionsfaktor der einzige, der prinzipiell in situ bei einer Richtfunkstrecke gemessen werden kann. Aus technischer Sicht ist das Monitoring des Eingangsreflexionsfaktors einfach und kostengünstig zu realisieren, benötigt aber Änderungen an der Hardware der Richtfunkssysteme, um die hin- und rücklaufende Welle zu messen und daraus den Eingangsreflexionsfaktor zu ermitteln. Das Umrüsten von bestehenden Richtfunkstrecken wäre aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll, aber bei zukünftigen Generationen von Richtfunkssystemen könnte diese Funktion berücksichtigt und eingebaut werden. Damit kann der Eingangsreflexionsfaktor während des Betriebs in Echtzeit ermittelt werden, so dass man anhand seines Verlaufs auf die Benetzung des Radoms schließen kann.

## **3. Kann der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts ermittelt bzw. geschätzt werden?**

Da der Eingangsreflexionsfaktor von einer Wasserbenetzung des Radoms beeinflusst wird, kann man über den gemessenen Eingangsreflexionsfaktor seinen Beitrag zu der Wet-Antenna-Dämpfung direkt ermitteln. Dieser Beitrag hat laut der Untersuchung der Pyramiden-Hornantenne den geringsten Anteil an der Wet-Antenna-Dämpfung. Die restlichen Beiträge von dem Richtfaktor und dem Antennenwirkungsgrad sind nicht direkt ermittelbar. Die Experimente in Kapitel 4 zeigen, dass zwischen der Wet-Antenna-Dämpfung und dem Eingangsreflexionsfaktor der Antenne eine Korrelation besteht. Basierend auf dieser Korrelation kann eine Korrekturfunktion als Funktion vom Eingangsreflexionsfaktor ermittelt werden. Mit dieser Korrekturfunktion kann die Pfaddämpfung von der Wet-Antenna-Dämpfung bereinigt werden und man erhält die Dämpfung durch den Regen, mit der die Regenintensität geschätzt werden kann. Wichtige Annahme dabei ist, dass der Wet-Antenna-Effekt über einen längeren Zeitraum wirkt als das eigentliche Regenereignis.

## **4. Wie tauglich ist eine solche Schätzung, um die Genauigkeit der Niederschlagsmessung zu verbessern?**

Die Eignung der auf dem Eingangsreflexionsfaktor basierenden Korrektur wird in Kapitel 5 anhand eines Feldexperiments unter realistischen Bedingungen gezeigt. Die Korrelation zwischen der mit der Richtfunkstrecke geschätzten Regenintensität und den meteorologischen Instrumenten, die in der Nähe der Richtfunkstrecke installiert sind, verbessert sich mithilfe der Wet-Antenna-Korrekturfunktion deutlich (siehe

Tabelle 5.1). Beispielweise stieg der Korrelationskoeffizient zwischen der Regenintensität, gemessen mit dem Feldexperiment (Antenne F bei horizontaler Polarisation) und der Regenintensität, gemessen mit dem Distrometer 2, von  $r_{F,D2} = 0,510$  ohne Wet-Antenna-Korrektur auf  $r_{F,D2} = 0,875$  mit der skalaren Wet-Antenna-Korrektur. Berücksichtigt man bei der Korrektur auch noch die Information der Phase des Eingangsreflexionsfaktors (vektorielle Wet-Antenna-Korrektur), dann erhält man einen Korrelationskoeffizienten von  $r_{F,D2} = 0,894$ . In Tabelle 5.1 erkennt man, dass mithilfe der Wet-Antenna-Korrektur, basierend auf dem Eingangsreflexionsfaktor, meist ein besserer Schätzwert für die Regenintensität ermittelt wird als ohne Wet-Antenna-Korrektur.

In dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz vorgestellt, wie der Einfluss des Wet-Antenna-Effekts bei Richtfunkantennen über den Eingangsreflexionsfaktor der Antenne geschätzt werden kann. Der gewählte Ansatz bestand darin, den Wet-Antenna-Effekt mit einer Korrekturfunktion zu kompensieren, welche den Eingangsreflexionsfaktor als Argument nutzt. Dies erwies sich als vielversprechender Weg, um bessere Schätzwerte für die auf Schwunddaten basierte Regenintensitätsmessung zu bekommen.

## 6.2 Ausblick

Bestehende Richtfunksysteme können den Eingangsreflexionsfaktor der Antenne zwar noch nicht messen, aber diese Arbeit soll anstoßen, dass diese Funktion in zukünftigen Systemen berücksichtigt wird.

Von welcher Form die optimale Korrekturfunktion ist und wie sie ermittelt wird, ist noch nicht final geklärt. In dieser Arbeit wurden die Korrekturfunktionen beispielsweise alle acht beziehungsweise vierzehn Tage neu ermittelt, aber andere Beobachtungszeiträume wären auch möglich.

Eine Weiterentwicklung könnte auch darin bestehen, zu unterscheiden, ob die Wet-Antenna-Dämpfung von einem Tau- oder einem Regenereignis herrührt. Für die unterschiedlichen Fälle könnte man dann jeweils eine eigene Korrekturfunktion verwenden, um präzisere Ergebnisse zu erhalten.

Im nächsten Schritt könnte man bei dem Feldexperiment von einem monostatischen Aufbau zu einem bistatischen Aufbau wechseln, da dieser einer echten Richtfunkstrecke näher kommt. Bei diesem ersetzt man den Reflektor durch eine Empfangsantenne (für jede Sendeantenne), so dass die Dämpfung der Funkstrecke nur einfach gemessen wird. Der Netzwerkanalysator speist bei dieser Konfiguration sowohl die Antenne am Turm A als auch die Antenne am Turm B. Dabei würde man die beiden Eingangsreflexionskoeffizienten sowie die Vorwärts- und Rückwärts-Transmission der Funkstrecke erhalten.

Für einen genaueren Vergleichswert für die Regenintensität könnte man mehrere Pluviometer und Distrometer entlang der Funkstrecke installieren, um die Variation

der Tropfenverteilung und der Regenintensität besser zu berücksichtigen.

Da bei zukünftigen Richtfunkssystemen Frequenzen von über 40 GHz mehr und mehr eine Rolle spielen werden, erscheint es sinnvoll, auch Richtfunkantennen bei diesen Frequenzen in puncto Wet-Antenna-Effekt zu untersuchen und das in dieser Arbeit entwickelte Korrekturverfahren zu adaptieren.

Auch das Übersprechen von der horizontalen auf die vertikale Polarisation könnte Informationen über die Wasserbenetzung der Richtfunkantennen liefern.

Zudem sollte noch geklärt werden, ob sich der Wet-Antenna-Effekt bei baugleichen Richtfunkantennen gleich verhält oder wie stark Fertigungstoleranzen das Verhalten beeinflussen. Im Falle von gleichen oder ähnlichen Verhalten könnte der Hersteller die Korrekturfunktion einmalig für alle baugleichen Richtfunkantennen ermitteln.





# Literatur

- [1] V. Nešpor und B. Sevruk, „Estimation of Wind-Induced Error of Rainfall Gauge Measurements Using a Numerical Simulation“, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, Nr. 4, S. 450–464, Apr. 1999. DOI: 10.1175/1520-0426(1999)016<0450:EOWIEO>2.0.CO;2.
- [2] C. W. Ulbrich und L. G. Lee, „Rainfall Measurement Error by WSR-88D Radars due to Variations in Z–R Law Parameters and the Radar Constant“, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, Nr. 8, S. 1017–1024, Aug. 1999. DOI: 10.1175/1520-0426(1999)016<1017:RMEBWR>2.0.CO;2.
- [3] H. Andrieu und J. D. Creutin, „Identification of Vertical Profiles of Radar Reflectivity for Hydrological Applications Using an Inverse Method. Part I: Formulation“, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, Nr. 1, S. 225–239, Jan. 1995. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034<0225:IOVPOR>2.0.CO;2.
- [4] M. Kitchen, R. Brown und A. G. Davies, „Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 120, Nr. 519, S. 1231–1254, 1994. DOI: 10.1002/qj.49712051906.
- [5] D. L. Harrison, S. J. Driscoll und M. Kitchen, „Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques“, *Meteorological Applications*, Vol. 7, Nr. 2, S. 135–144, 2000. DOI: 10.1017/S1350482700001468.
- [6] U. Germann und J. Joss, „Mesobeta Profiles to Extrapolate Radar Precipitation Measurements above the Alps to the Ground Level“, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 41, Nr. 5, S. 542–557, Mai 2002. DOI: 10.1175/1520-0450(2002)041<0542:MPERP>2.0.CO;2.
- [7] H. Messer, A. Zinevich und P. Alpert, „Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks“, *Science*, Vol. 312, Nr. 5774, S. 713–713, Mai 2006. DOI: 10.1126/science.1120034.
- [8] C. Chwala und H. Kunstmann, „Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges“, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 6, Nr. 2, e1337, 2019. DOI: 10.1002/wat2.1337.

- [9] M. Graf, C. Chwala, J. Polz und H. Kunstmann, „Rainfall estimation from a German-wide commercial microwave link network: optimized processing and validation for 1 year of data“, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24, Nr. 6, S. 2931–2950, Juni 2020, Publisher: Copernicus GmbH. DOI: 10.5194/hess-24-2931-2020.
- [10] H. Leijnse, R. Uijlenhoet und J. N. M. Stricker, „Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks“, *Water Resources Research*, Vol. 43, Nr. 3, 2007. DOI: 10.1029/2006WR005631.
- [11] M. Fencl, J. Rieckermann, M. Schleiss, D. Stránský und V. Bareš, „Assessing the potential of using telecommunication microwave links in urban drainage modelling“, *Water Science and Technology*, Vol. 68, Nr. 8, S. 1810–1818, Okt. 2013. DOI: 10.2166/wst.2013.429.
- [12] J. Pastorek, M. Fencl, J. Rieckermann und V. Bareš, „Commercial microwave links for urban drainage modelling: The effect of link characteristics and their position on runoff simulations“, *Journal of Environmental Management*, Vol. 251, S. 109 522, Dez. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109522.
- [13] A. Overeem, H. Leijnse und R. Uijlenhoet, „Two and a half years of country-wide rainfall maps using radio links from commercial cellular telecommunication networks“, *Water Resources Research*, Vol. 52, Nr. 10, S. 8039–8065, 2016. DOI: 10.1002/2016WR019412.
- [14] A. Doumounia, M. Gosset, F. Cazenave, M. Kacou und F. Zougmore, „Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed“, *Geophysical Research Letters*, S. 6016–6022, Feb. 2015. DOI: 10.1002/2014GL060724.
- [15] J. C. B. Hoedjes, A. Kooiman, B. H. P. Maathuis, M. Y. Said, R. Becht, A. Limo, M. Mumo, J. Nduhiu-Mathenge, A. Shaka und B. Su, „A Conceptual Flash Flood Early Warning System for Africa, Based on Terrestrial Microwave Links and Flash Flood Guidance“, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 3, Nr. 2, S. 584–598, Juni 2014. DOI: 10.3390/ijgi3020584.
- [16] N. David, O. Sendik, H. Messer und P. Alpert, „Cellular Network Infrastructure: The Future of Fog Monitoring?“, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 96, Nr. 10, S. 1687–1698, Dez. 2014. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00292.1.
- [17] P. Alpert und Y. Rubin, „First Daily Mapping of Surface Moisture from Cellular Network Data and Comparison with Both Observations/ECMWF Product“, *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, Nr. 16, S. 8619–8628, 2018. DOI: 10.1029/2018GL078661.

- 
- [18] N. David, O. Sendik, Y. Rubin, H. Messer, H. O. Gao, D. Rostkier-Edelstein und P. Alpert, „Analyzing the ability to reconstruct the moisture field using commercial microwave network data“, *Atmospheric Research*, Vol. 219, S. 213–222, Mai 2019. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.025.
- [19] C. Chwala, H. Kunstmann, S. Hipp und U. Siart, „A monostatic microwave transmission experiment for line integrated precipitation and humidity remote sensing“, *Atmospheric Research*, Perspectives of Precipitation Science - Part II, Vol. 144, S. 57–72, Juli 2014. DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.05.014.
- [20] N. David und H. O. Gao, „Using Cellular Communication Networks To Detect Air Pollution“, *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, Nr. 17, S. 9442–9451, Sep. 2016. DOI: 10.1021/acs.est.6b00681.
- [21] R. Uijlenhoet, A. Overeem und H. Leijnse, „Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks“, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 5, Nr. 4, e1289, Juli 2018. DOI: 10.1002/wat2.1289.
- [22] B. Blevis, „Losses due to rain on radomes and antenna reflecting surfaces“, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 13, Nr. 1, S. 175–176, Jan. 1965. DOI: 10.1109/TAP.1965.1138384.
- [23] R. Henning und J. Stanton, „Effects of dew on millimeter-wave propagation“, in *Proceedings of SOUTHEASTCON '96*, Apr. 1996, S. 684–687. DOI: 10.1109/SECON.1996.510158.
- [24] M. Islam und A. Tharek, „Measurement of wet antenna effect on microwave propagation at 23, 26 and 38 GHz“, in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C)*, Bd. 4, Juli 2000, 2094–2098 vol.4. DOI: 10.1109/APS.2000.874906.
- [25] M. Kharadly und R. Ross, „Effect of wet antenna attenuation on propagation data statistics“, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, Nr. 8, S. 1183–1191, Aug. 2001. DOI: 10.1109/8.943313.
- [26] H. Minda und K. Nakamura, „High Temporal Resolution Path-Average Rain Gauge with 50-GHz Band Microwave“, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 22, Nr. 2, S. 165–179, Feb. 2005. DOI: 10.1175/JTECH-1683.1.
- [27] H. Leijnse, R. Uijlenhoet und J. N. M. Stricker, „Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation“, *Advances in Water Resources*, Hydrologic Remote Sensing, Vol. 31, Nr. 11, S. 1481–1493, Nov. 2008. DOI: 10.1016/j.advwatres.2008.03.004.

- [28] A. Overeem, H. Leijnse und R. Uijlenhoet, „Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks“, *Water Resources Research*, Vol. 47, Nr. 12, 2011. DOI: 10.1029/2010WR010350.
- [29] M. Schleiss, J. Rieckermann und A. Berne, „Quantification and Modeling of Wet-Antenna Attenuation for Commercial Microwave Links“, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 10, Nr. 5, S. 1195–1199, Sep. 2013. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2236074.
- [30] T. C. v. Leth, A. Overeem, H. Leijnse und R. Uijlenhoet, „A measurement campaign to assess sources of error in microwave link rainfall estimation“, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 11, Nr. 8, S. 4645–4669, Aug. 2018. DOI: 10.5194/amt-11-4645-2018.
- [31] M. Fencl, P. Valtr, M. Kvičera und V. Bareš, „Quantifying Wet Antenna Attenuation in 38-GHz Commercial Microwave Links of Cellular Backhaul“, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 16, Nr. 4, S. 514–518, Apr. 2019. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2876696.
- [32] A. Mancini, R. M. Lebrón und J. L. Salazar, „The Impact of a Wet S-Band Radome on Dual-Polarized Phased-Array Radar System Performance“, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 67, Nr. 1, S. 207–220, Jan. 2019. DOI: 10.1109/TAP.2018.2876733.
- [33] J. S. Marshall und W. M. K. Palmer, „The distribution of raindrops with size“, *Journal of Meteorology*, Vol. 5, Nr. 4, S. 165–166, Aug. 1948. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2.
- [34] J. Joss und A. Waldvogel, „Raindrop Size Distribution and Sampling Size Errors“, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 26, Nr. 3, S. 566–569, Mai 1969. DOI: 10.1175/1520-0469(1969)026<0566:RSDASS>2.0.CO;2.
- [35] R. Gunn und G. D. Kinzer, „The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air“, *Journal of Meteorology*, Vol. 6, Nr. 4, S. 243–248, Aug. 1949. DOI: 10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTV0FF>2.0.CO;2.
- [36] A. F. Spilhaus, „Raindrop size, shape and falling speed“, *Journal of Meteorology*, Vol. 5, Nr. 3, S. 108–110, Juni 1948. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0108:RSSAFS>2.0.CO;2.
- [37] R. H. Magarvey und B. W. Taylor, „Free Fall Breakup of Large Drops“, *Journal of Applied Physics*, Vol. 27, Nr. 10, S. 1129–1135, Okt. 1956. DOI: 10.1063/1.1722216.
- [38] V. O’Brien, „Why raindrops break up—vortex instability“, *Journal of Meteorology*, Vol. 18, Nr. 4, S. 549–552, Aug. 1961. DOI: 10.1175/1520-0469(1961)018<0549:WRBUI>2.0.CO;2.

- 
- [39] E. Villermaux und B. Bossa, „Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops“, *Nature Physics*, Vol. 5, Nr. 9, S. 697–702, Sep. 2009. DOI: 10.1038/nphys1340.
- [40] G. Montero-Martínez, A. B. Kostinski, R. A. Shaw und F. García-García, „Do all raindrops fall at terminal speed?“, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, Nr. 11, 2009. DOI: 10.1029/2008GL037111.
- [41] D. Atlas und C. W. Ulbrich, „Path- and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1–3 cm Band“, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, Nr. 12, S. 1322–1331, Dez. 1977. DOI: 10.1175/1520-0450(1977)016<1322:PAAIRM>2.0.CO;2.
- [42] X. Wang, L. Zhang und M. D. Moran, „Uncertainty assessment of current size-resolved parameterizations for below-cloud particle scavenging by rain“, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 10, Nr. 12, S. 5685–5705, Juni 2010. DOI: 10.5194/acp-10-5685-2010.
- [43] H. R. Pruppacher und K. V. Beard, „A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 96, Nr. 408, S. 247–256, 1970. DOI: 10.1002/qj.49709640807.
- [44] H. R. Pruppacher und R. L. Pitter, „A Semi-Empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops“, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 28, Nr. 1, S. 86–94, Jan. 1971. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2.
- [45] K. V. Beard und C. Chuang, „A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops“, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 44, Nr. 11, S. 1509–1524, Juni 1987. DOI: 10.1175/1520-0469(1987)044<1509:ANMFTE>2.0.CO;2.
- [46] P. J. W. Debye, *Polare Molekeln*. Leipzig: Hirzel, 1929.
- [47] J. Wyman, „Polarization and Dielectric Constant of Liquids“, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 58, Nr. 8, S. 1482–1486, Aug. 1936. DOI: 10.1021/ja01299a049.
- [48] K. S. Cole und R. H. Cole, „Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics“, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 9, Nr. 4, S. 341–351, Apr. 1941. DOI: 10.1063/1.1750906.
- [49] H. J. Liebe, G. A. Hufford und T. Manabe, „A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz“, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 12, Nr. 7, S. 659–675, Juli 1991. DOI: 10.1007/BF01008897.
- [50] C. A. Balanis, *Antenna theory*, 3. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

- [51] H. T. Friis, „A Note on a Simple Transmission Formula“, *Proceedings of the IRE*, Vol. 34, Nr. 5, S. 254–256, Mai 1946. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568.
- [52] *ITU-R P.676-12 Attenuation by atmospheric gases and related effects*, International Telecommunication Union, Aug. 2019.
- [53] R. Olsen, D. Rogers und D. Hodge, „The aRbrelation in the calculation of rain attenuation“, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 26, Nr. 2, S. 318–329, März 1978. DOI: 10.1109/TAP.1978.1141845.
- [54] *ITU-R P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, International Telecommunication Union, März 2005.
- [55] C. Moroder, U. Siart, C. Chwala und H. Kunstmann, „Modeling of Wet Antenna Attenuation for Precipitation Estimation From Microwave Links“, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 17, Nr. 3, S. 386–390, März 2020. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2922768.
- [56] A. A. M. Saleh, „Polarization-independent, multilayer dielectrics at oblique incidence“, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 54, Nr. 6, S. 1027–1049, Juli 1975. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02881.x.
- [57] „IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas“, *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, S. 1–50, März 2014. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6758443.
- [58] C. A. Balanis, *Antenna theory*, 4. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [59] C. Moroder, U. Siart, C. Chwala und H. Kunstmann, „Microwave Instrument for Simultaneous Wet Antenna Attenuation and Precipitation Measurement“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 69, Nr. 8, S. 5853–5861, Aug. 2020. DOI: 10.1109/TIM.2019.2961498.
- [60] C. Chwala, „Precipitation and humidity observation using a microwave transmission experiment and commercial microwave links“, Diss., Universität Augsburg, 2015.
- [61] E. F. Knott, J. F. Shaeffer und M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, 2. Aufl. Raleigh (NC): SciTech Publishing, 1993.
- [62] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, 3. Aufl., Ser. McGraw-Hill electrical engineering series. Boston [u.a.]: McGraw-Hill, 2001.
- [63] H. Brodhage und W. Hormuth, *Planung und Berechnung von Richtfunkverbindungen*, 10., völlig Neubearb. Aufl. Berlin, München: Siemens-Aktienges., 1977.
- [64] J. Donnevert, *Digitalrichtfunk*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

- 
- [65] I. Nicolaescu, P. v. Genderen, K. W. V. Dongen, J. v. Heijenoort und P. Hakkaart, „Stepped frequency continuous wave radar-data preprocessing“, in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2003.*, Mai 2003, S. 177–182. DOI: 10.1109/AGPR.2003.1207315.
- [66] R. B. Blackman und J. W. Tukey, „The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering — Part I“, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 37, Nr. 1, S. 185–282, Jan. 1958. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1958.tb03874.x.
- [67] R. B. Blackman und J. W. Tukey, „The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering — Part II“, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 37, Nr. 2, S. 485–569, März 1958. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1958.tb01530.x.
- [68] F. J. Harris, „On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform“, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, Nr. 1, S. 51–83, Jan. 1978. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837.
- [69] P. H. C. Eilers und H. F. M. Boelens, „Baseline Correction with Asymmetric Least Squares Smoothing“, *unveröffentlichtes Manuskript*, S. 24, Okt. 2005.





# Anhang

## A Logdatei LOG\_SYS.txt

---

```
2018-08-28 08:16:40 (UTC): System gestartet
2018-08-28 09:45:31 (UTC): System gestartet
2018-09-26 06:35:20 (UTC): System gestartet
2018-10-17 06:32:33 (UTC): System gestartet
2018-12-04 15:51:06 (UTC): System gestartet
2018-12-18 14:09:07 (UTC): System gestartet
2019-01-16 07:52:50 (UTC): System gestartet
2019-01-21 16:24:24 (UTC): System gestartet
2019-01-22 09:08:29 (UTC): System gestartet
2019-02-11 09:01:43 (UTC): System gestartet
2019-02-22 12:49:57 (UTC): System gestartet
2019-04-17 10:47:13 (UTC): System gestartet
2019-05-13 06:28:01 (UTC): System gestartet
2019-05-20 10:52:28 (UTC): System gestartet
2019-05-23 07:12:58 (UTC): System gestartet
2019-05-23 07:14:42 (UTC): System gestartet
2019-06-11 06:33:06 (UTC): System gestartet
2019-07-01 06:52:56 (UTC): System gestartet
2019-07-01 17:41:37 (UTC): System gestartet
2019-07-04 10:29:33 (UTC): System gestartet
2019-07-12 08:03:51 (UTC): System gestartet
2019-07-15 07:05:24 (UTC): System gestartet
2019-07-20 09:39:45 (UTC): System gestartet
2019-08-23 09:54:40 (UTC): System gestartet
2019-09-09 07:35:42 (UTC): System gestartet
2019-09-09 07:36:52 (UTC): System gestartet
2019-09-26 09:17:17 (UTC): System gestartet
2019-09-26 09:17:18 (UTC): System gestartet
2019-10-07 20:20:53 (UTC): System gestartet
```

---

## B Logdatei LOG\_ROUTINE.txt (Ausschnitt)

---

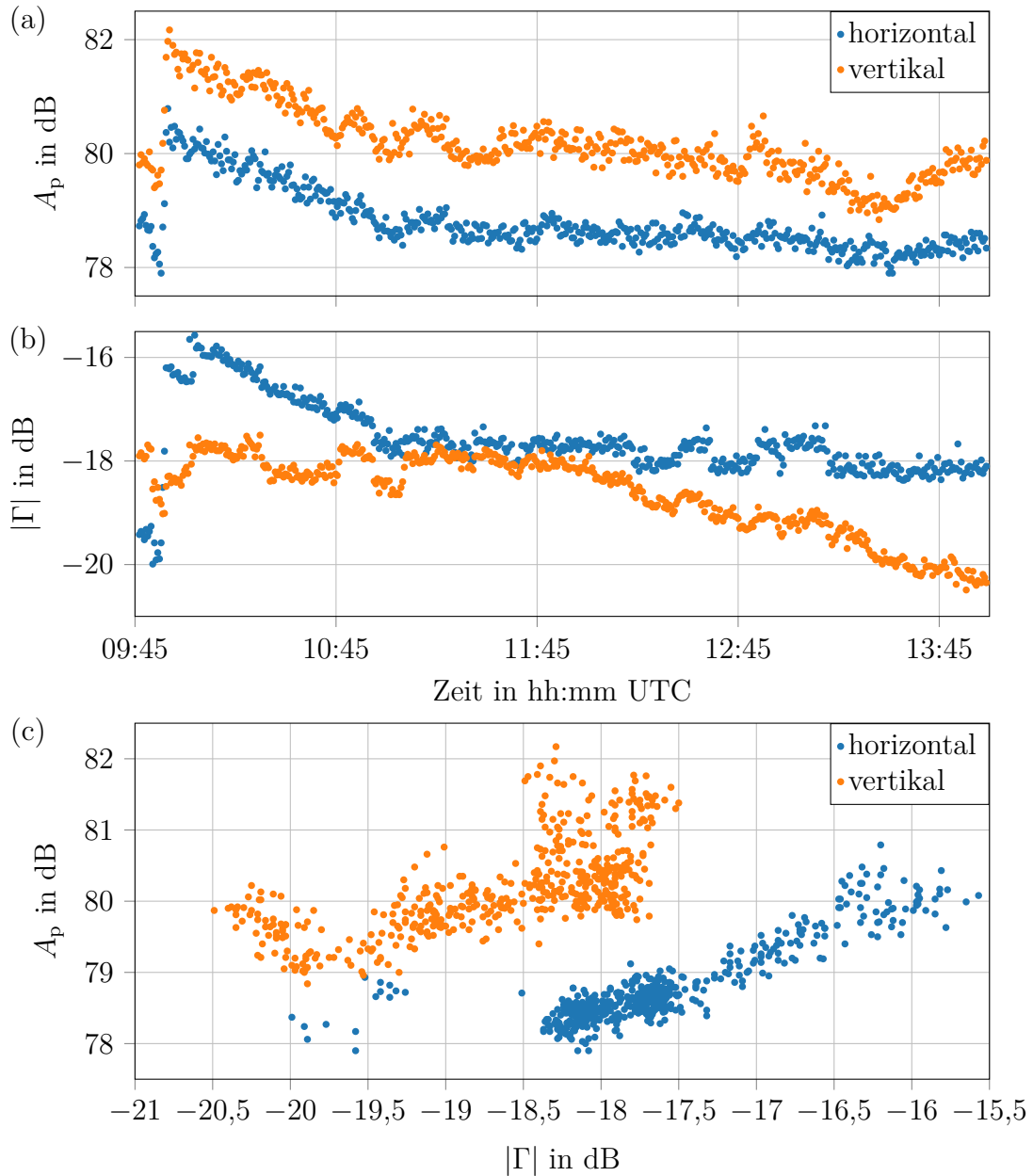
```
2019-09-09 07:36:52 (UTC): =====
2019-09-09 07:36:52 (UTC): START ATTRRA 2 ROUTINE
2019-09-09 07:36:52 (UTC): START INIT
2019-09-09 07:39:12 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-09 07:41:25 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-09 07:43:39 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-09 07:45:52 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-09 07:45:59 (UTC): ANRITSU,MS46122B,1742302,V2018.2.1,V2.2.90
2019-09-09 07:46:00 (UTC): LOAD CHA
2019-09-09 08:01:19 (UTC): INIT 32 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:32 (UTC): INIT 38 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:40 (UTC): INIT 23 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:40 (UTC): INIT 24/26 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:41 (UTC): INIT 18 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:53 (UTC): INIT 28 HPX OK OK OK OK
2019-09-09 08:01:53 (UTC): START measurement
2019-09-09 08:04:59 (UTC): make HDF5-File
2019-09-16 00:00:08 (UTC): make HDF5-File
2019-09-26 09:17:17 (UTC): =====
2019-09-26 09:17:17 (UTC): START ATTRRA 2 ROUTINE
2019-09-26 09:17:17 (UTC): START INIT
2019-09-26 09:19:31 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-26 09:17:18 (UTC): =====
2019-09-26 09:17:18 (UTC): START ATTRRA 2 ROUTINE
2019-09-26 09:17:18 (UTC): START INIT
2019-09-26 09:19:31 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-26 09:21:44 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-26 09:23:57 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-26 09:26:10 (UTC): ERROR: VNA-Ctrl ERROR
2019-09-26 09:26:22 (UTC): ANRITSU,MS46122B,1742302,V2018.2.1,V2.2.90
2019-09-26 09:26:22 (UTC): LOAD CHA
2019-09-26 09:41:52 (UTC): INIT 32 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:05 (UTC): INIT 38 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:14 (UTC): INIT 23 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:14 (UTC): INIT 24/26 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:14 (UTC): INIT 18 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:26 (UTC): INIT 28 HPX OK OK OK OK
2019-09-26 09:42:26 (UTC): START measurement
2019-09-26 09:45:34 (UTC): make HDF5-File
```

---



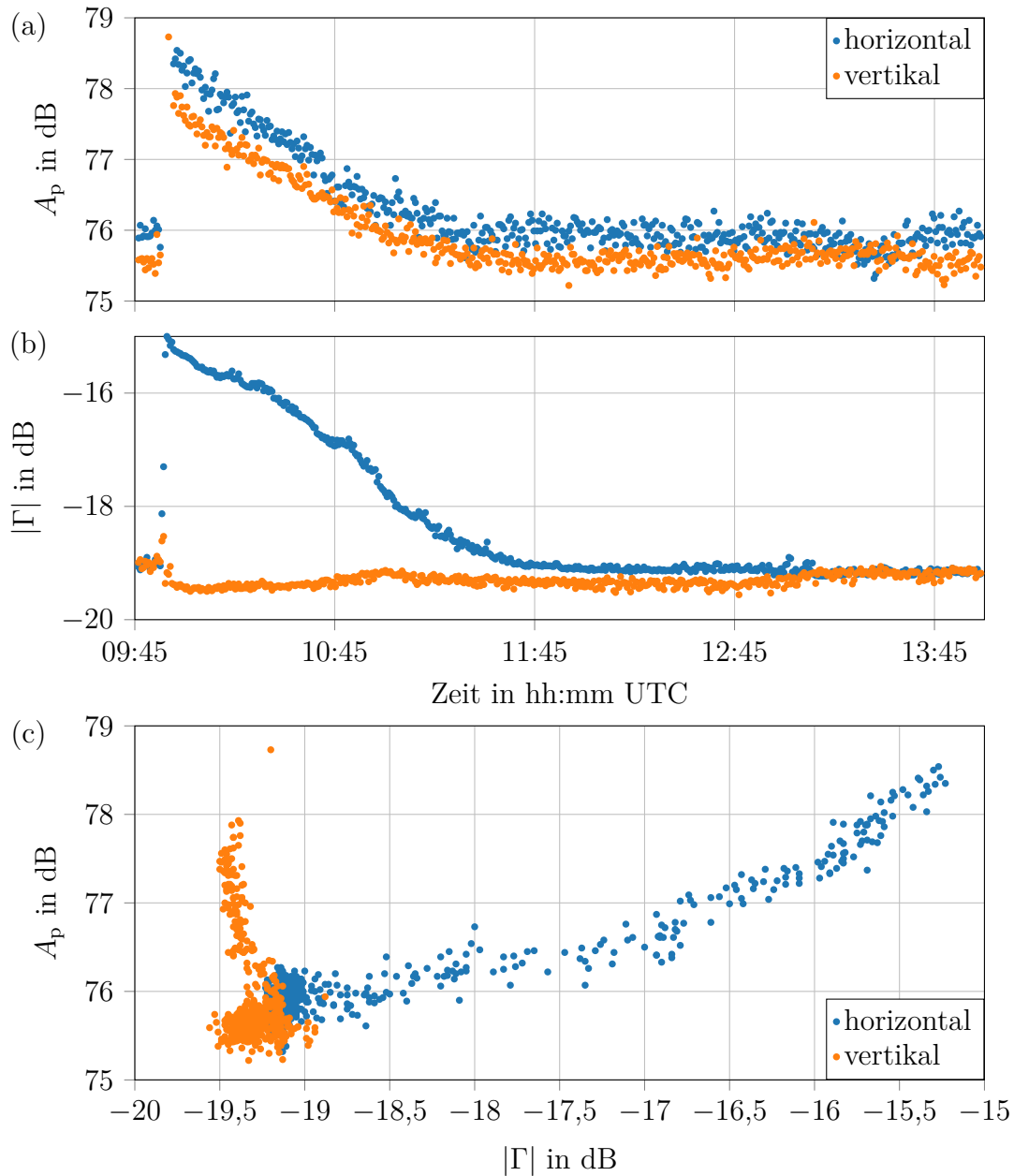
## C Messergebnisse zum Trocknungsprozess

### C.1 Antenne A (18,000 GHz)



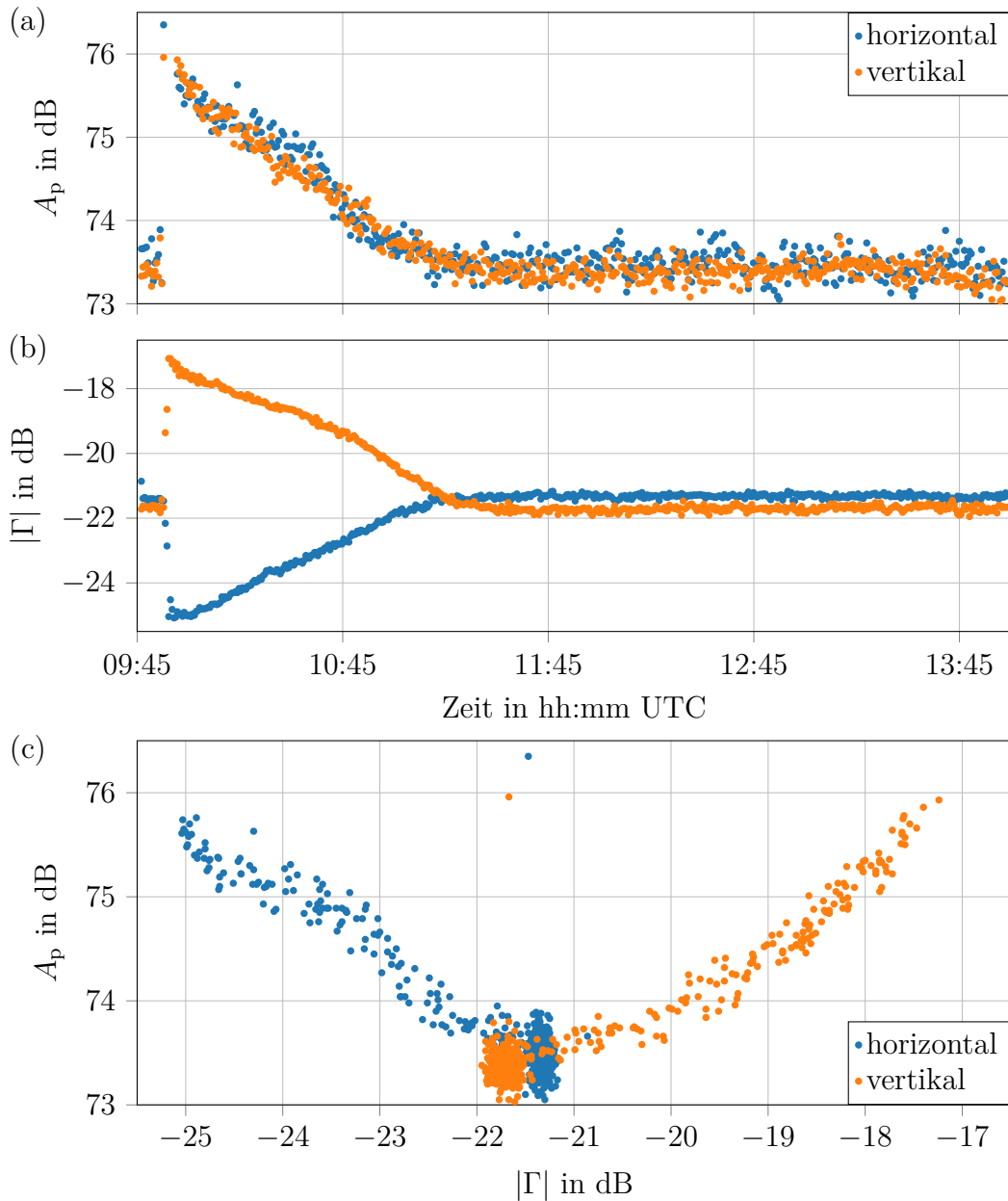
**Abb. C.1:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .

## C.2 Antenne B (22,235 GHz)



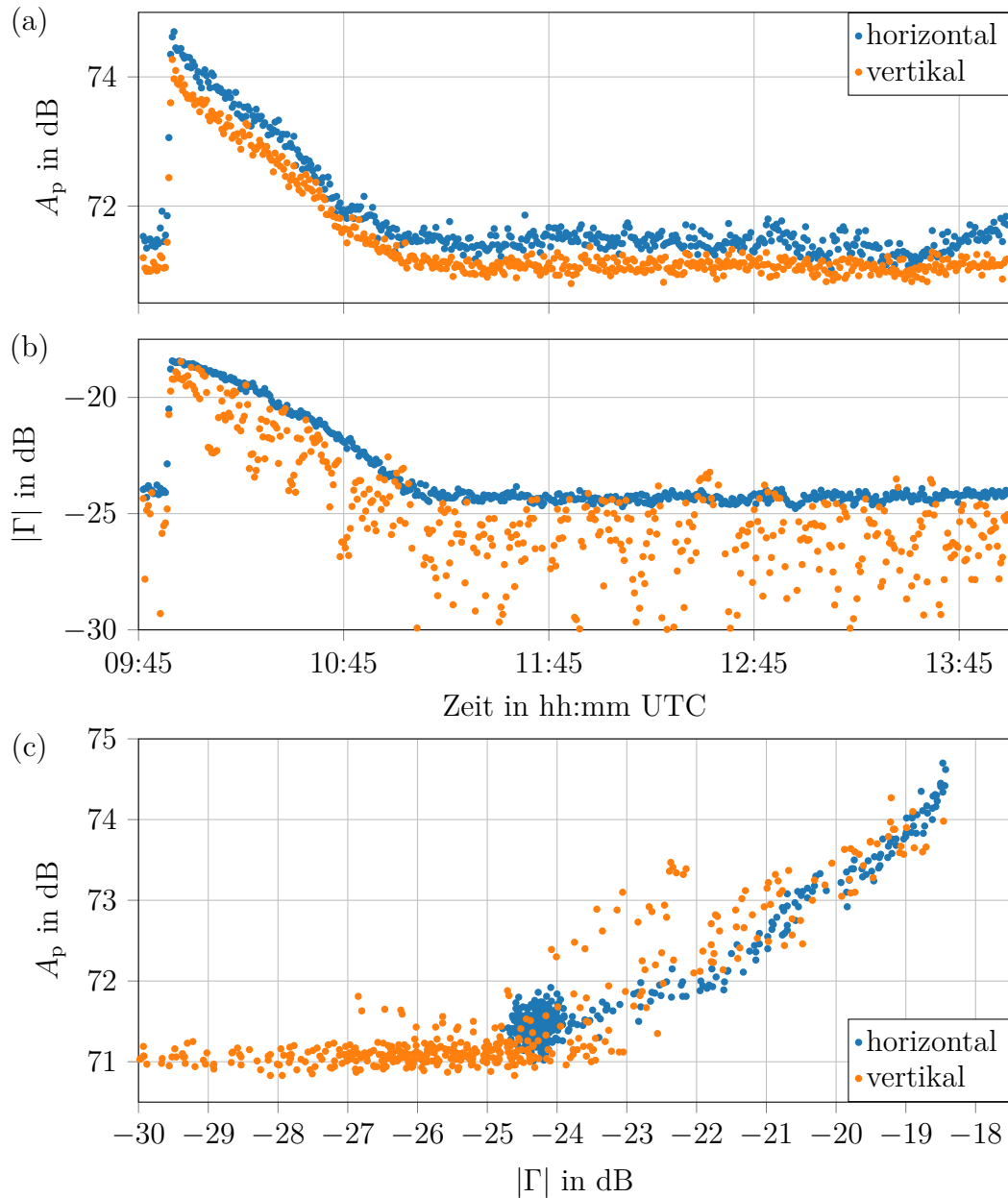
**Abb. C.2:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .

## C.3 Antenne C (25,375 GHz)



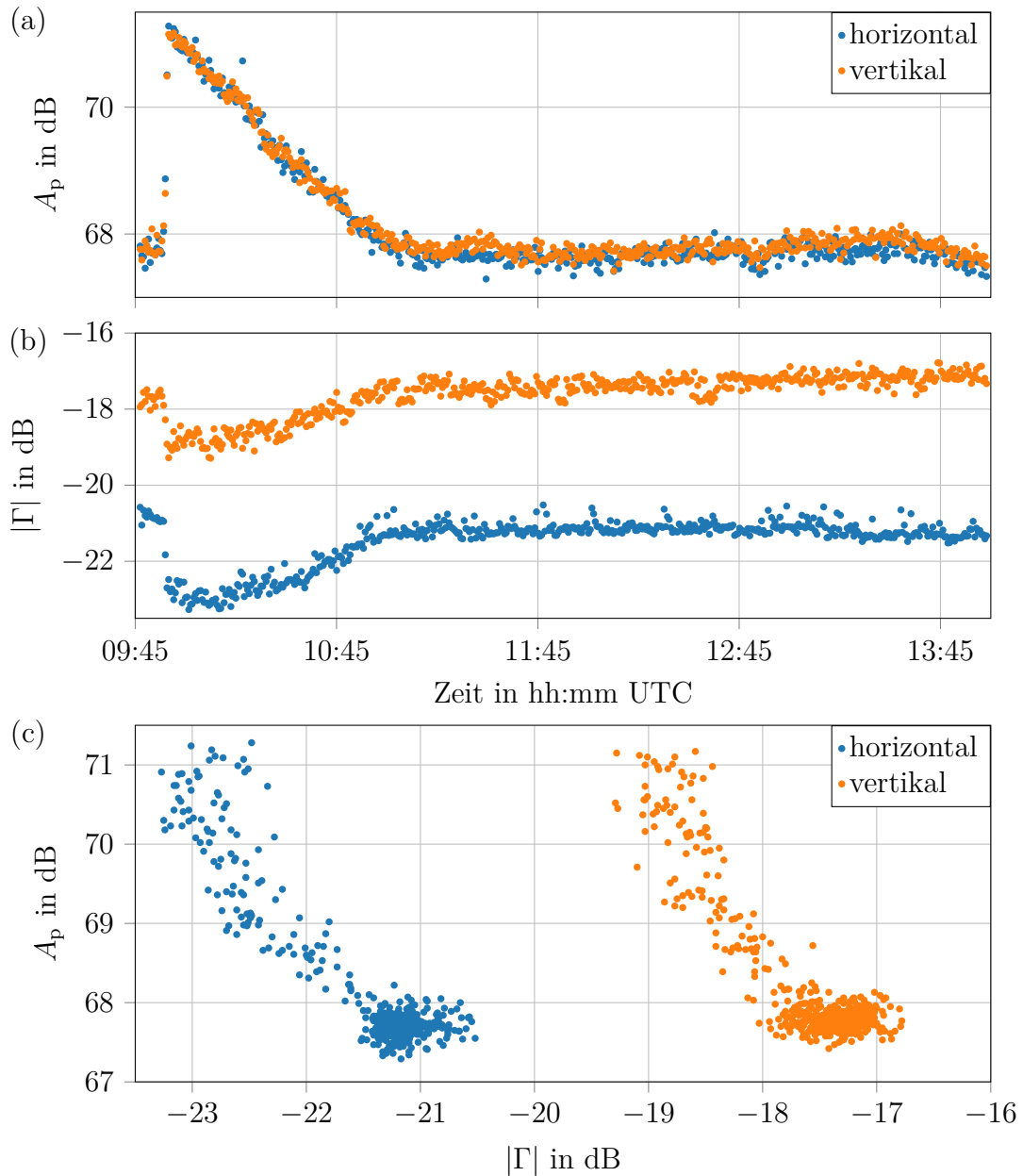
**Abb. C.3:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .

## C.4 Antenne D (28,500 GHz)



**Abb. C.4:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .

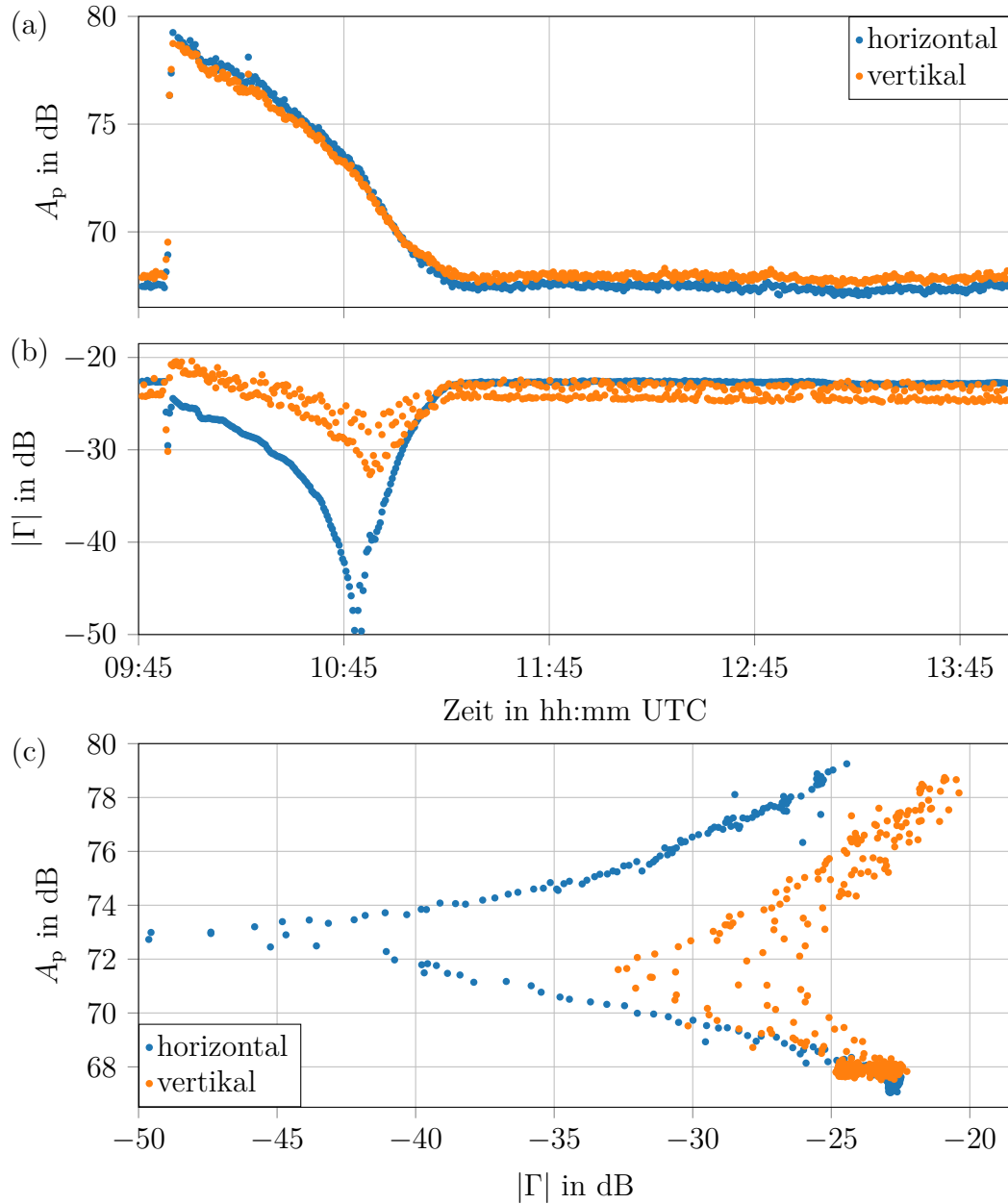
## C.5 Antenne E (34,800 GHz)



**Abb. C.5:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .



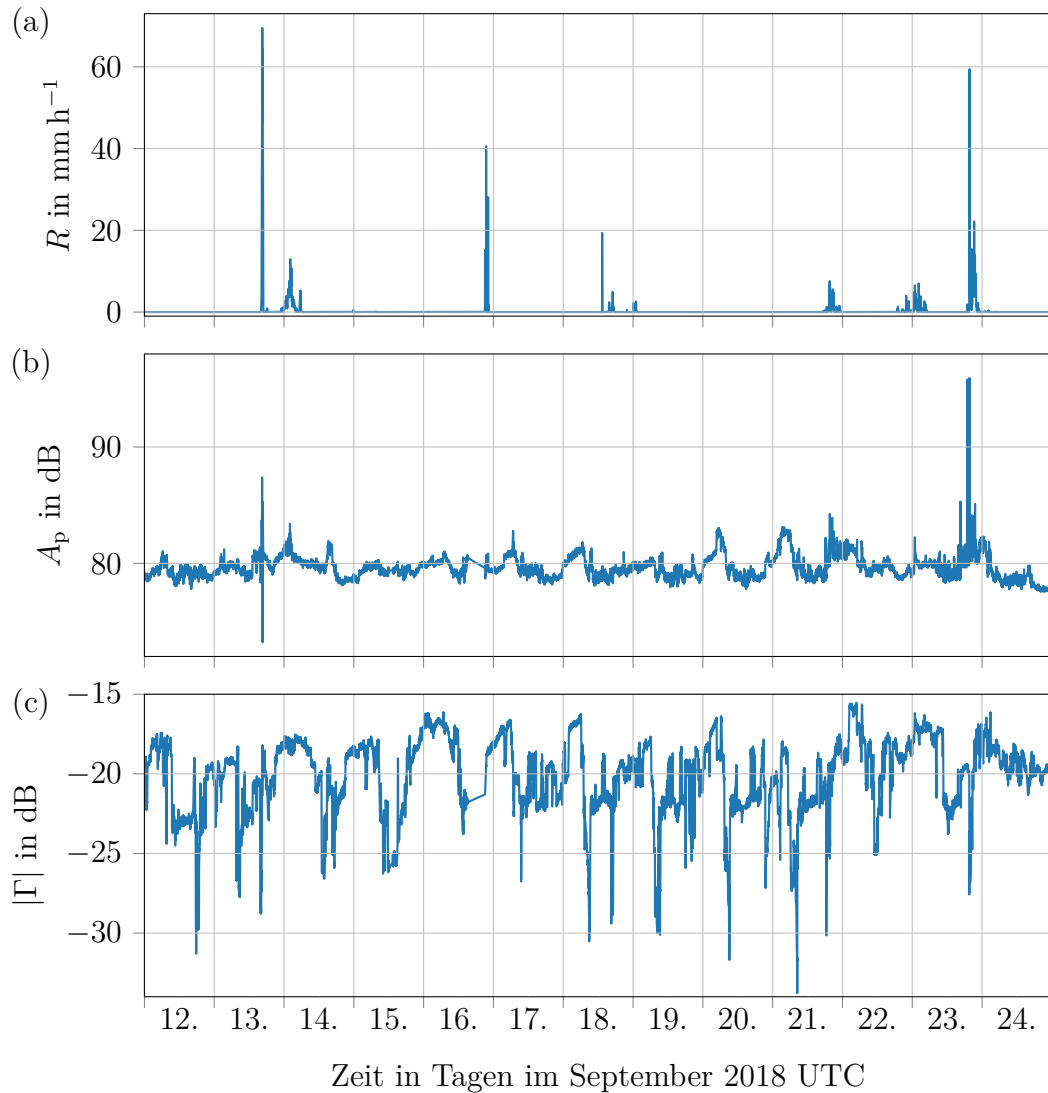
## C.6 Antenne F (38,500 GHz)



**Abb. C.6:** Zeitlicher Verlauf der Pfaddämpfung  $A_p$  in Grafikteil (a) und des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$  in Grafikteil (b), jeweils für die horizontale und vertikale Polarisation. Um 09:50 UTC wurde begonnen, die Radome mit destilliertem Wasser zu benetzen. Der Verlauf zeigt somit den Trocknungsvorgang der Antenne. (c) Die Pfaddämpfung  $A_p$  als eine Funktion von dem Eingangsreflexionsfaktor  $|\Gamma|$ .

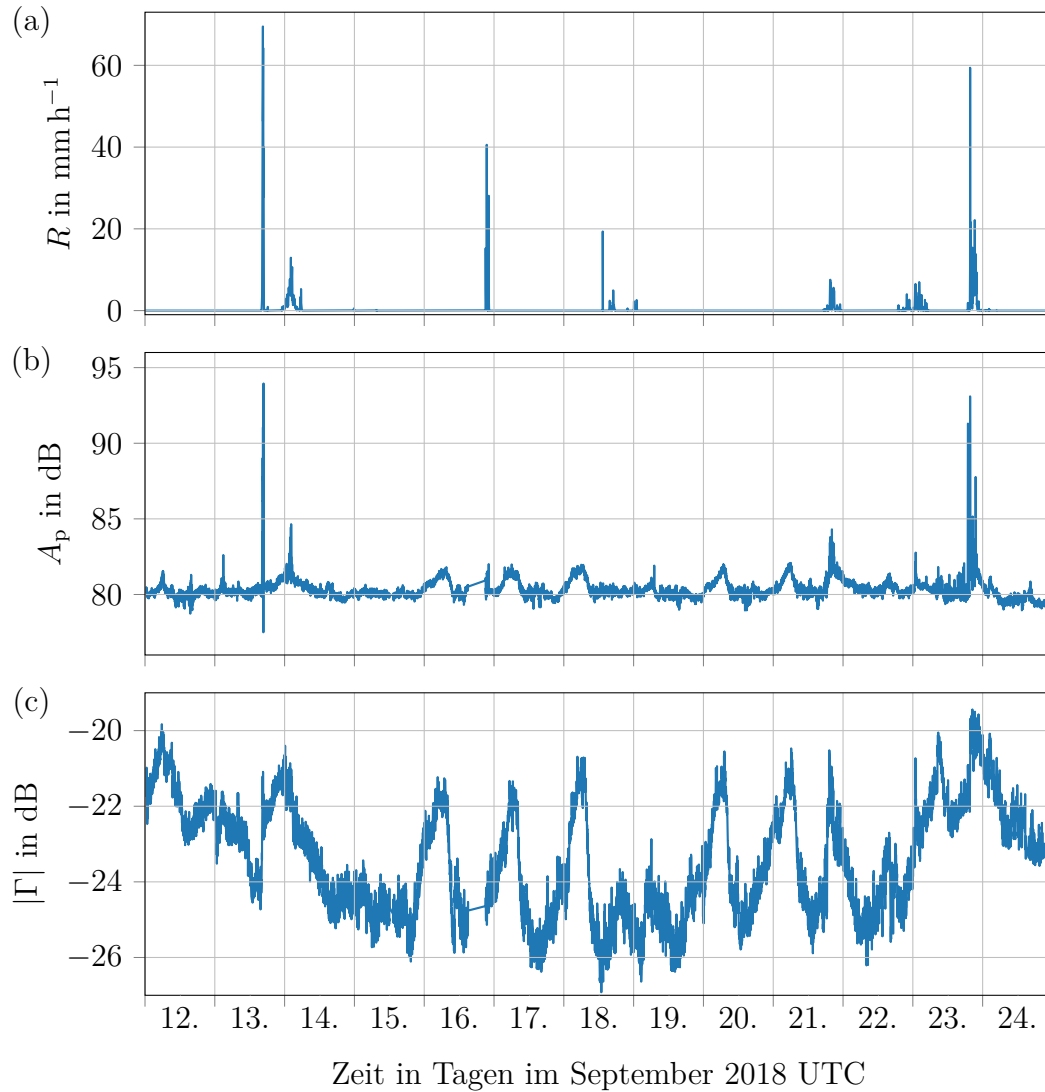
## D Messergebnisse zur Langzeit-Messung

### D.1 Antenne A (18,000 GHz) horizontal



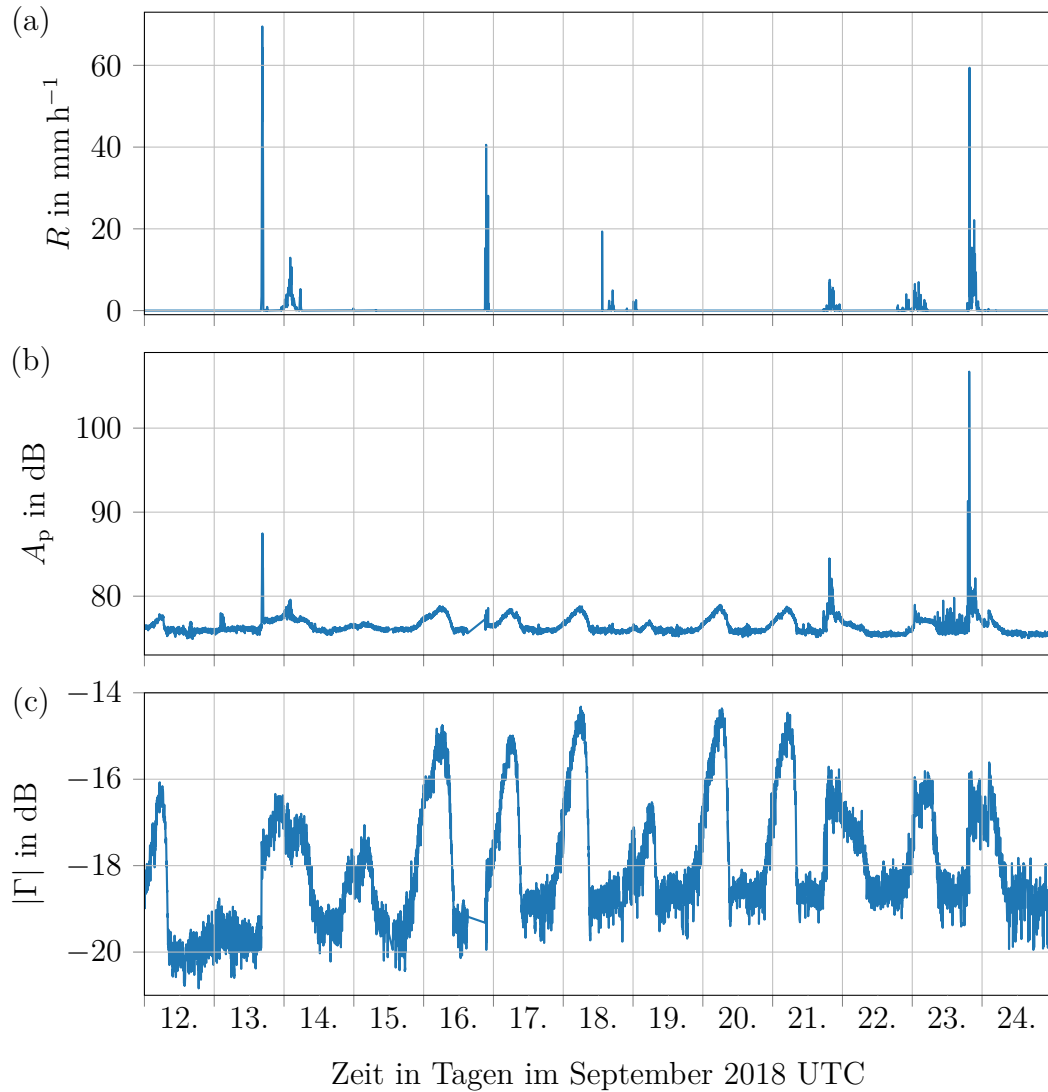
**Abb. D.7:** Verlauf der Messergebnisse bei 18,000 GHz (Antenne A), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.2 Antenne A (18,000 GHz) vertikal



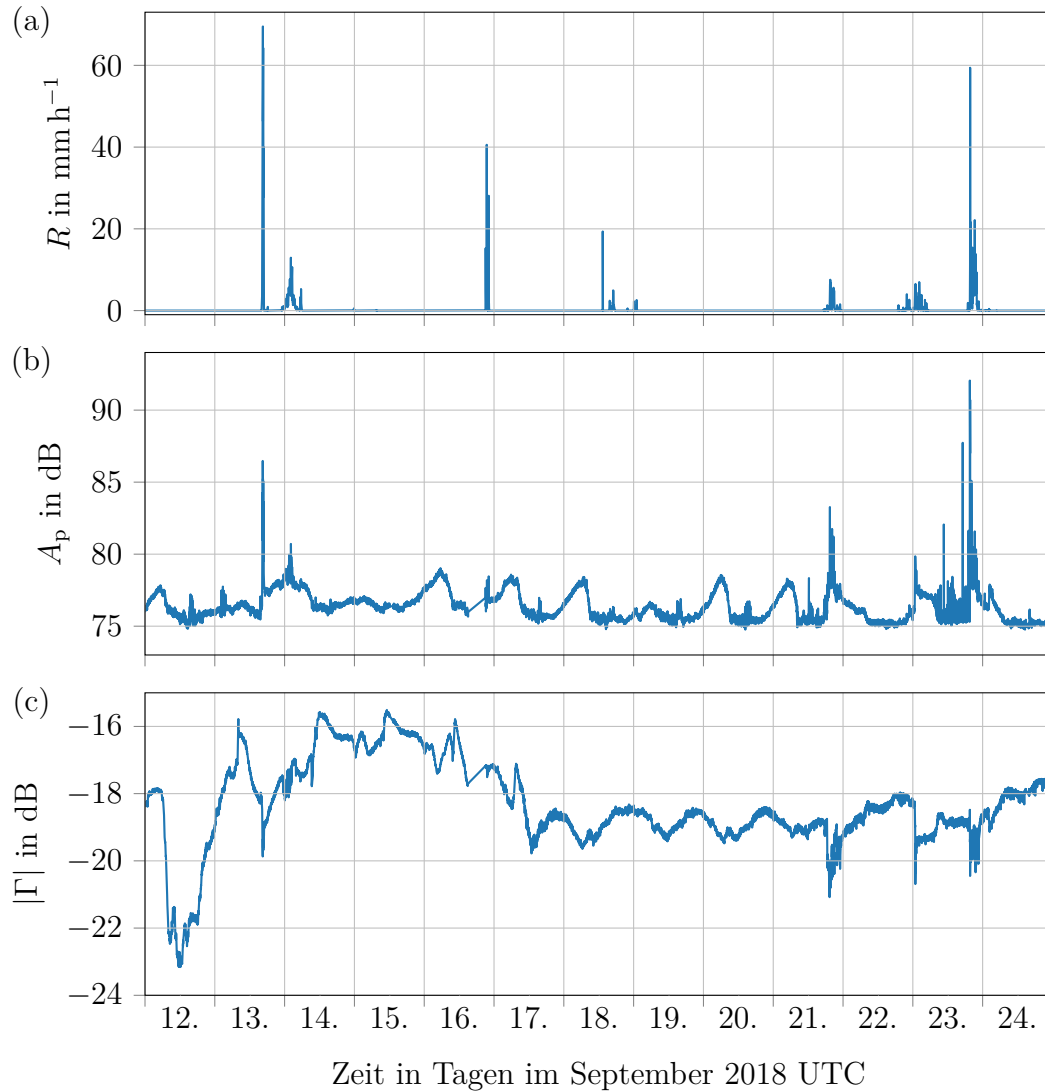
**Abb. D.8:** Verlauf der Messergebnisse bei 18,000 GHz (Antenne A), gemessen mit einer vertikalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.3 Antenne B (22,235 GHz) horizontal



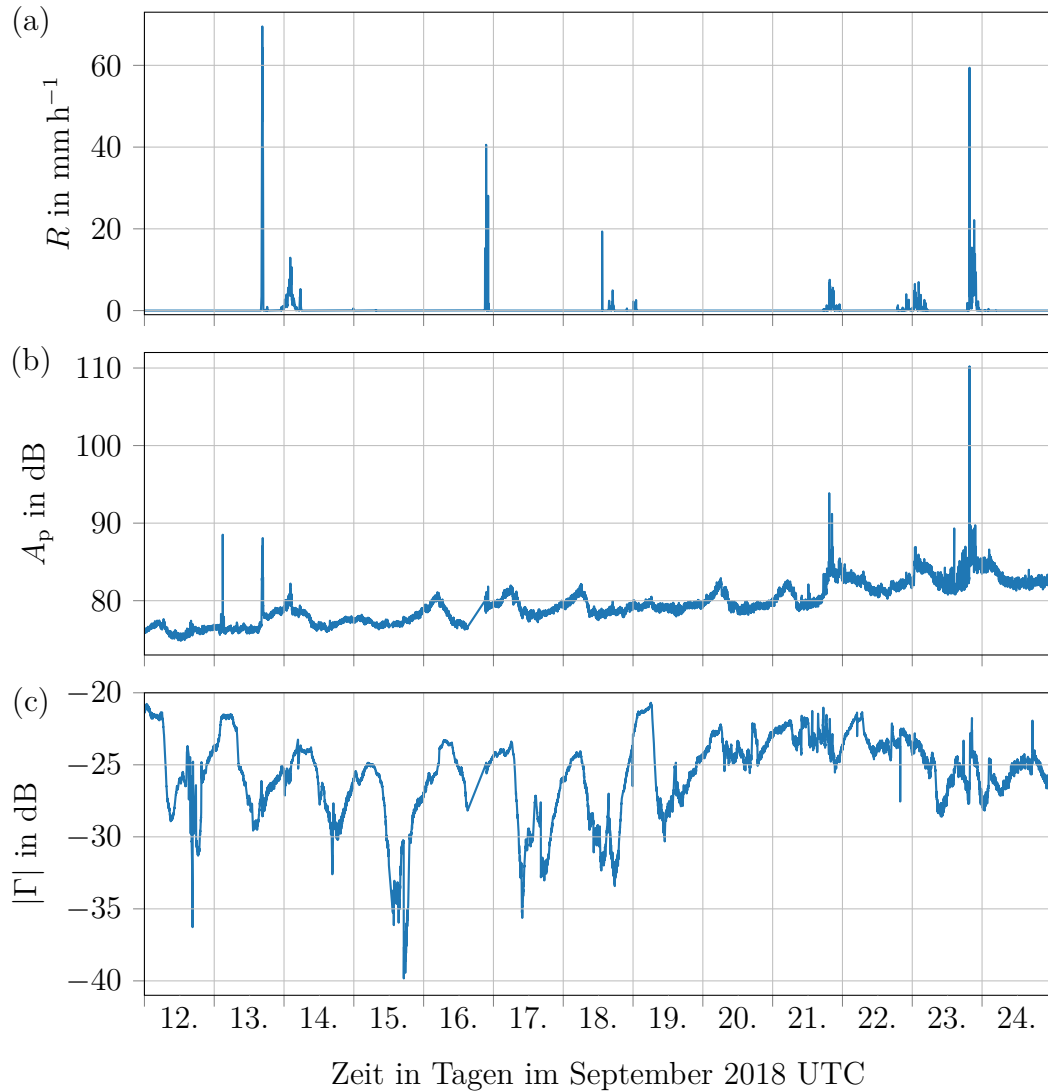
**Abb. D.9:** Verlauf der Messergebnisse bei 22,235 GHz (Antenne B), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.4 Antenne B (22,235 GHz) vertikal



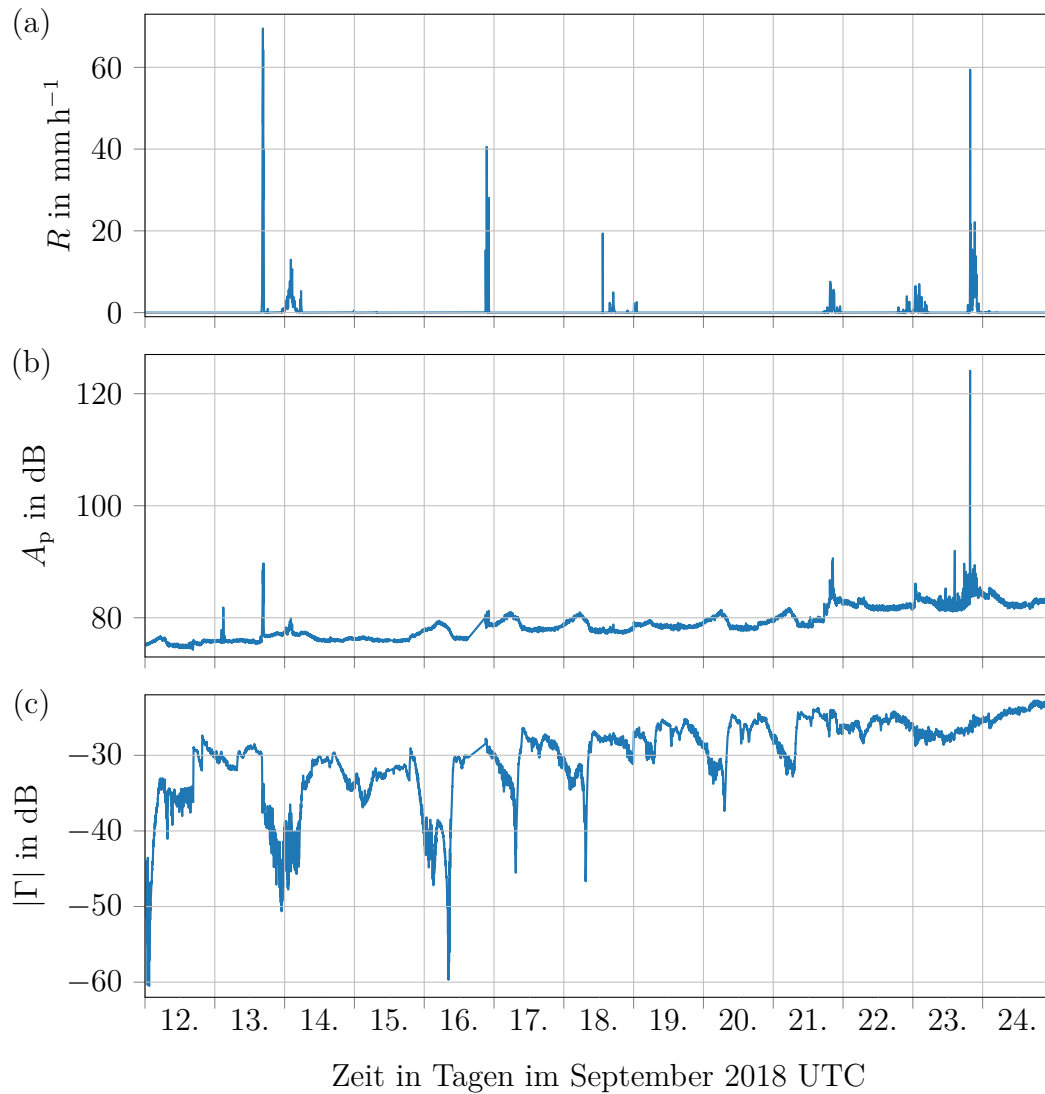
**Abb. D.10:** Verlauf der Messergebnisse bei 22,235 GHz (Antenne B), gemessen mit einer vertikal Polarisierung im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.5 Antenne C (25,375 GHz) horizontal



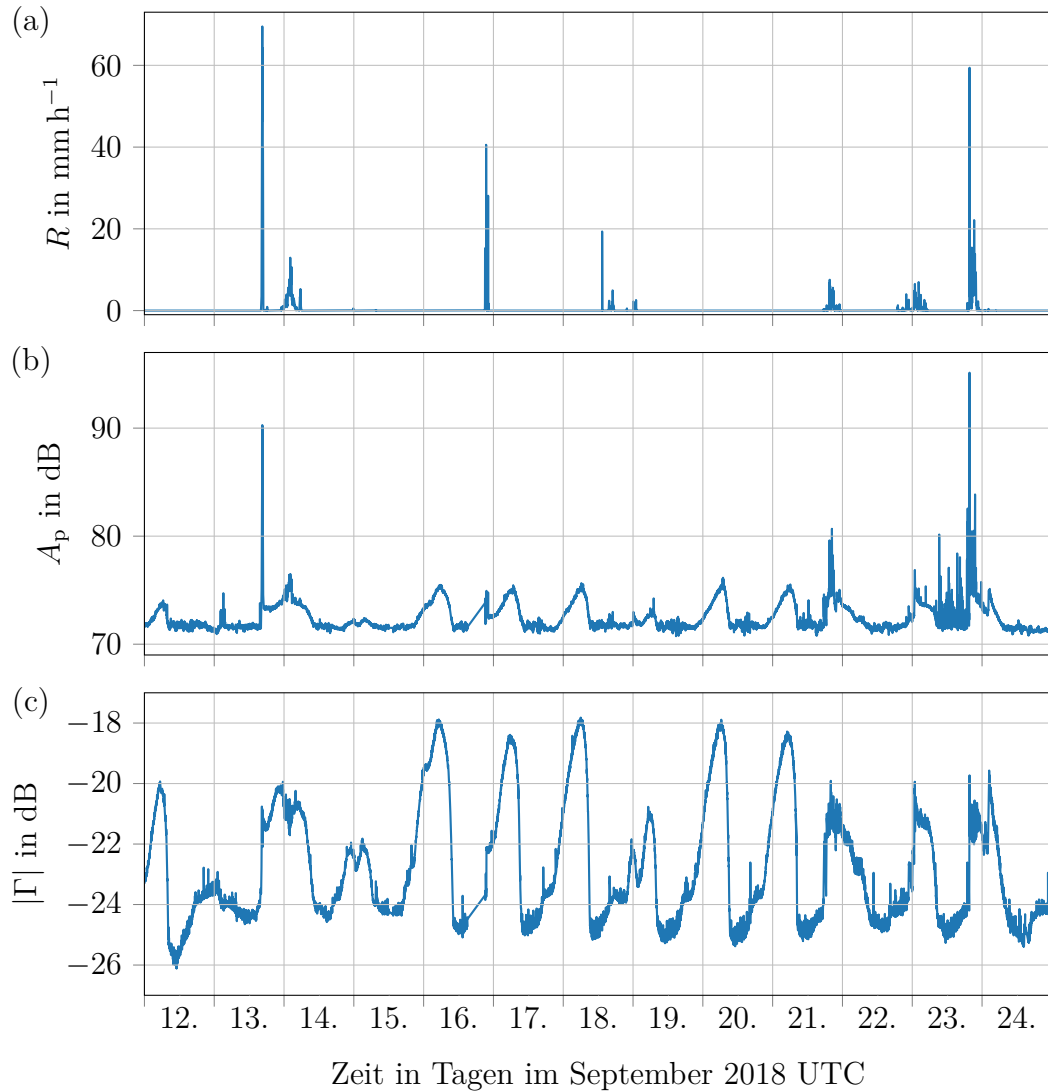
**Abb. D.11:** Verlauf der Messergebnisse bei 25,375 GHz (Antenne C), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.6 Antenne C (25,375 GHz) vertikal



**Abb. D.12:** Verlauf der Messergebnisse bei 25,375 GHz (Antenne C), gemessen mit einer vertikal Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

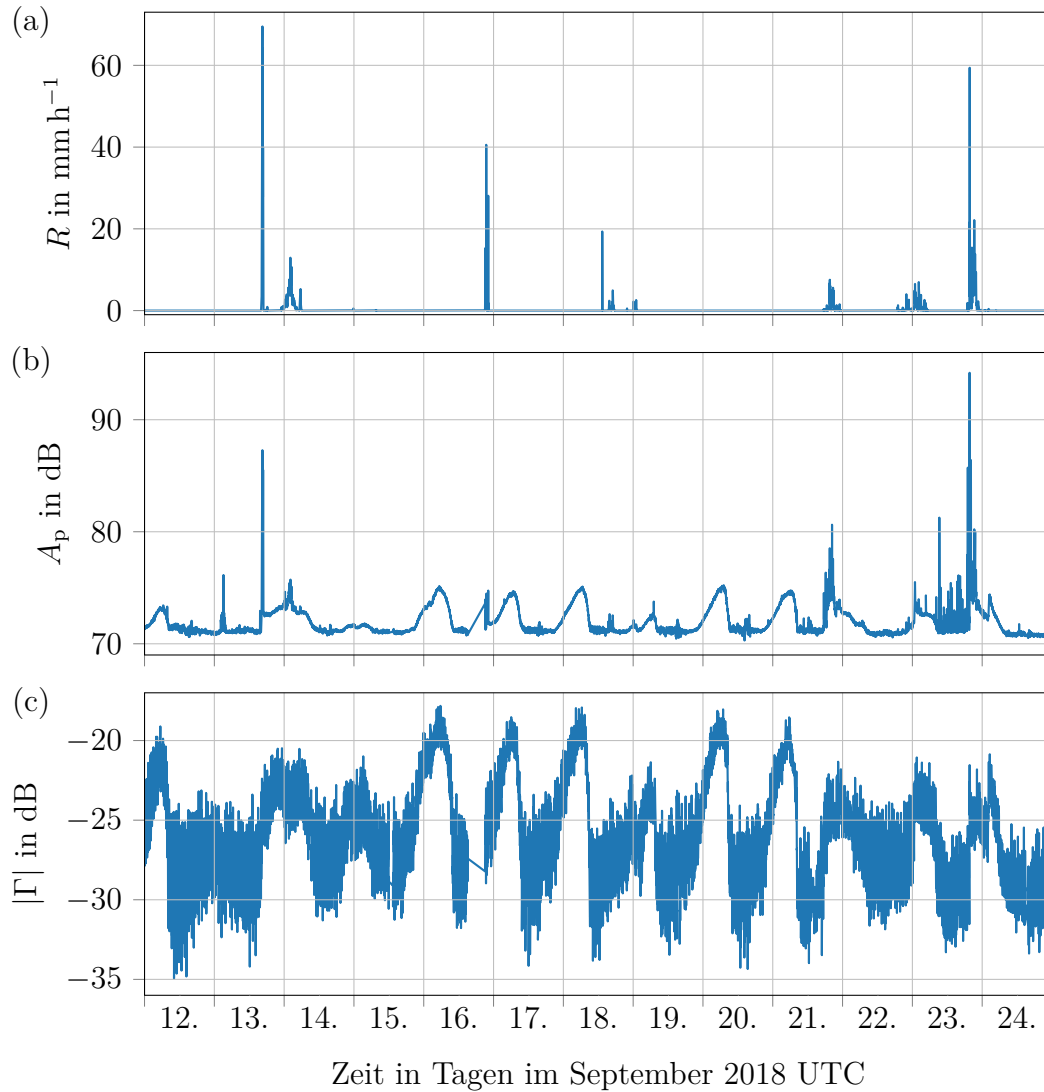
## D.7 Antenne D (28,500 GHz) horizontal



**Abb. D.13:** Verlauf der Messergebnisse bei 28,5 GHz (Antenne D), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

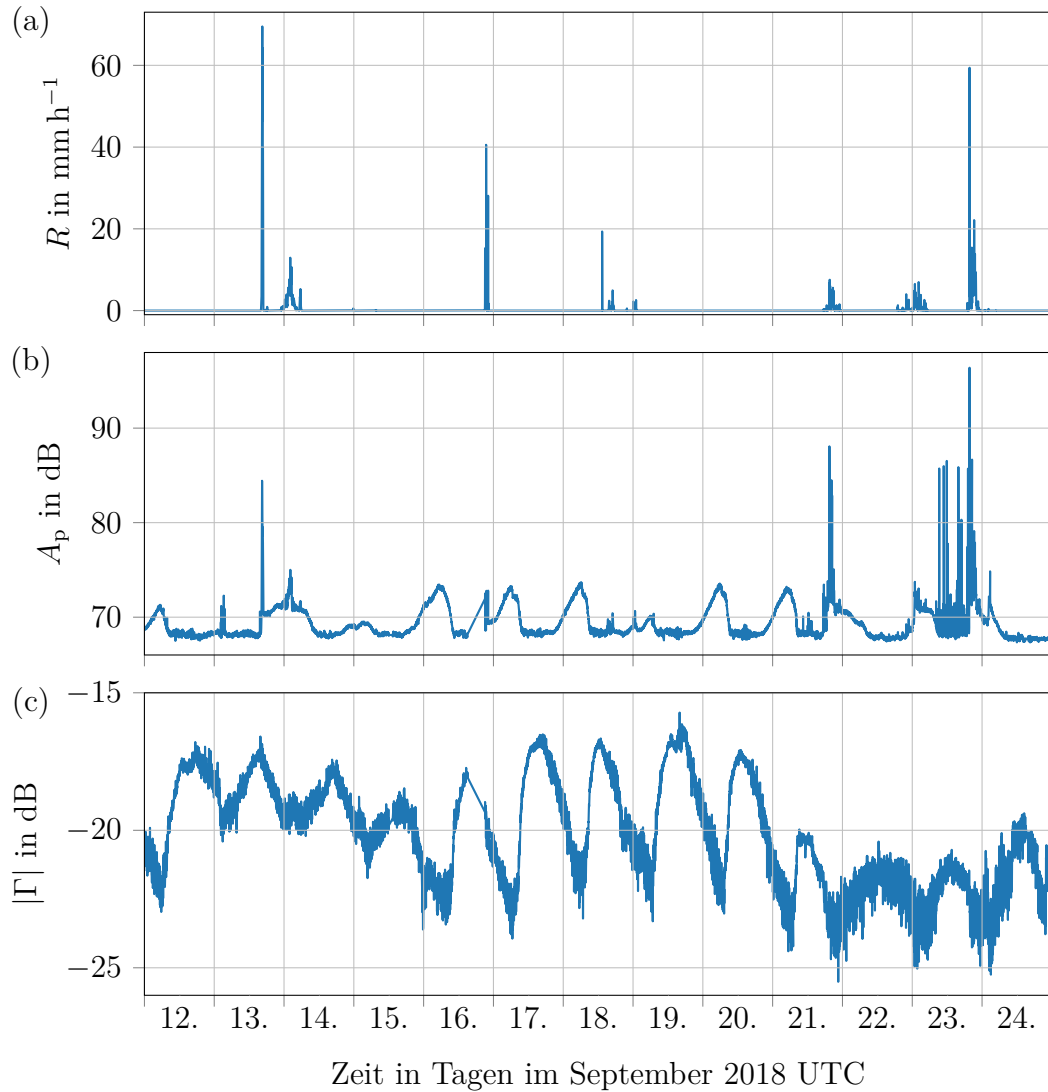


## D.8 Antenne D (28,500 GHz) vertikal



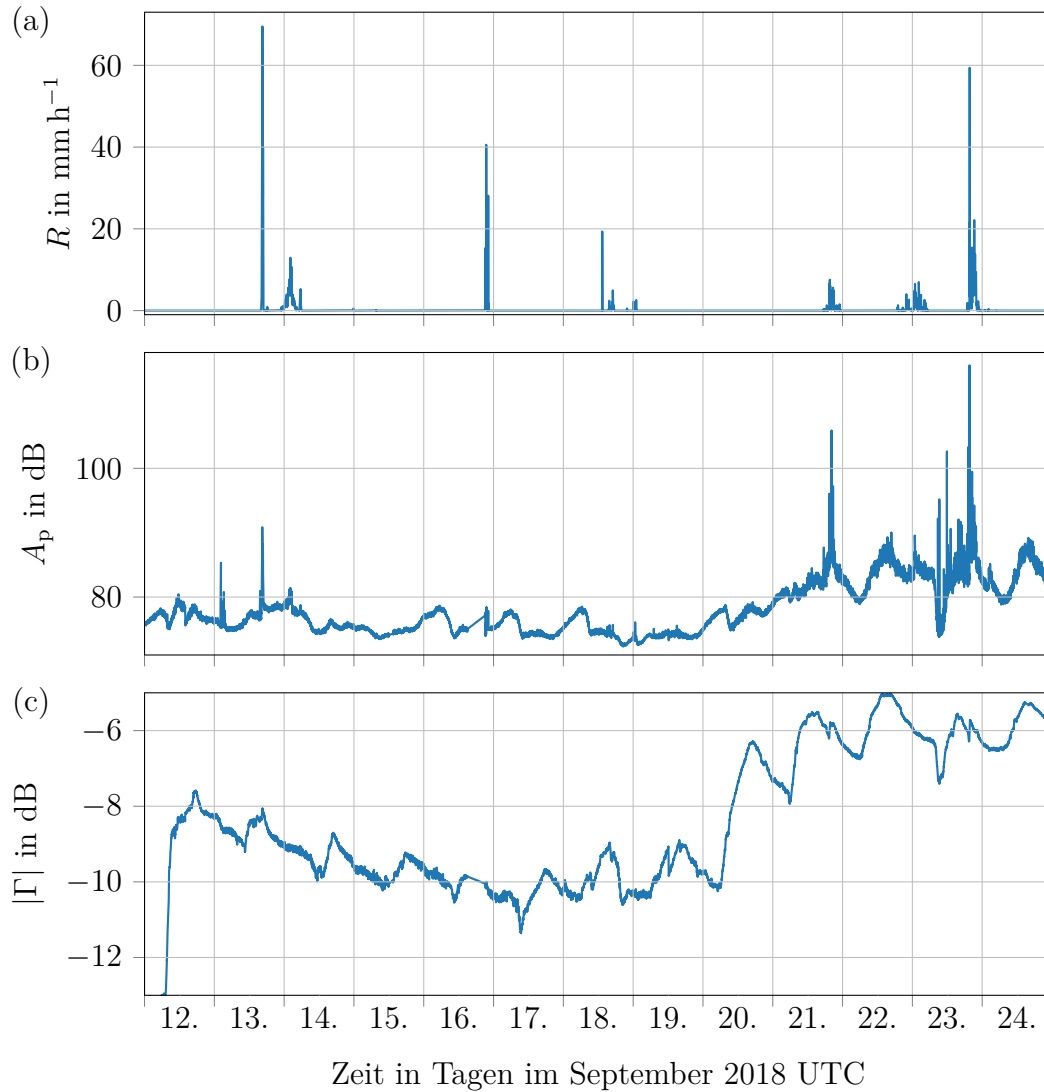
**Abb. D.14:** Verlauf der Messergebnisse bei 28,5 GHz (Antenne D), gemessen mit einer vertikalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.9 Antenne E (34,800 GHz) horizontal



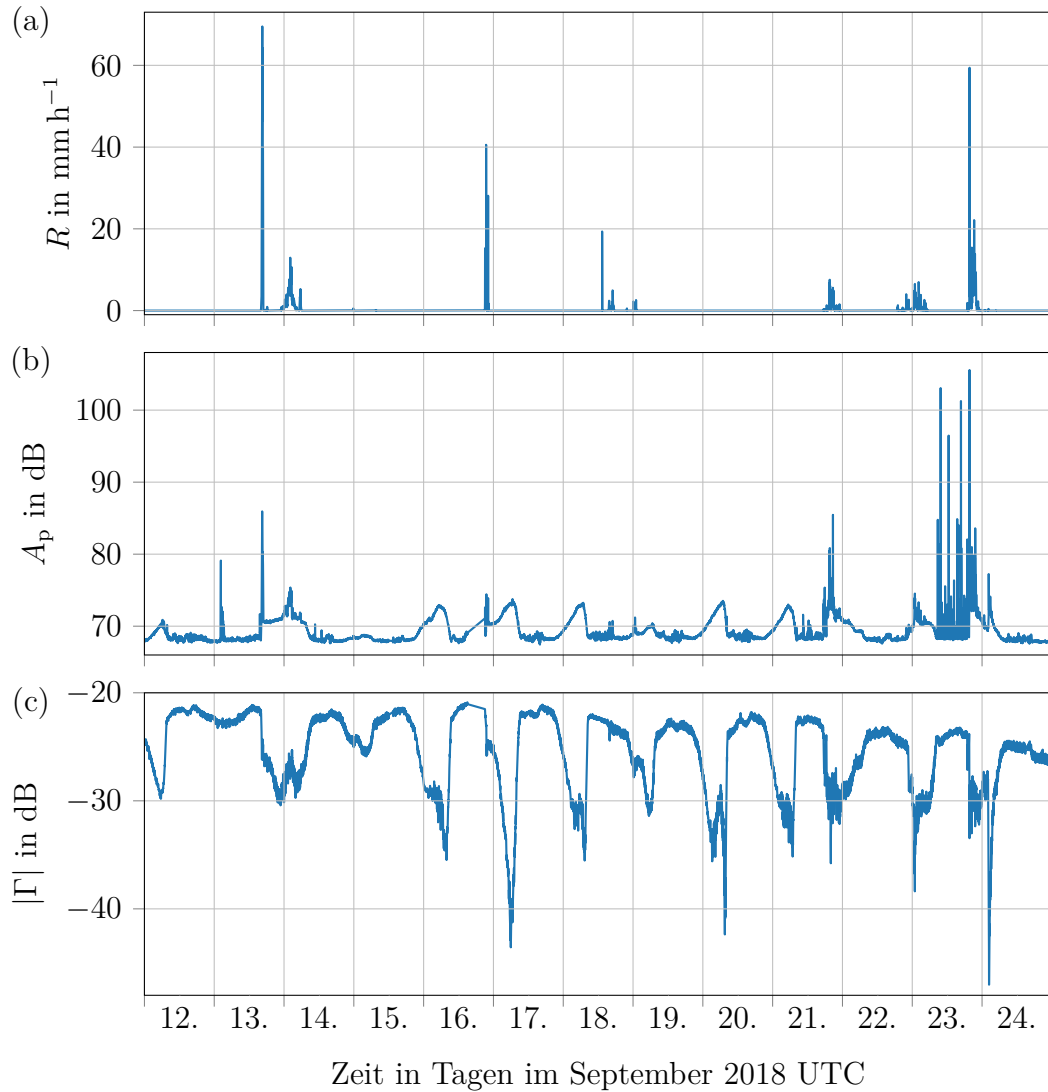
**Abb. D.15:** Verlauf der Messergebnisse bei 34,800 GHz (Antenne E), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.10 Antenne E (34,800 GHz) vertikal



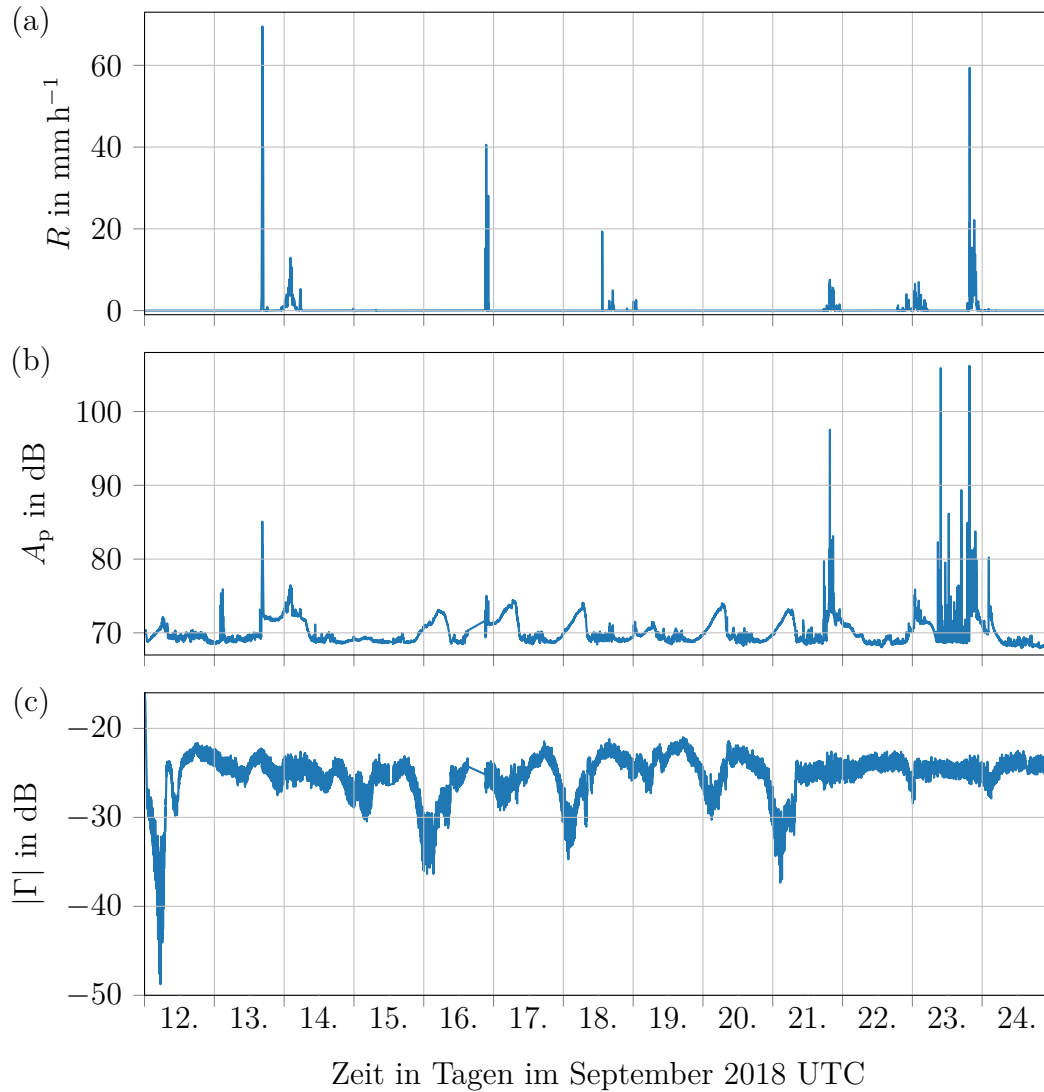
**Abb. D.16:** Verlauf der Messergebnisse bei 34,800 GHz (Antenne E), gemessen mit einer vertikalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## D.11 Antenne F (38,500 GHz) horizontal



**Abb. D.17:** Verlauf der Messergebnisse bei 38,500 GHz (Antenne F), gemessen mit einer horizontalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

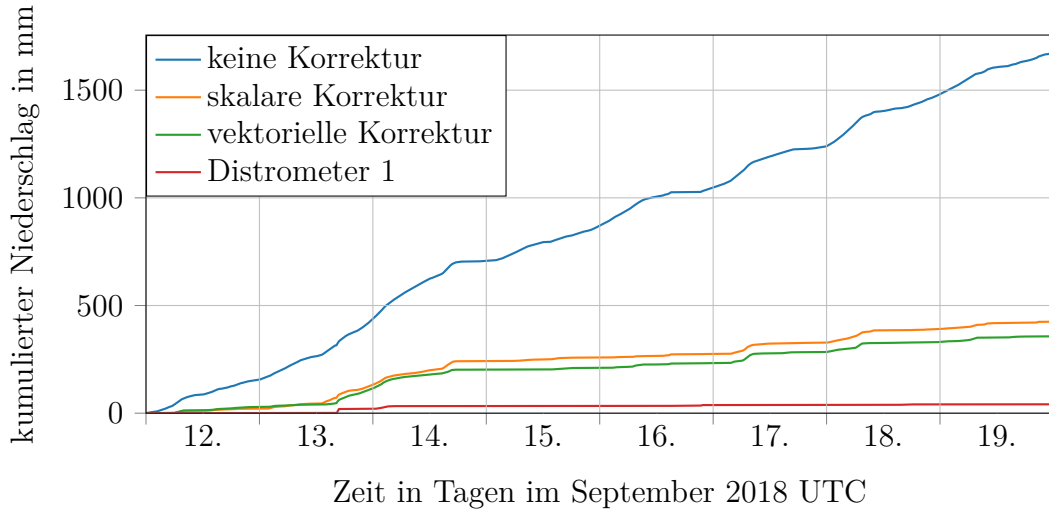
## D.12 Antenne F (38,500 GHz) vertikal



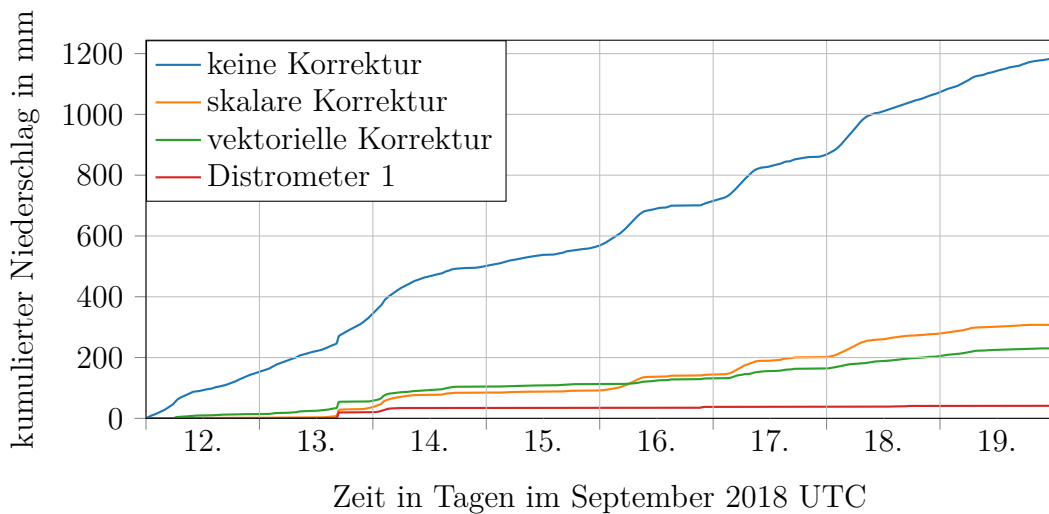
**Abb. D.18:** Verlauf der Messergebnisse bei 38,500 GHz (Antenne F), gemessen mit einer vertikalen Polarisation im Zeitraum vom 12. September 00:00 UTC bis zum 25. September 00:00 UTC: (a) zeigt die Regenintensität  $R$  gemessen mit dem Distrometer 1. (b) zeigt die Pfaddämpfung  $A_p$  und (c) zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors  $|\Gamma|$ , jeweils gemessen mit dem Millimeterwellen-Instrument.

## E kumulierte Niederschlagsmenge über 8 Tage

### E.1 Antenne A (18,000 GHz)



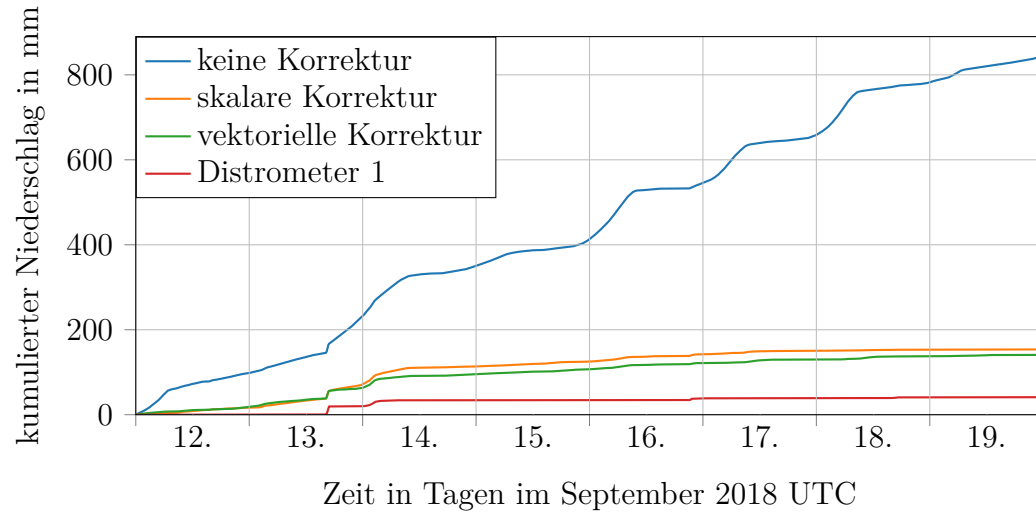
(a) horizontale Polarisation



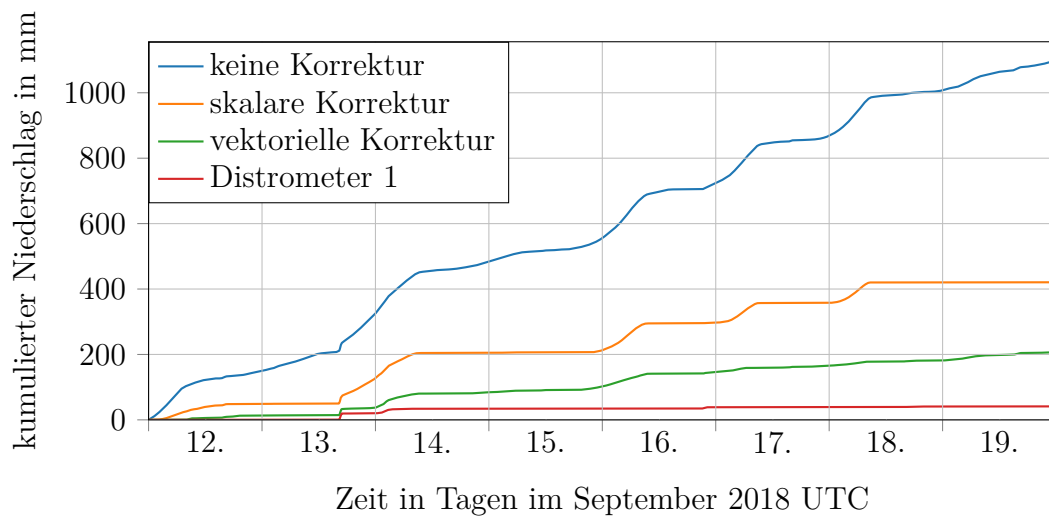
(b) vertikale Polarisation

**Abb. E.19:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 18,000 GHz (Antenne A bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisation) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

## E.2 Antenne B (22,235 GHz)



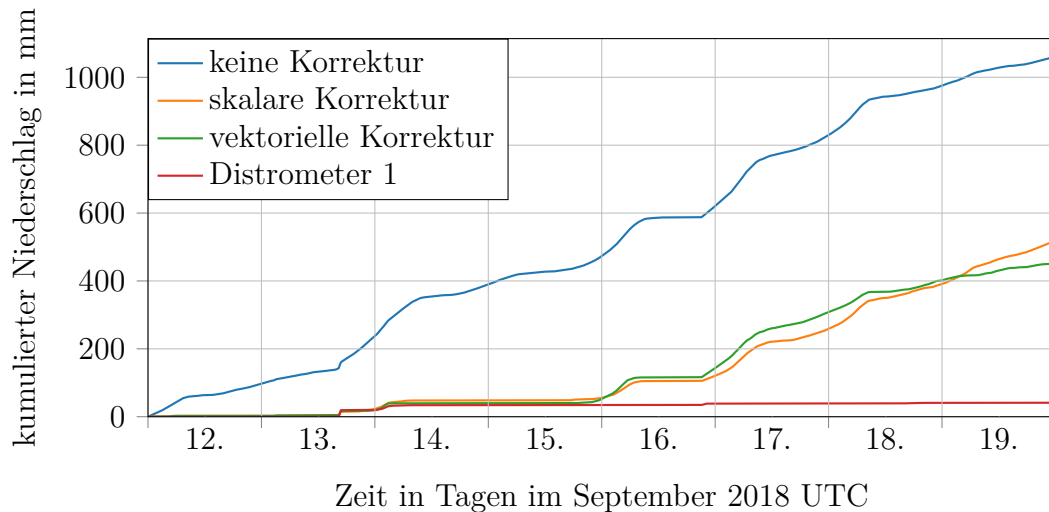
(a) horizontale Polarisierung



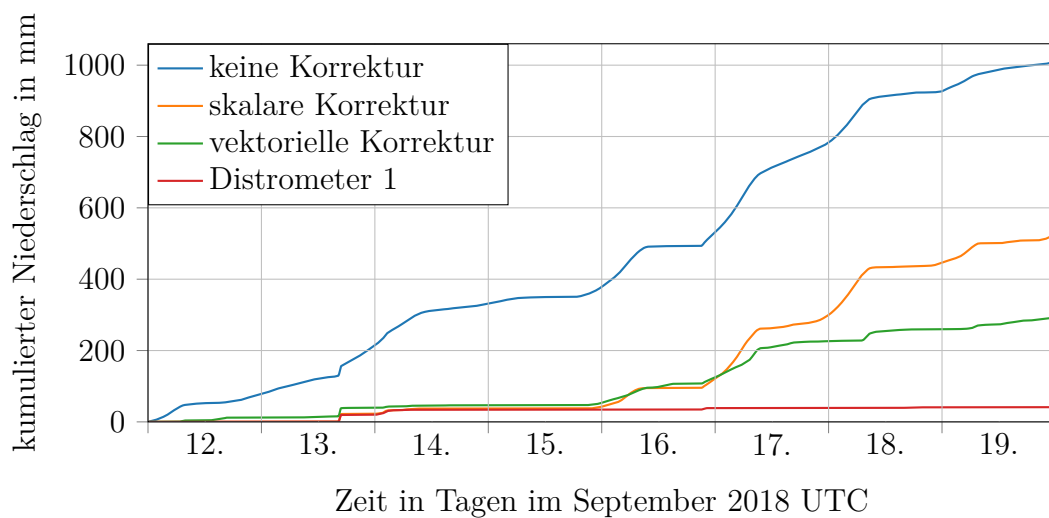
(b) vertikale Polarisierung

**Abb. E.20:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 22,235 GHz (Antenne B bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisierung) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

### E.3 Antenne C (25,375 GHz)



(a) horizontale Polarisation

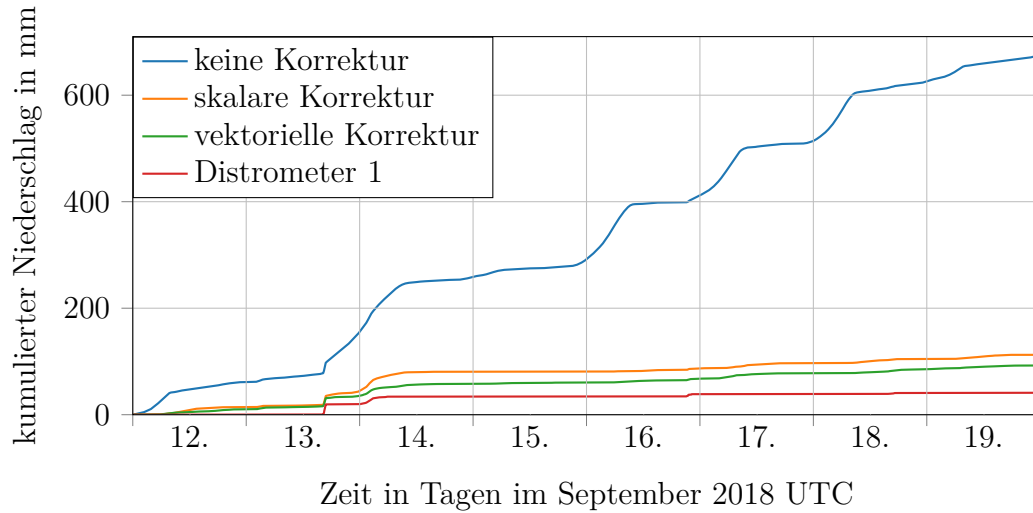


(b) vertikale Polarisation

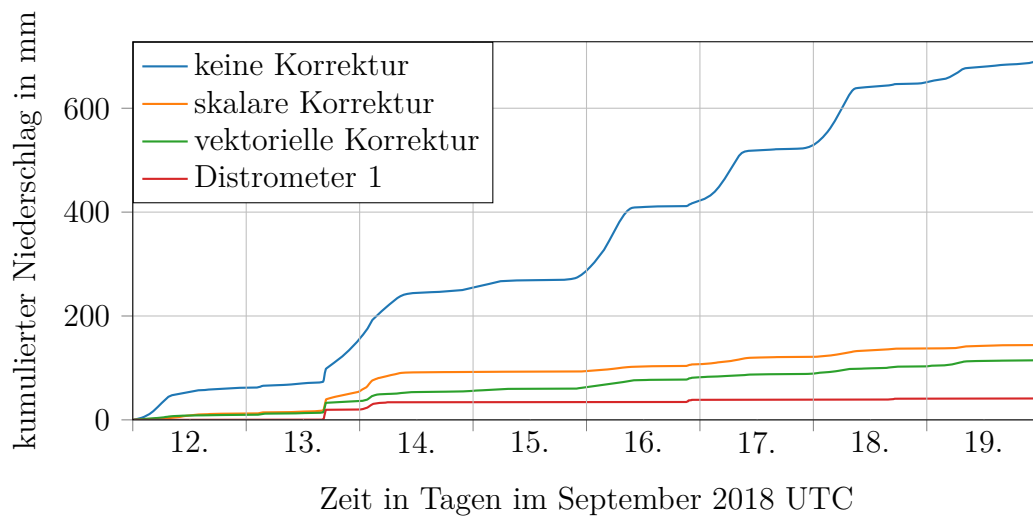
**Abb. E.21:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 25,375 GHz (Antenne C bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisation) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.



### E.4 Antenne D (28,500 GHz)

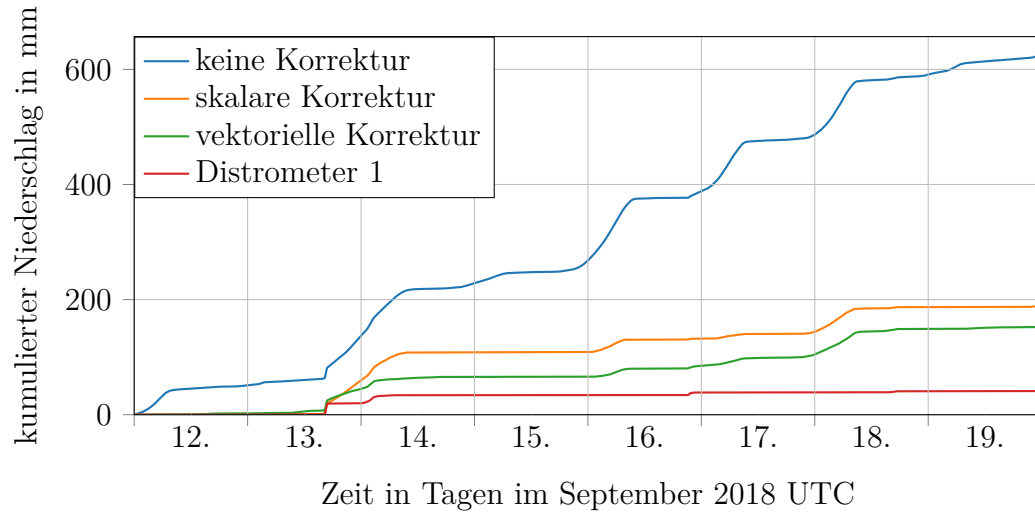


(a) horizontale Polarisierung

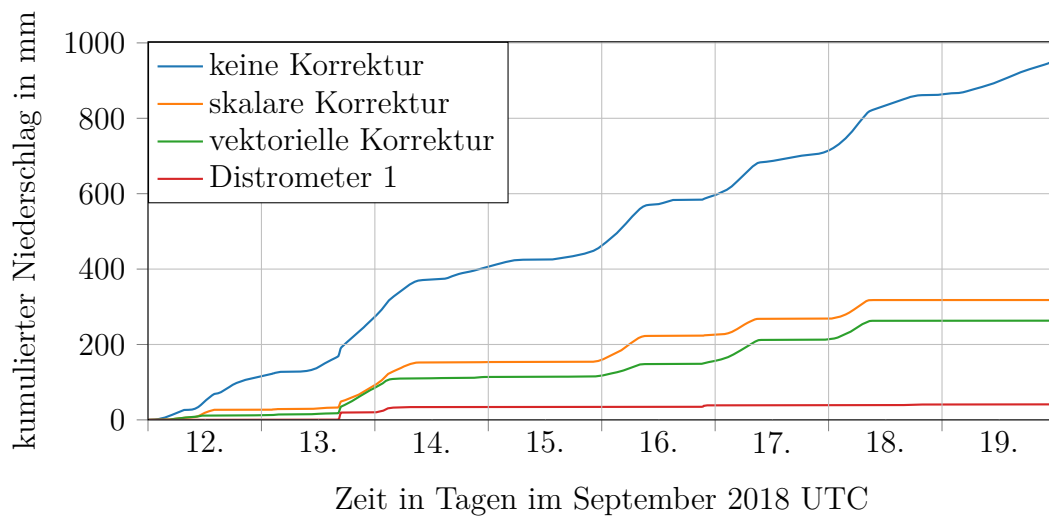


(b) vertikale Polarisierung

**Abb. E.22:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 28,500 GHz (Antenne D bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisierung) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

**E.5 Antenne E (34,800 GHz)**

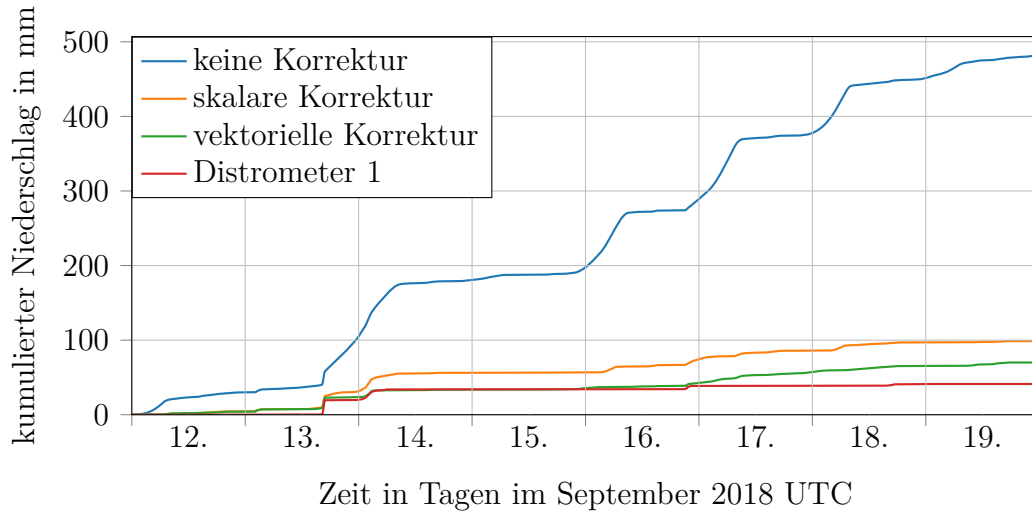
(a) horizontale Polarisation



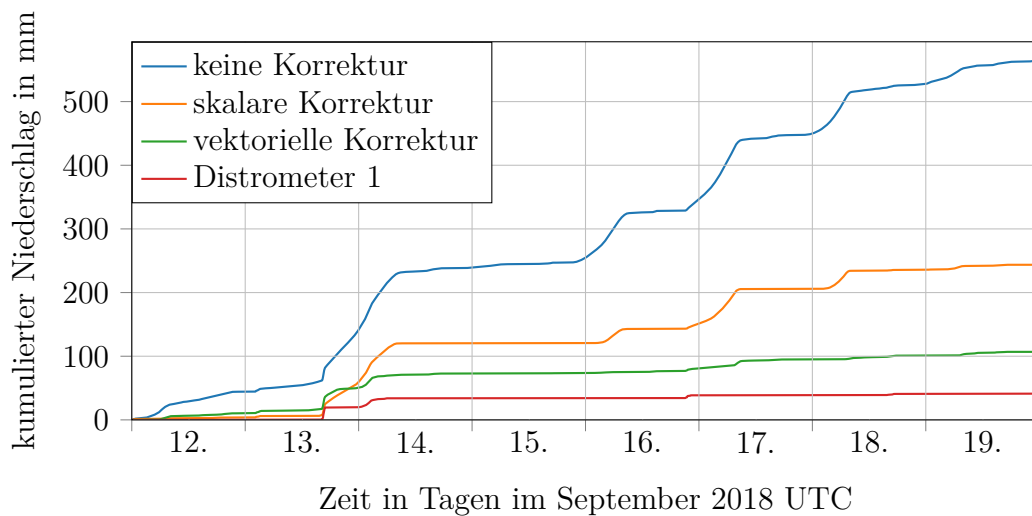
(b) vertikale Polarisation

**Abb. E.23:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 34,800 GHz (Antenne E bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisation) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

## E.6 Antenne F (38,500 GHz)



(a) horizontale Polarisierung

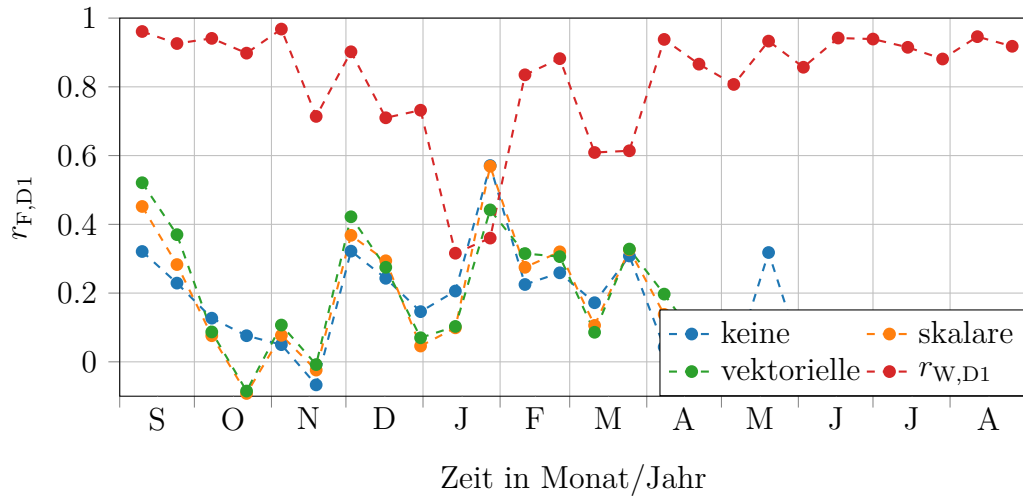


(b) vertikale Polarisierung

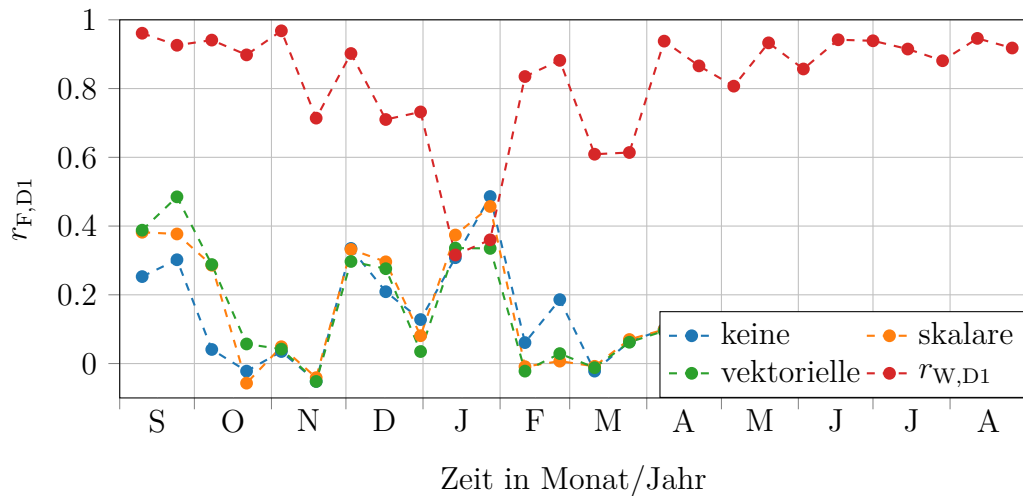
**Abb. E.24:** Verlauf der kumulierten Niederschlagsmenge über die Zeit, ermittelt mit dem Feldexperiment bei 38,500 GHz (Antenne F bei (a) horizontaler und (b) vertikaler Polarisierung) einmal ohne Korrektur, einmal mit der skalaren Korrektur und einmal mit der vektoriellen Korrektur. Als Vergleich dient die kumulierte Niederschlagsmenge, gemessen mit dem Distrometer 1.

## F Korrelationskoeffizient über ein Jahr

### F.1 Antenne A (18,000 GHz)



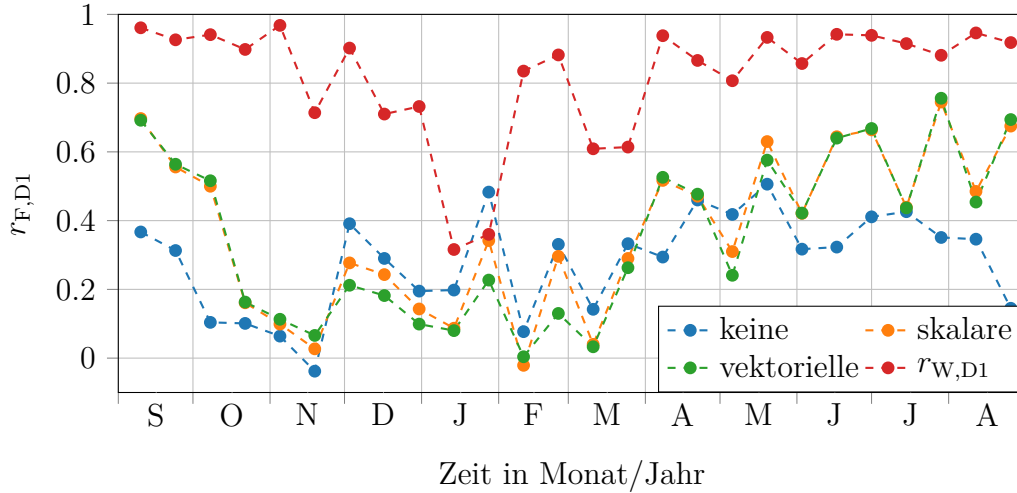
(a) horizontale Polarisation



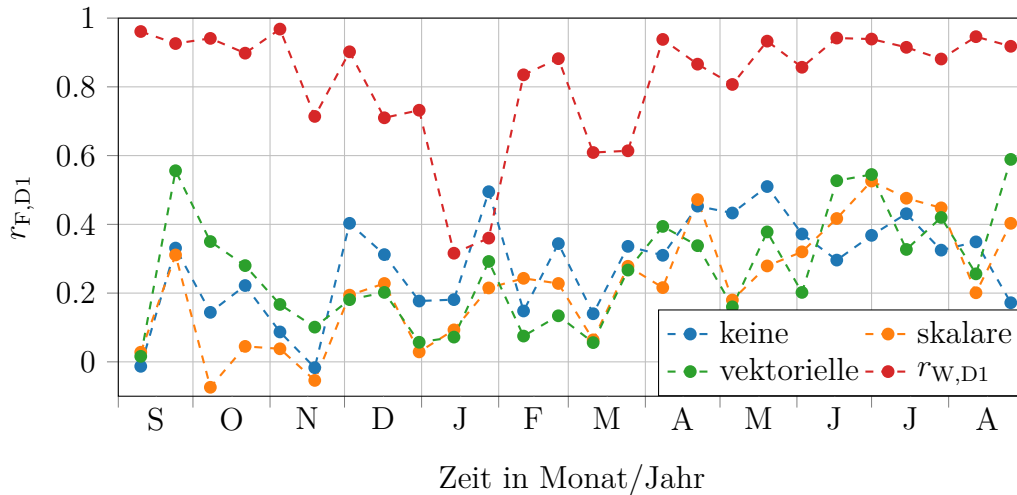
(b) vertikale Polarisation

**Abb. F.25:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 18 GHz (Antenne A) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.

F.2 Antenne B (22,235 GHz)



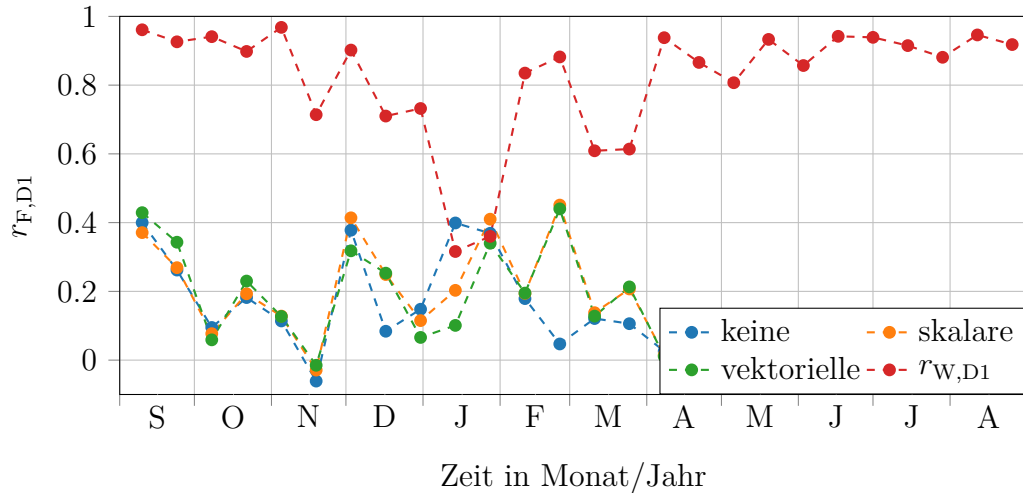
(a) horizontale Polarisation



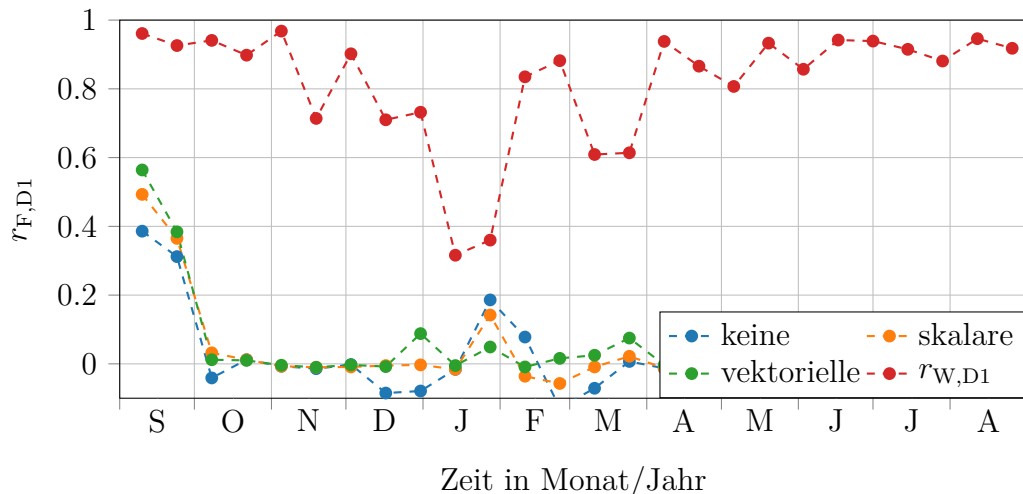
(b) vertikale Polarisation

**Abb. F.26:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 22,235 GHz (Antenne B) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.

### F.3 Antenne C (25,375 GHz)



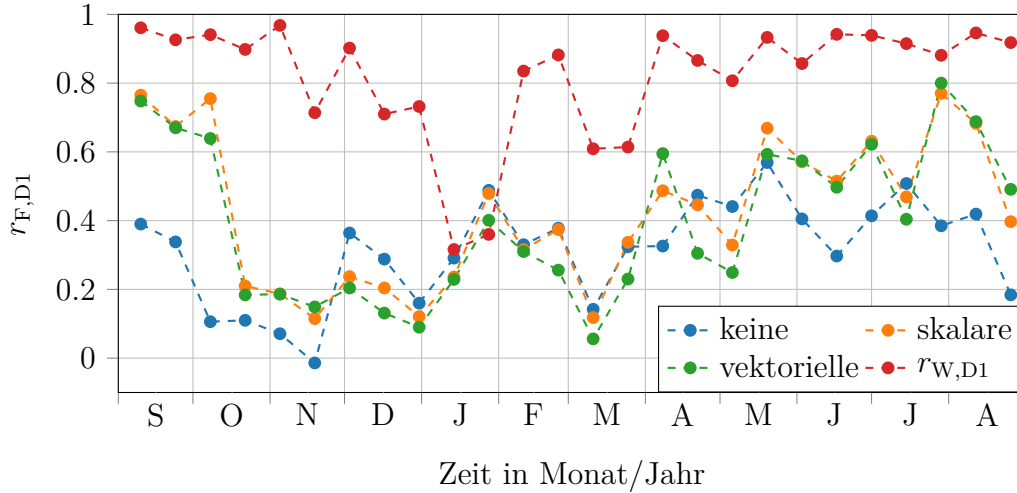
(a) horizontale Polarisation



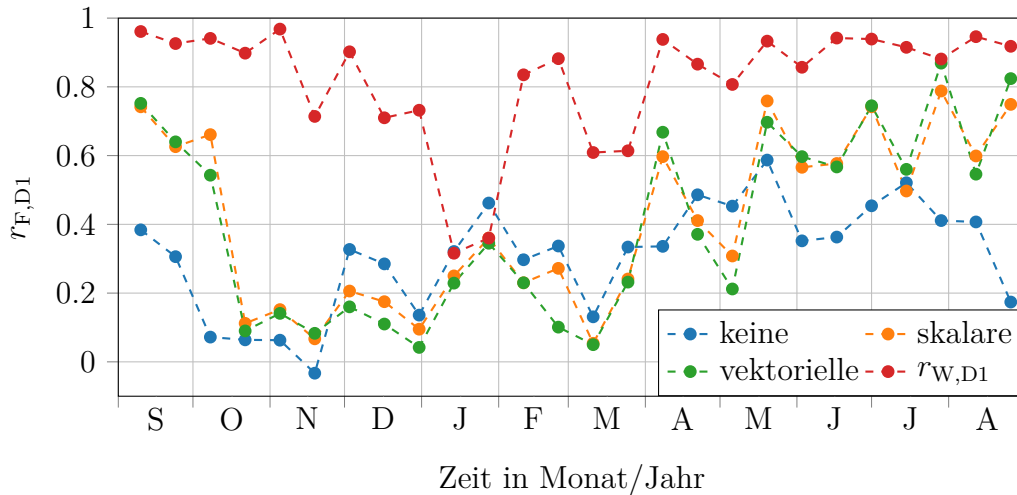
(b) vertikale Polarisation

**Abb. F.27:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 25,375 GHz (Antenne C) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.

F.4 Antenne D (28,500 GHz)



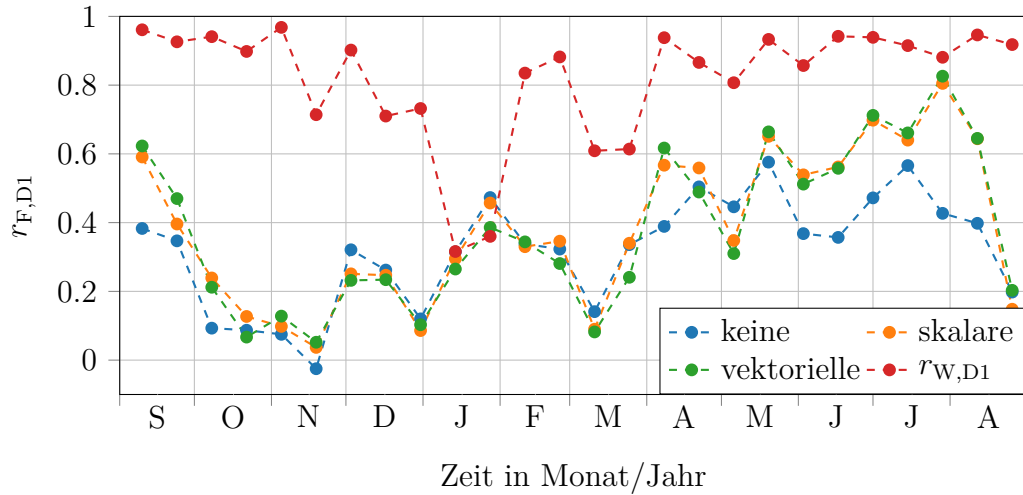
(a) horizontale Polarisation



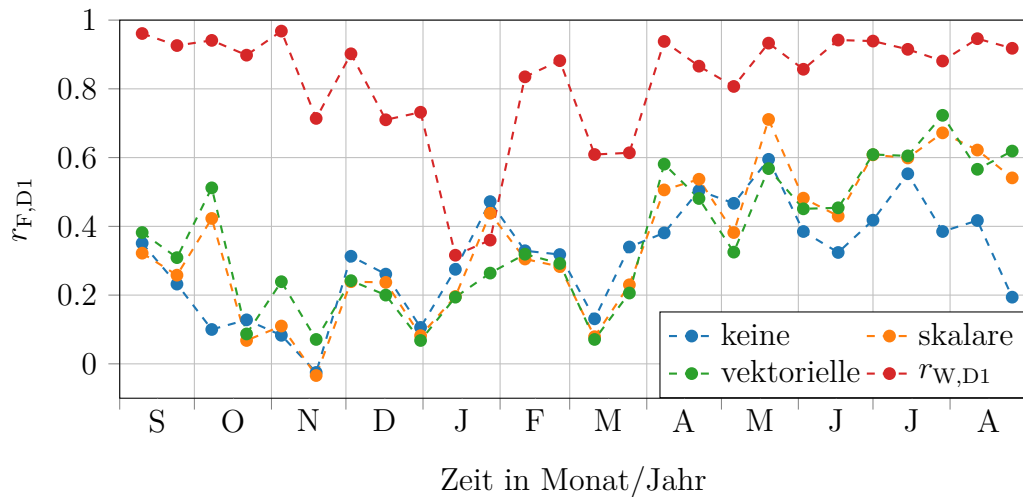
(b) vertikale Polarisation

**Abb. F.28:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 25,5 GHz (Antenne D) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.

## F.5 Antenne E (34,800 GHz)



(a) horizontale Polarisation

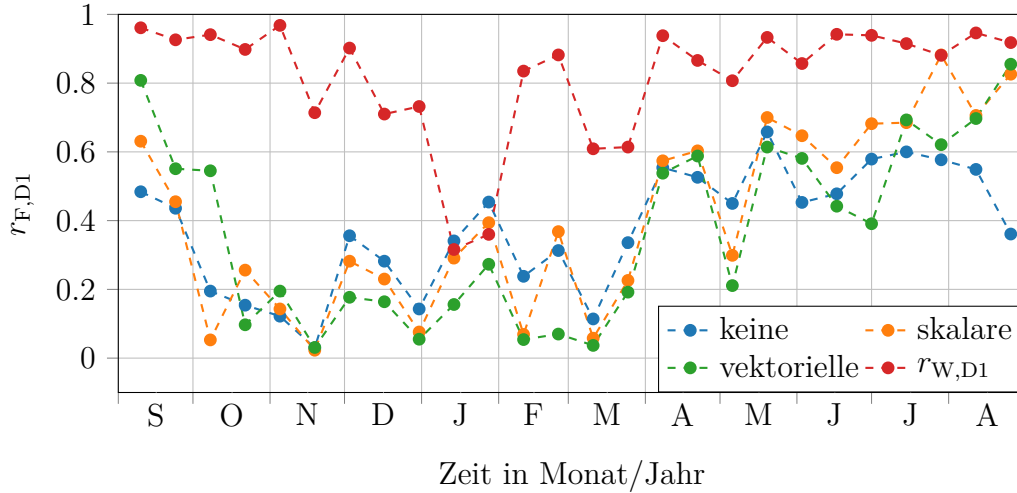


(b) vertikale Polarisation

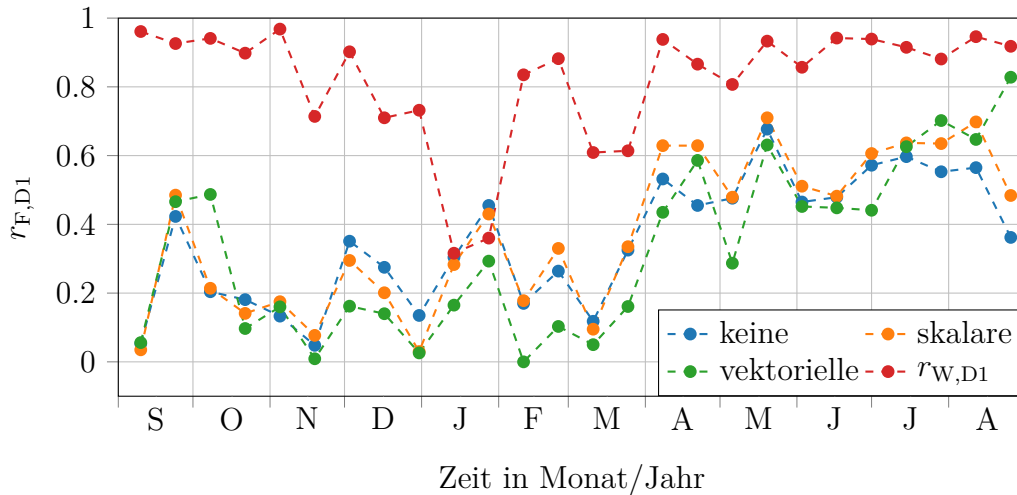
**Abb. F.29:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 34,8 GHz (Antenne E) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.



F.6 Antenne F (38,500 GHz)



(a) horizontale Polarisation



(b) vertikale Polarisation

**Abb. F.30:** Verlauf des Korrelationskoeffizienten  $r_{F,D1}$  zwischen dem Feldexperiment bei 38,5 GHz (Antenne F) und dem Distrometer 1 über ein Jahr, vom 03.09.2018 00:00 Uhr UTC bis zum 02.09.2019 00:00 Uhr UTC. Die mit dem Feldexperiment ermittelte Regenintensität wird mit den drei Modi erzeugt: keine Korrektur, skalare Korrektur und vektorielle Korrektur.