

ANALYSE DER BODENPERMITTIVITÄTSMESSUNG AM PIERRE-AUGER-OBSERVATORIUM

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Heinrich-Heine-Universität

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science in Physik

vorgelegt von

Sarah Gabriele Jeffré

2412447

23. September 2025

Erstprüfer: Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert, Bergische Universität Wuppertal
Zweitprüfer: Prof. Dr. Stefan Ulmer, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Korrigierte Version

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum: _____ Unterschrift: _____

Abstract

Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag auf die relative Permittivität des Bodens am Pierre-Auger-Observatorium, mit dem Ziel zu ermitteln, ob Änderungen dieser Umweltparameter zu signifikanten Änderungen der Bodenpermittivität führen. Es konnte festgestellt werden, dass die Werte der relativen Permittivität in unphysikalischen Bereichen lagen, sowie eine zu starke Frequenzabhängigkeit aufwiesen. Anhand einer Frequenz, bei der die relative Permittivität ein physikalisch realistisches Verhalten zeigte, konnten Zusammenhänge zwischen den untersuchten Umweltparametern und der relativen Permittivität festgestellt werden. Eine Neuinstallation der Messstation mit sorgfältiger Kalibrierung ist unbedingt erforderlich, um anhand weiterer Datenauswertungen die hier gefundenen Zusammenhänge zu verifizieren.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Kosmische Strahlung und ausgedehnte Luftschauer	2
3. Das Pierre-Auger-Observatorium	3
3.1. Oberflächendetektor	4
3.2. Fluoreszenzdetektor	5
3.3. Auger Engineering Radio Array und Radiodetektor	5
3.3.1. Auger Engineering Radio Array	6
3.3.2. Radiodetektor	7
4. Permittivität	8
4.1. Bedeutung der Permittivität für AERA	8
5. Permittivitäts- und Wetterdaten vom Pierre-Auger-Observatorium	10
5.1. Messung der relativen Permittivität bei AERA	10
5.1.1. Struktur der Permittivitätsdaten	11
5.1.2. Qualität der Permittivitätsdaten	12
5.2. Messung der Wetterdaten	14
6. Datenanalyse	16
6.1. Frequenzabhängigkeit der Permittivitätsdaten	16
6.2. Umweltbedingte Schwankungen der Permittivität	18
6.3. Abhängigkeit der Permittivität von Luftfeuchtigkeit und Temperatur	24
6.4. Abhängigkeit der Permittivität von Niederschlagsereignissen	30
7. Zusammenfassung und Ausblick	37
A. Anhang	39
Literatur	48

Abbildungsverzeichnis

3.1.	Gebiet des Pierre-Auger-Observatoriums	3
3.2.	WCD mit Solarmodul und einer Radioantenne vom Typ SALLA (Short Aperiodic Loaded Loop Antenna)	4
3.3.	Fluoreszenzteleskope am Standort Los Leones	5
3.4.	High Elevation Auger Telescopes (HEAT) am Standort Coihueco	5
3.5.	Gebiet von AERA	6
3.6.	Eine Station von AERA mit LPDA	6
3.7.	Eine Station von AERA mit Schmetterlingsantenne	6
4.1.	Darstellung eines geneigten Luftschauers	9
5.1.	Elektronik in der Kiste an der AERAWS, rot eingekreist v. l. n. r.: Raspberry Pi, VNA, Verbindungskabel zur Sonde	11
5.2.	Kiste mit der Elektronik an der AERAWS	11
5.3.	Verlauf der relativen Permittivität über alle Frequenzen für eine Beispielmessung	13
5.4.	Verlauf der relativen Permittivität, der absoluten Impedanz und des Phasenwinkels für eine Beispielmessung	13
6.1.	Heatmap der relativen Permittivität bei verschiedenen Frequenzen über den gesamten zur Verfügung stehenden Zeitraum	17
6.2.	Verlauf des Niederschlags, der relativen Luftfeuchtigkeit, der relativen Permittivität und der Temperatur über den gesamten Zeitraum der vorliegenden Permittivitätsdaten	18
6.3.	Monatlich gemittelter Verlauf der relativen Permittivität, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über den gesamten Zeitraum in dem Permittivitätsdaten vorliegen	19

6.4. Luftfeuchtigkeit, relative Permittivität und Temperatur im Zeitraum von sieben Tagen	20
6.5. Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur von 11.04.22 bis 17.04.22	21
6.6. Verlauf der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit von 11.04.22 bis 17.04.22	23
6.7. Verlauf der relativen Permittivität und der Temperatur von 11.04.22 bis 17.04.22	23
6.8. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 35,0 MHz am 14.04.22	27
6.9. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 35,0 MHz am 14.04.22	27
6.10. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 36,5 MHz am 14.04.22	28
6.11. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 36,5 MHz am 14.04.22	28
6.12. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 79,5 MHz am 14.04.22	29
6.13. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 79,5 MHz am 14.04.22	29
6.14. Korrelation der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit am 14.04.22	30
6.15. Regenereignis am 29.01.23	31
6.16. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 29.01.23	32
6.17. Regenereignis am 20.11.22 und 21.11.22	33
6.18. Regenereignis am 04.12.22	34
6.19. Regenereignis am 12.02.23	35
A.1. Impedanzmessungen in der Diplomarbeit von M. Kasten	39
A.2. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 30,0 MHz	40
A.3. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 30,0 MHz	40
A.4. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 40,0 MHz	41

A.5. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 40,0 MHz	41
A.6. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 50,0 MHz	42
A.7. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 50,0 MHz	42
A.8. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 60,0 MHz	43
A.9. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 60,0 MHz	43
A.10. Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 70,0 MHz	44
A.11. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 70,0 MHz	44
A.12. Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 29.01.23 bei 36,5 MHz	45
A.13. Korrelation Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit am 29.01.23 . .	45

Abkürzungen

AERA Auger Engineering Radio Array

AERAWS Auger Engineering Radio Array Weather Station

CRS Central Radio Station

FD Fluoreszenzdetektor

HEAT High Elevation Auger Telescopes

LPDA logarithmisch-periodische Dipolantenne

RD Radiodetektor

SALLA Short Aperiodic Loaded Loop Antenna

SD surface detector / Oberflächendetektor

SWR standing wave ratio / Stehwellenverhältnis

UHECR ultra high energy cosmic rays / ultrahochenergetische kosmische Strahlung

UTC coordinated universal time / koordinierte Weltzeit

VNA Vektornetzwerkanalysator

WCD Water Cherenkov Detector

1. Einleitung

Das Pierre-Auger-Observatorium detektiert kosmische Strahlung anhand von ausgedehnten Luftschauern, die bei ihrem Eintritt in die Erdatmosphäre entstehen. Ein Bestandteil des Observatoriums ist das Auger Engineering Radio Array, welches die dabei entstehende Radiostrahlung misst. Die von den Radioantennen gemessene Strahlung wurde zuvor teilweise vom Boden reflektiert, was zu Ungenauigkeiten in den Daten führen kann.

Da das Reflexionsverhalten elektromagnetischer Wellen am Boden durch dessen Permittivität beeinflusst wird und sich so auf die von den Radioantennen des Observatoriums gemessenen Signale auswirkt, kann eine genaue Untersuchung der Bodenpermittivität somit die Grundlage für die Verbesserung der Genauigkeit der Radiomessungen liefern.

In dieser Arbeit werden die Änderungen der relativen Permittivität, die im Boden an der Wetterstation des Pierre-Auger-Observatoriums gemessen wurde, unter Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und des Niederschlags untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Frage, ob eine Veränderung der oben genannten Parameter zu einer signifikanten Änderung der relativen Permittivität führt.

2. Kosmische Strahlung und ausgedehnte Luftschauer

Unter kosmischer Strahlung versteht man einen Strom hochenergetischer Teilchen, die im Weltraum ihren Ursprung haben [1]. Entdeckt wurde diese Strahlung 1912 von Victor Hess, einem österreichischen Physiker [2, 3]. Er konnte nachweisen, dass die elektrische Leitfähigkeit von Luft in Höhen von über 5000 Metern anstieg, was auf energiereiche Teilchen aus dem Kosmos zurückzuführen ist [3]. Für diese Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis [2].

Eine sehr energiereiche Form der kosmischen Strahlung ist die ultrahochenergetische kosmische Strahlung (UHECR, ultra high energy cosmic rays). Sie besteht überwiegend aus Protonen und Atomkernen mit Energien von bis zu 10^{20} eV, einer weit größeren Energie, als sie an Teilchenbeschleunigern derzeit erzeugt werden kann [4, 1].

Trifft ein hochenergetisches kosmisches Teilchen auf die Erdatmosphäre, startet eine Kettenreaktion, durch die sich ein ausgedehnter Luftschauer entwickelt. Das sogenannte Primärteilchen kollidiert mit einem Kern der Atmosphäre, wodurch zahlreiche Sekundärteilchen entstehen. Aus der Kollision der Sekundärteilchen mit weiteren Kernen und dem Zerfall der Teilchen entsteht eine Teilchenkaskade, welche als ein über mehrere Kilometer ausgedehnter Luftschauer letztendlich auf die Erde trifft [1, 5].

Um diese ausgedehnten Luftschauer und ihre Quellen genauer zu untersuchen, wurde das Pierre-Auger-Observatorium gebaut [4].

3. Das Pierre-Auger-Observatorium

Das Pierre-Auger-Observatorium ist das weltweit größte Observatorium seiner Art [4]. Mit einer Größe von etwa 3000 km² entspricht seine Fläche etwa der von Luxemburg. Es steht in der Pampa Amarilla in Westargentinien, in der Nähe der Stadt Malargüe [6]. Der Bau des Observatoriums startete im Jahr 2002 und wurde 2008 abgeschlossen, wobei bereits 2004 erste Messungen gemacht wurden [4]. Eine umfassende Erweiterung des Observatoriums erfolgte ab 2016 mit dem sogenannten AugerPrime Upgrade [1, 7].

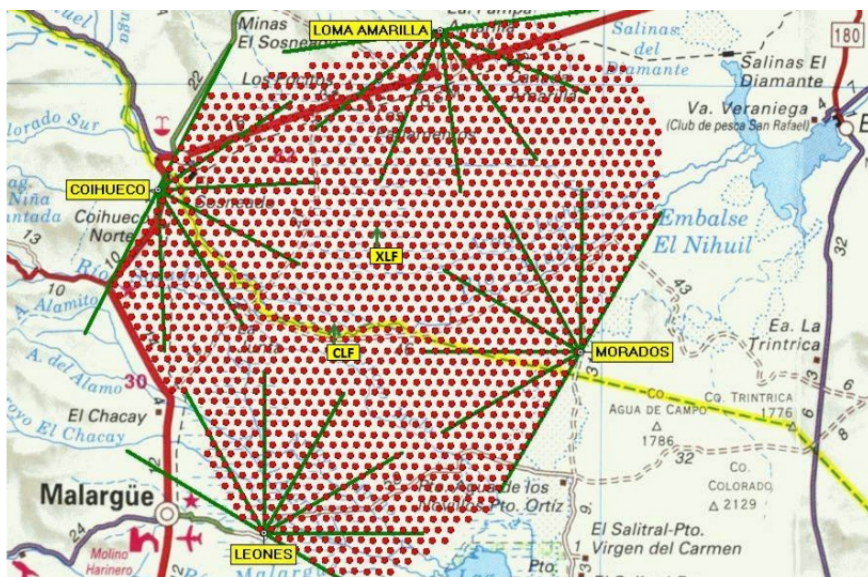


Abbildung 3.1.: Gebiet des Pierre-Auger-Observatoriums:

Jeder rote Punkt steht für eine Station des Oberflächendetektors; der Bereich zwischen den grünen Linien zeigt das Blickfeld der einzelnen Fluoreszenzteleskope [4].

Die Aufgabe des Observatoriums ist die Erforschung der Herkunft und der Eigenschaften von kosmischer Strahlung mit Energien über 10^{17} eV [4]. Benannt wurde das Pierre-Auger-Observatorium nach dem französischen Physiker Pierre Victor Auger, welcher als Entdecker ausgedehnter Luftschauer gilt [2]. Das Observatorium in seiner Gesamtheit ist

ein sogenannter Hybriddetektor, da es ausgedehnte Luftschauer mit verschiedenen, voneinander unabhängigen Methoden misst [4]. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über einige der Detektoren des Observatoriums gegeben.

3.1. Oberflächendetektor

Der Oberflächendetektor (SD, surface detector) des Pierre-Auger-Observatoriums besteht aus 1660 Wassertanks (Water Cherenkov Detectors, WCD), die mit jeweils 1,5 km Abstand über die Fläche von 3000 km² verteilt sind. Die Tanks sind mit 12 Tonnen hochreinem Wasser gefüllt und vollständig vor Lichteinfall abgeschirmt [4].



Abbildung 3.2.: WCD mit Solarmodul und einer Radioantenne vom Typ SALLA (Short Aperiodic Loaded Loop Antenna) [8].

Treffen Luftschauer auf die Tanks, so erzeugen die Teilchen im Wasser Tscherenkow-Licht, das von sensiblen Photomultipliern in elektrische Signale umgewandelt wird. Basierend auf der Lichtmenge können Rückschlüsse auf die Energie des Primärteilchens gezogen werden [4]. Betrachtet man die Detektionszeiten der einzelnen Tanks, kann die Flugbahn des einfallenden Luftschauers rekonstruiert werden [1].

Um die Zusammensetzung der ausgedehnten Luftschauer genauer zu untersuchen, wurden an einigen Oberflächendetektoren auch Myonendetektoren installiert [1].

3.2. Fluoreszenzdetektor

Der Fluoreszenzdetektor (FD) besteht aus 27 Teleskopen, welche über 4 Standorte verteilt sind. Die geladenen Teilchen eines Schauers interagieren in der Luft mit Stickstoff und emittieren so ultraviolettes Licht. Dieses Fluoreszenzlicht wird von den Teleskopen beobachtet und aufgezeichnet. Da das erzeugte Fluoreszenzlicht sehr schwach ist, kann der Detektor nur in nahezu mondlosen und klaren Nächten betrieben werden. Die effektive Nutzungsdauer liegt bei bis zu 15% [4].



Abbildung 3.3.: Fluoreszenzteleskope am Standort Los Leones [4].



Abbildung 3.4.: High Elevation Auger Telescopes (HEAT) am Standort Coihueco [4].

Drei der Teleskope, die sogenannten High Elevation Auger Telescopes (HEAT), welche sich am Standort Coihueco befinden, sind in separaten Behältern angebracht, die um 30° geneigt werden können. Ihr Sichtfeld liegt dadurch über dem der restlichen Fluoreszenzteleskope, was die Beobachtung der Atmosphäre in größeren Höhen ermöglicht [4].

3.3. Auger Engineering Radio Array und Radiodetektor

Kosmische Strahlung ist auch über Radiowellen messbar, weshalb das Pierre-Auger-Observatorium um Messstationen für diese Art der Beobachtung ergänzt wurde [1]. Ein Vorteil der Radiomessungen ist, dass diese, anders als beispielsweise die Fluoreszenzmessungen, rund um die Uhr möglich sind [4]. Da die Atmosphäre für Radiowellen im Bereich von 30 MHz bis 80 MHz transparent ist, gibt es nahezu keine Abschwächung des Signals durch Absorption oder Streuung in der Atmosphäre [9].

3.3.1. Auger Engineering Radio Array

Ab 2010 wurde im nordwestlichen Gebiet des Observatoriums das Auger Engineering Radio Array (AERA) erbaut [4, 10]. Es bestand zunächst aus 24 Stationen, an denen logarithmisch-periodische Dipolantennen (LPDA) im Einsatz waren. Im Jahr 2013 wurde AERA um 100 Stationen mit Schmetterlingsantennen erweitert. 2015 kamen weitere 25 Stationen dazu. Mittlerweile besteht AERA aus 153 Antennenstationen, die über eine Fläche von 17 km² verteilt sind [4].

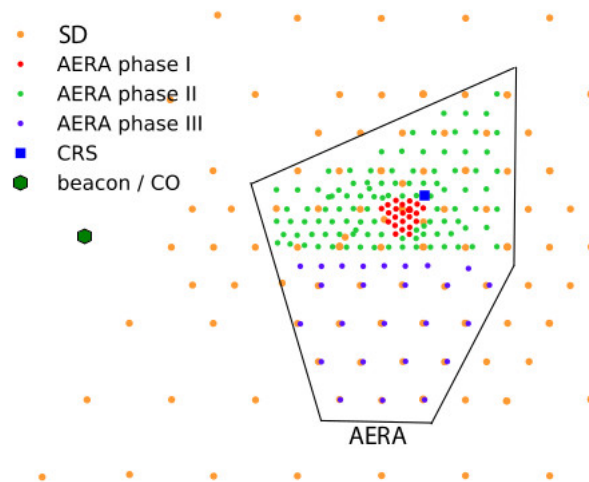


Abbildung 3.5.: Gebiet von AERA [1].



Abbildung 3.6.: Eine Station von AERA mit LPDA [1].



Abbildung 3.7.: Eine Station von AERA mit Schmetterlingsantenne [11].

AERA misst Luftschauer mit Energien zwischen 10^{17} eV bis zu mehreren 10^{18} eV über Radiostrahlung zwischen 30 MHz und 80 MHz [12]. Die Antennen sind dafür rund um die

Uhr aktiv und erkennen regelmäßig kosmische Strahlung in Übereinstimmung mit den Oberflächen- und Fluoreszenzdetektoren [4, 1].

3.3.2. Radiodetektor

Zusätzlich zu den bestehenden Antennenstationen von AERA wurde im Rahmen des AugerPrime Upgrades der Radiodetektor (RD) implementiert.

Bei jedem der 1660 Oberflächendetektoren wurde eine Radioantenne vom Typ SALLA (Short Aperiodic Loaded Loop Antenna) installiert (siehe Abbildung 3.2). Diese Antennen können die Messgenauigkeit für stark geneigte Luftschauer erhöhen [8].

4. Permittivität

Die Permittivität ε ist eine physikalische Größe, die beschreibt, wie stark ein Material ein elektrisches Feld beeinflusst. Die absolute Permittivität ε berechnet sich aus dem Produkt der stoffabhängigen Permittivitätszahl ε_r , auch relative Permittivität genannt, und $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$, einer Naturkonstanten, die die Permittivität des Vakuums angibt. Bei der relativen Permittivität ε_r handelt es sich um eine dimensionslose Größe, die bis auf wenige Ausnahmen (z. B. im Plasma) größer ist als eins. Die relative Permittivität von Luft ist nahezu eins, weshalb in diesem Fall $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0$ gilt [13].

Früher war die Bezeichnung Dielektrizitätskonstante der geläufige Begriff für die relative Permittivität [14]. Diese Bezeichnung ist jedoch irreführend, da es sich bei ε_r um keine Konstante handelt, sondern um eine Funktion, welche unter anderem von der Frequenz, der Temperatur, dem Magnetfeld und dem elektrischen Feld abhängt [13].

4.1. Bedeutung der Permittivität für AERA

Beim Eintritt kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre entsteht Radiostrahlung. Werden die entstandenen Radiowellen von AERA detektiert, so können daraus Informationen bezüglich der Energie und Richtung des ursprünglichen kosmischen Teilchens, sowie Rückschlüsse auf dessen Masse und die Zusammensetzung und Herkunft kosmischer Strahlung gezogen werden [15].

Die Permittivität des Bodens beeinflusst das Reflexionsverhalten der elektromagnetischen Wellen am Boden und wirkt sich so auf die von den Antennen gemessenen Signale aus [2]. Besonders bei stark geneigten Luftschauern verfälscht der reflektierte Teil die Rekonstruktion des Zenitwinkels [10].

Da die relative Permittivität des Bodens nicht konstant ist, sondern von verschiedenen Wettereinflüssen, wie der Temperatur, der Feuchtigkeit und Niederschlag abhängt, wird

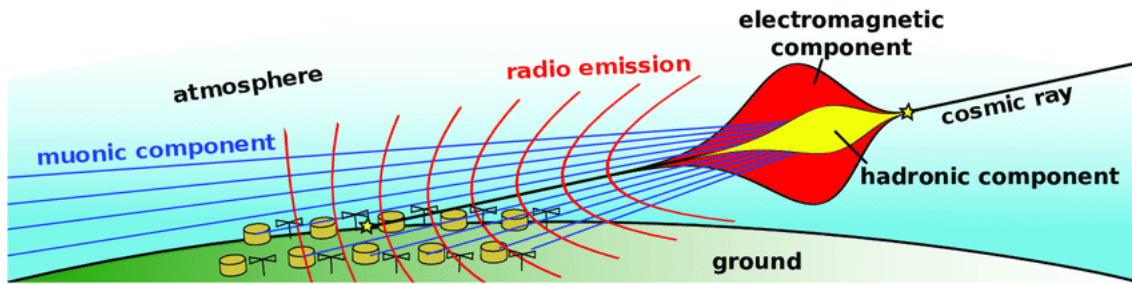


Abbildung 4.1.: Darstellung eines geneigten Luftschauers [16].

auch der reflektierte Teil der Radiowellen von diesen Faktoren beeinflusst.

Die Bodenpermittivität ist für die Messungen bei AERA daher von großer Bedeutung, denn sie beeinflusst die gemessenen Ergebnisse. Eine genaue Untersuchung der Bodenpermittivität kann somit die Grundlage für eine Verbesserung der Genauigkeit der Messungen und der Rekonstruktion der Luftschauer sein.

5. Permittivitäts- und Wetterdaten vom Pierre-Auger-Observatorium

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau zur Messung der relativen Permittivität beschrieben, anschließend wird auf die Struktur der Daten eingegangen und anhand einer Beispielmessung ein kurzer Überblick über ihre Qualität gegeben. Abschließend wird auf die Messung der Wetterdaten eingegangen.

5.1. Messung der relativen Permittivität bei AERA

Bei der AERA-Wetterstation (AERAWS) befindet sich ein Aufbau zur Messung der relativen Permittivität des Bodens. Dieser basiert auf der Diplomarbeit von Matthias Kasten [2]. Bestandteile des Aufbaus sind ein Vektornetzwerkanalysator (VNA), eine Sonde und ein Banana Pi. Der VNA sendet alle fünf Minuten ein Signal verschiedener Frequenzen auf die Sonde und für jede Frequenz werden die jeweilige komplexe Impedanz der Sonde, sowie die Phase des Signals gemessen [2, 17].

Gesteuert wurde der in Argentinien installierte Aufbau ursprünglich von einem Raspberry Pi, welcher jedoch im November 2016 durch einen Banana Pi mit integriertem Speicher ersetzt wurde. Auch der VNA wurde erneuert, da der vorherige eine Fehlfunktion hatte [17].

Sowohl der Banana Pi, als auch der VNA sind zur Abschirmung von Umwelteinflüssen in einer Schutzkiste untergebracht (siehe Abbildung 5.1 und 5.2). Die Sonde wurde bei AERA in einem eingezäunten Bereich in der Erde platziert. Da der VNA einen geringen Stromverbrauch hat, konnte er an die solare Stromversorgung der AERAWS angeschlossen werden [2].

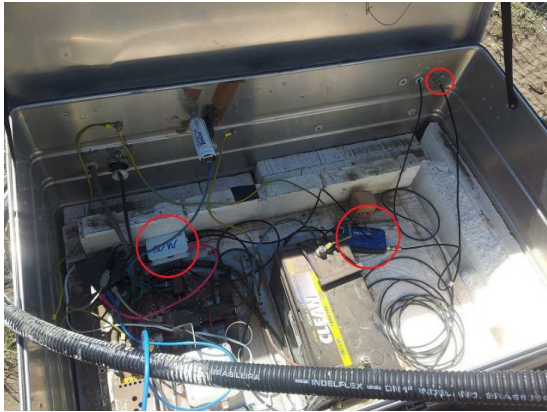


Abbildung 5.1.: Elektronik in der Kiste an der AERAWS, rot eingekreist v. l. n. r.: Raspberry Pi, VNA, Verbindungskabel zur Sonde [2].



Abbildung 5.2.: Kiste mit der Elektronik an der AERAWS [2].

Aus den vom VNA gemessenen Werten werden von der Software der Reflexionsfaktor, der Real- und Imaginärteil sowie der Phasenwinkel der Impedanz, die absolute Impedanz und der SWR-Wert (standing wave ratio, Stehwellenverhältnis) berechnet und gespeichert [2, 17].

Die relative Permittivität kann aus den gespeicherten Werten wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2\pi f C_0} \left(\frac{\tan \theta}{|Z| \sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \right),$$

f beschreibt dabei die jeweilige Frequenz des Signals des VNA, θ den Phasenwinkel der Impedanz, $|Z|$ die absolute Impedanz der Sonde und $C_0 = 5,36 \text{ pF} \pm 0,02 \text{ pF}$ die zuvor gemessene Kapazität der Sonde an Luft [2, 17].

5.1.1. Struktur der Permittivitätsdaten

Alle fünf Minuten sendet der VNA Signale mit Frequenzen zwischen 30,0 MHz und 79,5 MHz auf die Sonde. Der Abstand zwischen den einzelnen Frequenzen beträgt dabei 0,5 MHz. Die jeweils gemessenen (sowie die von der Software berechneten) Werte werden für jede Messung in einer eigenen CSV-Datei gespeichert.

Demnach entsteht alle fünf Minuten eine neue Tabelle, für die aus der komplexen Impedanz der Realteil (Wirkwiderstand/ R_s), sowie der Imaginärteil (Reaktanz/ X_s), der Betrag (absolute Impedanz/ $|Z|$) und der Phasenwinkel der Impedanz (Theta) bestimmt werden. Der Reflexionsfaktor $\Gamma = \frac{b_1}{a_1}$ (Return Loss) wird aus dem Verhältnis der Hin- und Rücklaufenden Wellen, a_1 , b_1 berechnet, zwischen welchen eine Phasenverschiebung (Phase) vorliegt [2]. Das Stehwellenverhältnis (SWR) wird über den Reflexionsfaktor bestimmt. Die Benennung der CSV-Dateien erfolgt nach dem Zeitpunkt der jeweiligen Messung.

Obwohl der VNA durchgehend in Betrieb sein müsste und die gemessenen Daten gespeichert werden sollten, liegen die aktuellsten Daten nur zwischen dem 06. April 2022 und dem 13. Februar 2023 vor, wobei die Datenlage auch in diesem Zeitraum lückenhaft ist. Mögliche Gründe hierfür können Kommunikationsprobleme der Station im Detektorfeld, oder Probleme mit der Stromversorgung sein.

5.1.2. Qualität der Permittivitätsdaten

Bei der Betrachtung einer einzelnen Messung der relativen Permittivität über den Frequenzbereich von 30,0 MHz bis 79,5 MHz fällt auf, dass die Werte stark schwanken und bei einigen Frequenzen im negativen Bereich liegen (vergleiche Abbildung 5.3). Allerdings ist es physikalisch ausgeschlossen, dass die Werte der relativen Permittivität des Bodens negativ sind.

Die zu erwartenden Werte der relativen Permittivität des Bodens liegen ungefähr im Bereich von $\varepsilon_r = 3$ bis $\varepsilon_r = 30$, wobei die genauen Werte hauptsächlich vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens abhängen [18].

Im betrachteten Frequenzbereich sollte die relative Permittivität nicht so stark in Abhängigkeit der Frequenz schwanken, sondern einem nahezu konstanten Verlauf folgen [18].

Die starken Schwankungen sowie die negativen Werte lassen auf eine fehlerhafte Kalibrierung des VNA schließen. Da die Software des VNA keine Rohdaten, sondern nur die bereits korrigierten Daten speichert, können diese nicht nachträglich angepasst werden.

Die Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität ist von der Kalibrierung abhängig und führt in diesem Fall sogar zu negativen Werten. Deshalb können die erhaltenen Permittivitätsdaten nur bedingt ausgewertet werden, es lässt sich dennoch die Änderung der relativen Permittivität in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen untersuchen.

KAPITEL 5. PERMITTIVITÄTS- UND WETTERDATEN VOM
PIERRE-AUGER-OBSERVATORIUM

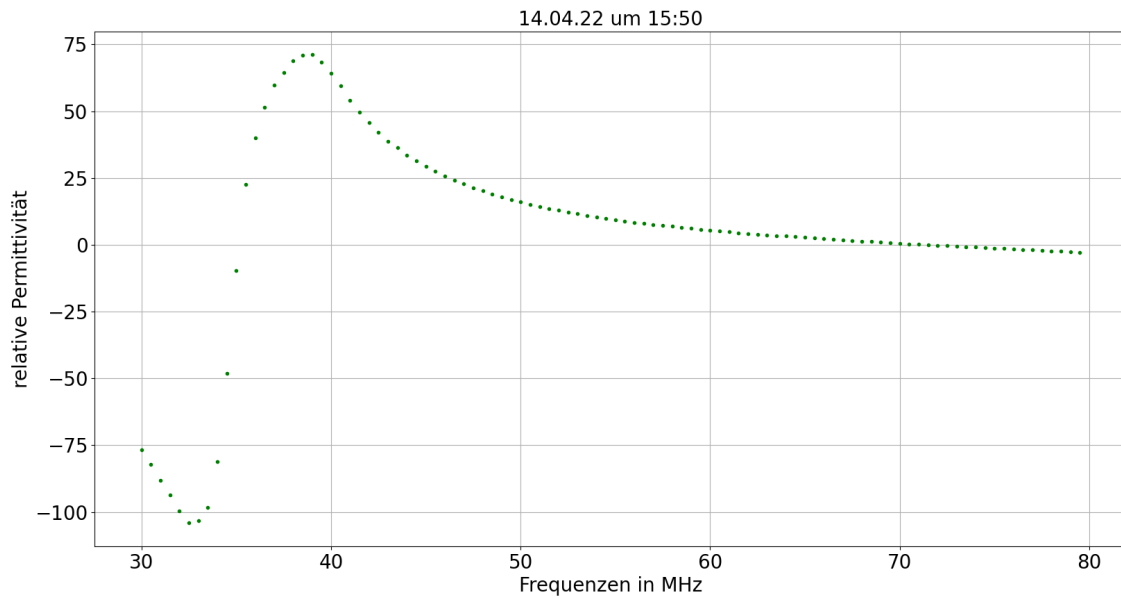


Abbildung 5.3.: Verlauf der relativen Permittivität über alle Frequenzen für eine Beispielmessung am 14.04.22 um 15:50 Uhr.

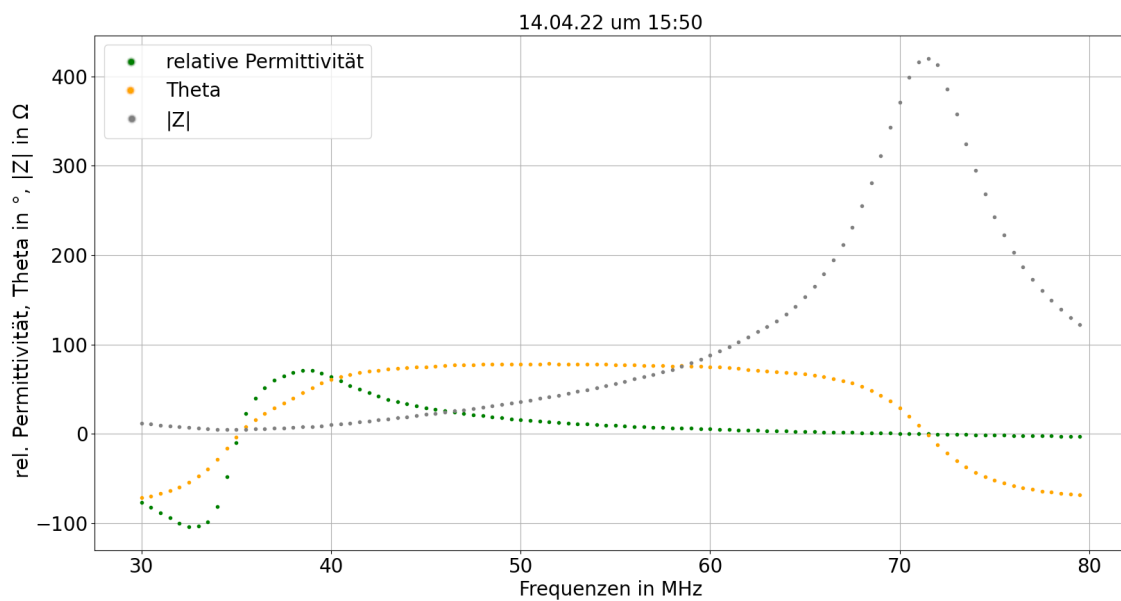


Abbildung 5.4.: Verlauf der relativen Permittivität, der absoluten Impedanz ($|Z|$) und des Phasenwinkels (Theta) für eine Beispielmessung am 14.04.22 um 15:50 Uhr.

In Abbildung 5.4 werden zusätzlich zur relativen Permittivität auch die Werte der zugehörigen absoluten Impedanzen und Phasenwinkel abgebildet. Beim Vergleich mit der bereits erwähnten Diplomarbeit, die sich ebenfalls mit diesem Aufbau zur Messung der Bodenpermittivität beschäftigt hat, zeigt sich, dass die Werte der absoluten Impedanz, welche in dieser Grafik in Grau dargestellt sind, einen ungewöhnlichen Verlauf haben und vor allem bei den höheren Frequenzen in einem zu hohen Bereich liegen (vergleiche Abbildung A.1) [2]. Da die relative Permittivität sich proportional zu $1/|Z|$ verhält, ist sie im Bereich der hohen Impedanzen sehr gering. Durch die Proportionalität zu $\tan(\theta)$ treten die negativen Werte der relativen Permittivität bei negativen Phasenwinkeln auf. Dies lässt den Schluss zu, dass der Phasenwinkel im hier betrachteten Frequenzbereich ausschließlich über 0° liegen sollte.

5.2. Messung der Wetterdaten

Zusätzlich zu den Permittivitätsdaten wurden für die folgende Auswertung Wetterdaten genutzt, welche an der Central Radio Station (CRS), die sich in der Nähe der AERAWS befindet, gemessen wurden [19]. Die Daten sind in einer MySQL-Datenbank gespeichert und beinhalten die für diese Arbeit relevanten Werte zur relativen Luftfeuchtigkeit, zur Temperatur und zum Niederschlag. Die Daten liegen in zeitlichen Abständen von etwa 110 Sekunden vor.

Die CRS-Wetterstation besteht unter anderem aus einem WXT 520 Wettersensor, welcher Druck, Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit und Wind misst [19]. Der WXT 500 verwendet einen Regensensor, der die kummulierte Niederschlagsmenge misst [20].

Da der Regensensor ab einem gewissen Zeitpunkt saturiert war und daher keinen neuen Niederschlag erfassen konnte, liegen verwendbare Daten zum Niederschlag erst ab dem 20. November 2022 vor, da hier eine Neuinitialisierung des Sensors durchgeführt worden ist. Die gemessenen Feuchtigkeits- und Temperaturwerte sind mit wenigen Ausfällen im gesamten Zeitraum der Permittivitätsmessungen verfügbar.

Aus den Angaben des Herstellers des WXT 500 lässt sich die Genauigkeit der vorliegenden Wetterdaten entnehmen. Die Genauigkeit des Temperatursensors wurde mit $\pm 0,3^\circ\text{C}$ bei einer Temperatur von 20°C aufgeführt. Die Genauigkeit des Luftfeuchtigkeitssensors wurde mit $\pm 3\%$ in einem Feuchtigkeitsbereich von 0% bis 90% und mit $\pm 5\%$ im Bereich

*KAPITEL 5. PERMITTIVITÄTS- UND WETTERDATEN VOM
PIERRE-AUGER-OBSERVATORIUM*

von 90 % bis 100 % angegeben. Die Werte des Regensensors werden mit einer Auflösung von 0,01 mm gemessen [20].

6. Datenanalyse

In diesem Kapitel werden die Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität sowie ihre Abhängigkeit von Umweltbedingungen wie relativer Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Niederschlag untersucht.

Zu beachten ist, dass es sich bei den in dieser Arbeit angegebenen Zeiten generell nicht um die lokale argentinische Zeit, sondern um die coordinated universal time (Koordinierte Weltzeit, UTC) handelt. Die lokale Zeit entspricht UTC-3, was bedeutet, dass die beschriebenen Ereignisse nach lokaler, argentinischer Zeit drei Stunden früher als angegeben stattfanden.

6.1. Frequenzabhängigkeit der Permittivitätsdaten

Die gemessenen Werte der relativen Permittivität schwanken im betrachteten Zeitraum vom 06. April 2022 bis zum 13. Februar 2023 zwischen $\varepsilon_r = -174$ und $\varepsilon_r = 128$, wobei sie über den gesamten Zeitraum ein ähnliches Abhängigkeitsmuster zur Frequenz aufweisen (vergleiche Abbildung 6.1). Insgesamt weichen die gemessenen Werte jedoch stark von der Erwartung von etwa $\varepsilon_r = 3$ bis $\varepsilon_r = 30$ ab [18].

Bei den niedrigsten Frequenzen werden in der Regel negative Werte gemessen, der Übergang zu positiven Werten liegt hauptsächlich im Bereich zwischen 34,5 MHz und 35,5 MHz. Danach folgt ein stetiger Abfall, bis die Werte ab einer Frequenz von etwa 71,0 MHz wieder in den negativen Bereich wechseln.

Bei 30,0 MHz kann man an einigen Tagen Unregelmäßigkeiten erkennen, bei denen die relative Permittivität sehr viel höher ist, als bei den meisten Messungen mit dieser Frequenz. Während sie normalerweise im stark negativen Bereich liegt, befindet sie sich hier im Bereich um Null oder sogar im positiven Bereich.

Da die Änderung der relativen Permittivität durch Wettereinflüsse sehr stark zwischen den verschiedenen Frequenzen variiert, wird in der folgenden Auswertung zunächst nur eine Frequenz betrachtet. Die Wahl fiel dabei auf 36,5 MHz, die Gründe dafür werden in Kapitel 6.3 erläutert.

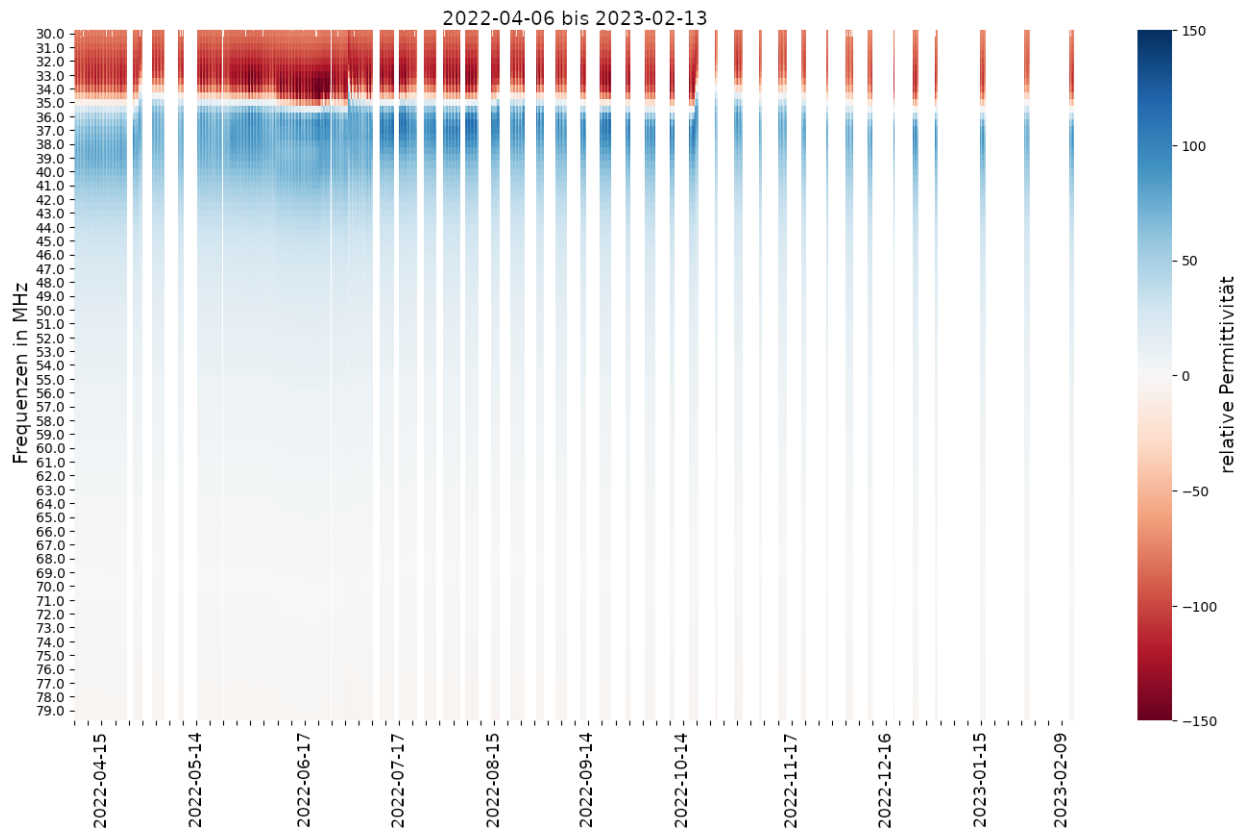


Abbildung 6.1.: Heatmap der relativen Permittivität bei verschiedenen Frequenzen über den gesamten zur Verfügung stehenden Zeitraum. Datenlücken wurden weiß abgegrenzt. Der dargestellte Bereich der relativen Permittivität wurde auf -150 bis 150 festgelegt.

Ab dem 14. Februar 2023 wurden keine Permittivitätsdaten mehr gespeichert. Ende 2023 wurde vor Ort festgestellt, dass an der Messstation die Antenne fehlt, weshalb keine weiteren Daten mehr übermittelt werden konnten. Zudem war die Sonde nicht mehr komplett mit Erde bedeckt. Verursacher dieses Zustands war aller Wahrscheinlichkeit nach eine Ziege oder Kuh [21].

6.2. Umweltbedingte Schwankungen der Permittivität

In Abbildung 6.2 ist der Verlauf des gemessenen Niederschlags, der relativen Luftfeuchtigkeit, der relativen Permittivität bei 36,5 MHz und der Temperatur des gesamten betrachteten Zeitraums, welcher sich über ein knappes Jahr erstreckt, dargestellt. Bei der Temperatur und der relativen Permittivität erkennt man eine jahreszeitlich bedingte Schwankung, welche insbesondere in Abbildung 6.3, wo die Daten jeweils monatlich gemittelt wurden, deutlich zu erkennen ist. Die höchste monatliche Durchschnittstemperatur wurde mit $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Januar, also dem argentinischen Sommer-Monat erreicht. Die niedrigste Durchschnittstemperatur war mit $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Juni zu finden. Von Juni bis Januar ist eine kontinuierliche Steigung der Durchschnittstemperatur zu erkennen.

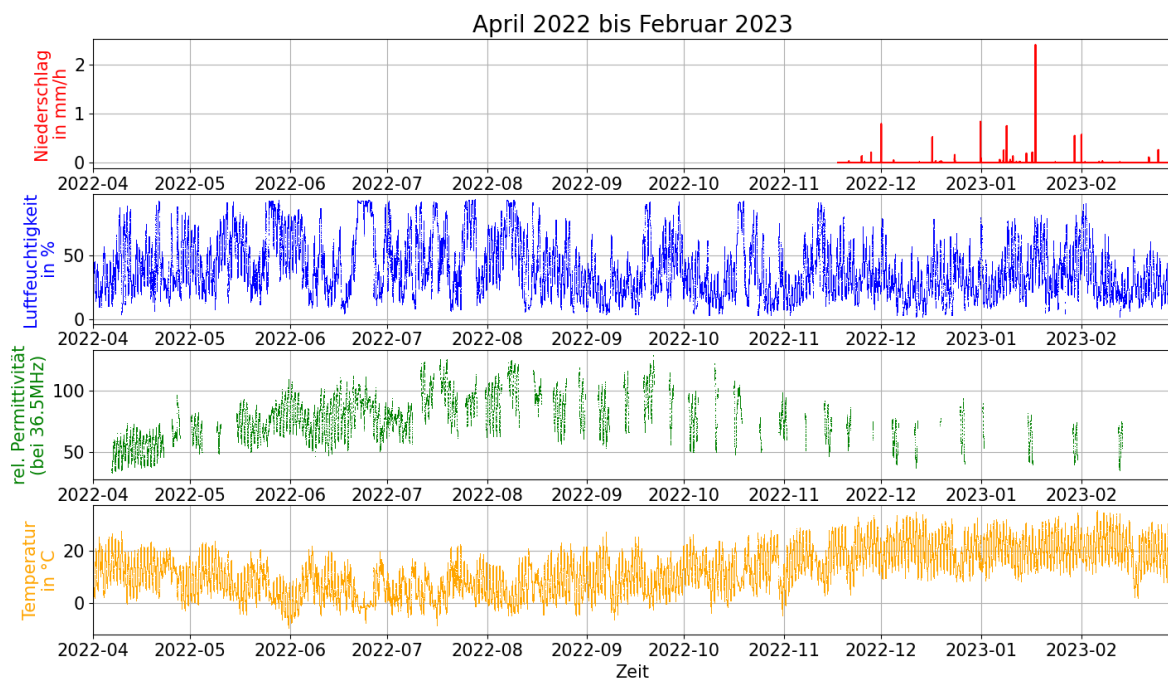


Abbildung 6.2.: Verlauf des Niederschlags, der relativen Luftfeuchtigkeit, der relativen Permittivität und der Temperatur über den gesamten Zeitraum der vorliegenden Permittivitätsdaten.

Die relative Luftfeuchtigkeit (im Folgenden nur Luftfeuchtigkeit genannt) war im monatlichen Durchschnitt in der Zeit von April bis August höher als in den späteren Monaten. Der Verlauf ist dabei nicht ganz so gleichmäßig, wie bei der Temperatur. Ihr Maximum

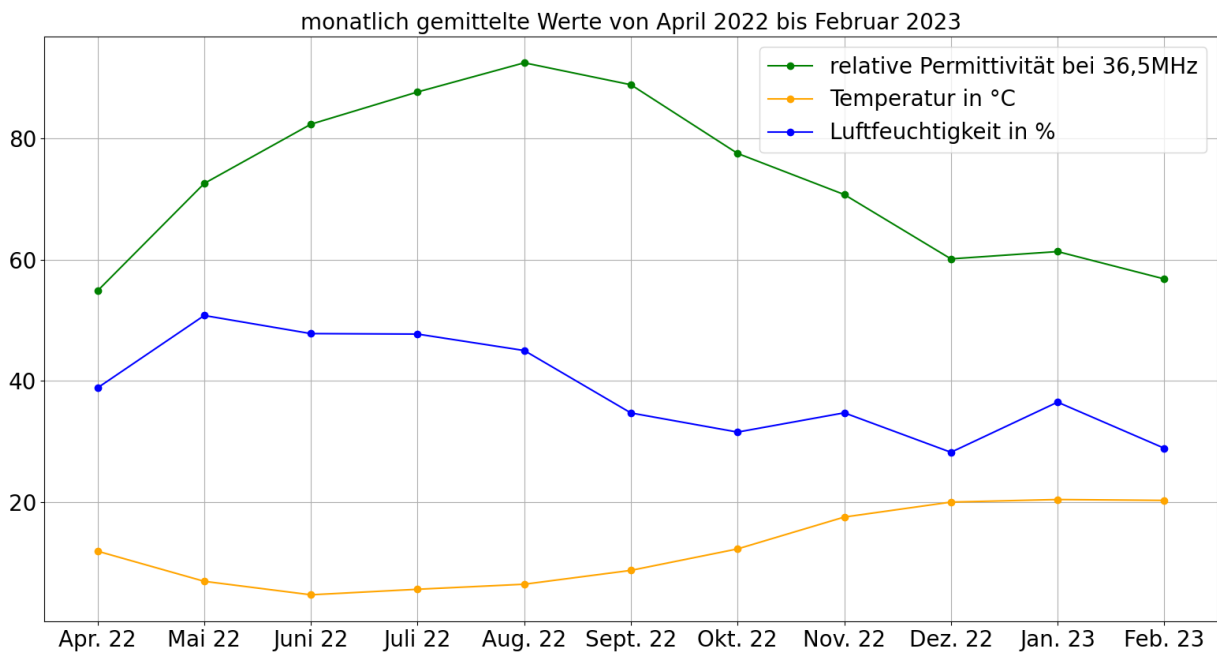


Abbildung 6.3.: Monatlich gemittelter Verlauf der relativen Permittivität, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über den gesamten Zeitraum in dem Permittivitätsdaten vorliegen.

erreichte die monatlich gemittelte Luftfeuchtigkeit im Mai mit 51 %. Ihren durchschnittlichen Minimalwert wies sie mit 28 % im Dezember auf. Zu erkennen ist, dass die Luftfeuchtigkeit im Januar, im Vergleich zum vorangegangenen und nachfolgenden Monat, erhöht war. Dies hängt wahrscheinlich mit dem häufigeren Niederschlag in diesem Monat zusammen (vergleiche Abbildung 6.2). Die niedrige durchschnittliche Luftfeuchtigkeit im Februar lässt sich zum Teil aber auch durch fehlerhafte Messungen in diesem Monat erklären (vergleiche Kapitel 6.4 und Abbildung 6.19). Im Mai und November sind ebenfalls lokale Maxima der durchschnittlichen Luftfeuchtigkeit zu sehen, was ein Hinweis auf möglichen Niederschlag in diesen Monaten sein kann.

Der Niederschlag, der an der CRS-Wetterstation gemessen wurde, ist in Abbildung 6.2 ab dem 20.11.22 dargestellt. Da dieser kumulativ gemessen wird und der Sensor zuvor maximal gefüllt war, konnten die Daten erst ab der Neuinitialisierung zu diesem Zeitpunkt erhoben werden.

In den Abbildungen wird der Niederschlag nicht kumulativ dargestellt, sondern immer als Differenz zum zuvor gemessenen Wert. Das stärkste gemessene Niederschlagsereignis trat

am 17.01.23 mit einer Gesamtintensität von 3,27 mm/h auf.

Die relative Permittivität, die bei 36,5 MHz und mit fehlerhafter Kalibrierung gemessen wurde, erreichte ihren durchschnittlich höchsten Wert im August mit $\varepsilon_r = 92,5$. Ihr Minimum erreichte sie im Februar mit $\varepsilon_r = 56,8$.

Ebenso wie bei der Luftfeuchtigkeit war auch der Wert der relativen Permittivität im Januar, im Vergleich zu den umliegenden Monaten, erhöht. Dieser Umstand kann entweder direkt mit dem starken Niederschlag in diesem Monat, oder indirekt durch die niederschlagsbedingten höheren Feuchtigkeitswerte, erklärt werden.

Zu beachten ist, dass die relative Permittivität nicht durchgehend gemessen wurde (siehe Abbildung 6.2), wodurch die berechneten monatlichen Durchschnittswerte die tatsächlichen durchschnittlichen relativen Permittivitäten der einzelnen Monate nicht vollständig zuverlässig abbilden können.

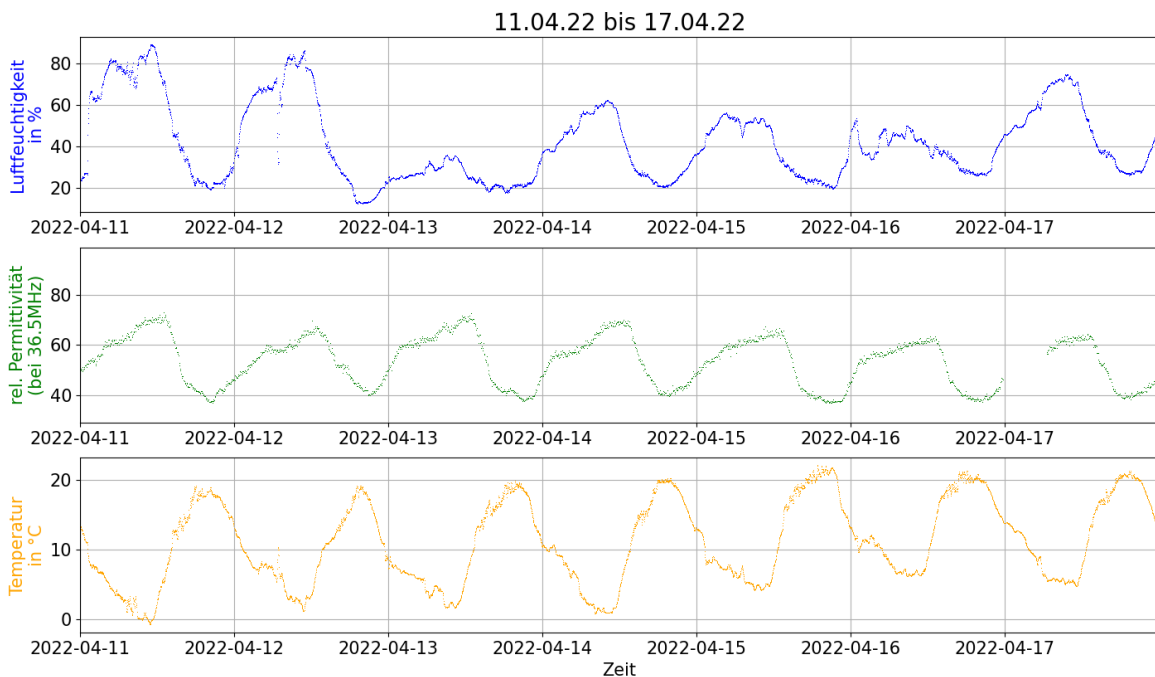


Abbildung 6.4.: Luftfeuchtigkeit, relative Permittivität und Temperatur im Zeitraum von sieben Tagen.

In Abbildung 6.4 sind der Verlauf der Luftfeuchtigkeit, der relativen Permittivität bei 36,5 MHz und der Temperatur über sieben Tage dargestellt. Im hier betrachteten Zeit-

raum, vom 11.04.22 bis zum 17.04.22, liegen keine Informationen zum Niederschlag vor, weshalb dessen Auswirkungen auf die Permittivität in diesem Zeitraum nicht betrachtet werden.

Aus der Abbildung geht deutlich hervor, dass die relative Permittivität, ebenso wie die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur, regelmäßigen, sich täglich wiederholenden Schwankungen unterliegt. Zurückzuführen sind diese regelmäßigen Schwankungen auf die normalen, tageszeitbedingten Schwankungen. Während die Temperatur über Nacht sinkt, erreicht sie am Morgen zwischen etwa 9:00 Uhr und 11:00 Uhr ein Minimum. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Laufe des Tages, bis sie zwischen 18:00 Uhr und 20:00 Uhr ein Maximum erreicht. Die größte Temperaturschwankung innerhalb eines Tages fand in der betrachteten Woche am 11.04.22 mit Temperaturen von $-0,8^{\circ}\text{C}$ bis $19,1^{\circ}\text{C}$ statt.

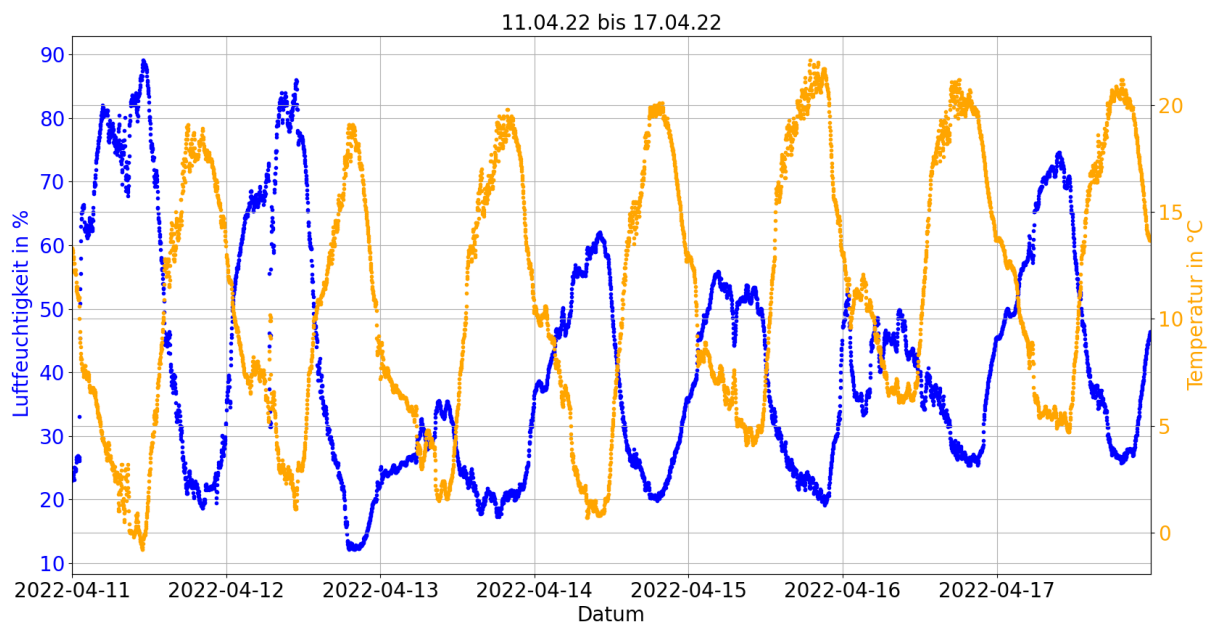


Abbildung 6.5.: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur von 11.04.22 bis 17.04.22.

Die relative Luftfeuchtigkeit hingegen hat am Morgen, aufgrund der kalten Luft, die weniger Wasser aufnehmen kann, ihr Maximum. Der Zeitpunkt ihres Maximums lag in der betrachteten Woche, ähnlich wie der Zeitpunkt der niedrigsten Temperatur, etwa zwischen 9:00 Uhr und 11:00 Uhr. Wenn die Temperatur im Laufe des Tages ansteigt, kann die Luft

mehr Wasser aufnehmen, wodurch die Luftfeuchtigkeit sinkt. Ihr Minimum trat hauptsächlich, wie das Maximum der Temperatur, zwischen 18:00 Uhr und 20:00 Uhr auf. Da die Luftfeuchtigkeit auch von Niederschlagsereignissen abhängt, variieren ihre täglichen Werte stärker, als die der Temperatur (vergleiche Abbildung 6.5).

Die bei 36,5 MHz betrachtete relative Permittivität erreichte ihr tägliches Maximum in der betrachteten Woche zwischen 12:30 Uhr und 13:00 Uhr, ihr Minimum zwischen 19:30 Uhr und 21:00 Uhr. Dabei wurde am 13.04.22 der höchste Wert mit $\varepsilon_r = 72,2$ gemessen. Die niedrigste relative Permittivität trat am 15.04.22 auf und betrug $\varepsilon_r = 36,7$. Insgesamt schwankte die relative Permittivität innerhalb der Woche damit um 35,5.

Diese wöchentliche Schwankung bleibt in den argentinischen Wintermonaten in einem ähnlich großen Bereich. Vom 01.07.22 bis zum 07.07.22 schwankte die relative Permittivität beispielsweise zwischen $\varepsilon_r = 56,4$ und $\varepsilon_r = 93,1$ und somit insgesamt um 36,7. In den argentinischen Sommermonaten ist diese Schwankung etwas größer. Da die Permittivitätsdaten im Bereich von Oktober bis Februar Lücken aufweisen, bilden sie zwar keine zusammenhängende Woche ab, die Varianz ist allerdings auch schon in kleineren zeitlichen Abständen größer, als in den Wintermonaten. Beispielsweise schwankte die relative Permittivität vom 13.11.22 bis zum 15.11.22 zwischen $\varepsilon_r = 46,0$ und $\varepsilon_r = 90,5$ und somit insgesamt um 44,5. Auch vom 15.01.23 bis 16.01.23 lag die Schwankung in einem ähnlichen Bereich von 41,5.

In der in Abbildung 6.4 betrachteten Woche liegen zwischen der Änderung der Luftfeuchtigkeit und der Änderung der relativen Permittivität ungefähr 1 bis 2,5 Stunden. Die Zeit zwischen der Änderung der Temperatur und der Änderung der relativen Permittivität liegt bei ungefähr 1 bis 3 Stunden.

Diese Zeitdifferenz resultiert daraus, dass sowohl die Feuchtigkeit, als auch die Temperatur an Luft gemessen wurden, die relative Permittivität hingegen im Boden. Sie beschreibt also die Zeit, die es braucht, bis sich durch die Änderung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Luft auch die Feuchtigkeit und die Temperatur des Bodens ändern.

Die zeitliche Verschiebung zwischen der Luftfeuchtigkeit, beziehungsweise der Temperatur und der relativen Permittivität lässt sich gut in den Abbildungen 6.6 und 6.7 betrachten. Man erkennt auch hier klar, dass sich die relative Permittivität mit einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit beziehungsweise einem Absinken der Temperatur erhöht.

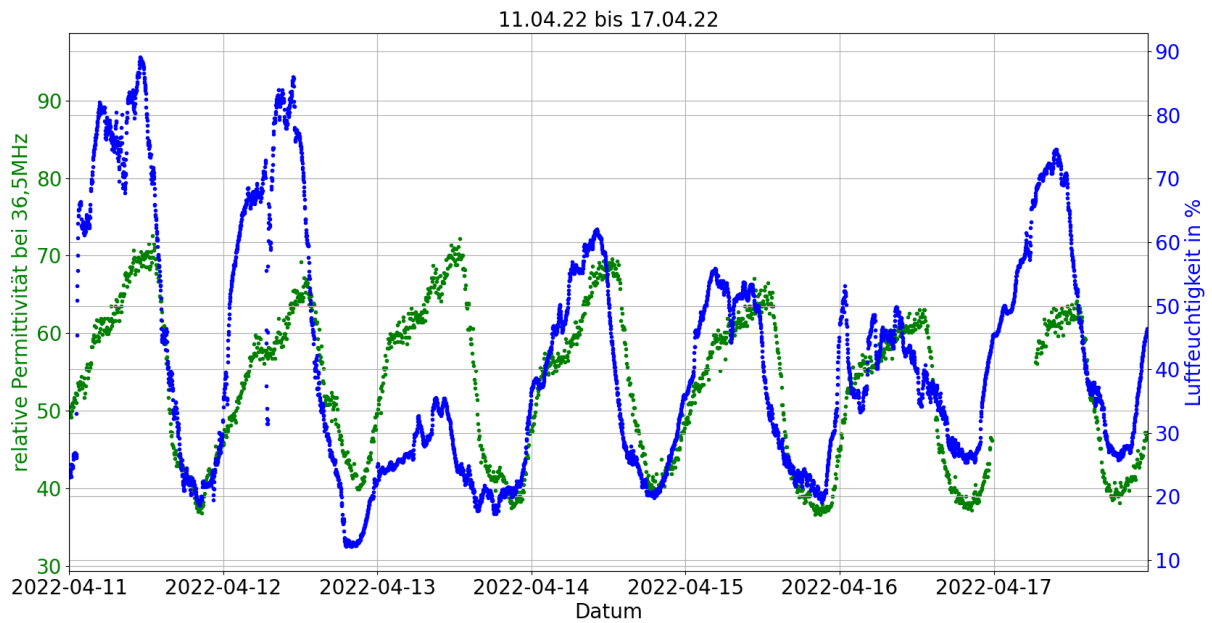


Abbildung 6.6.: Verlauf der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit von 11.04.22 bis 17.04.22

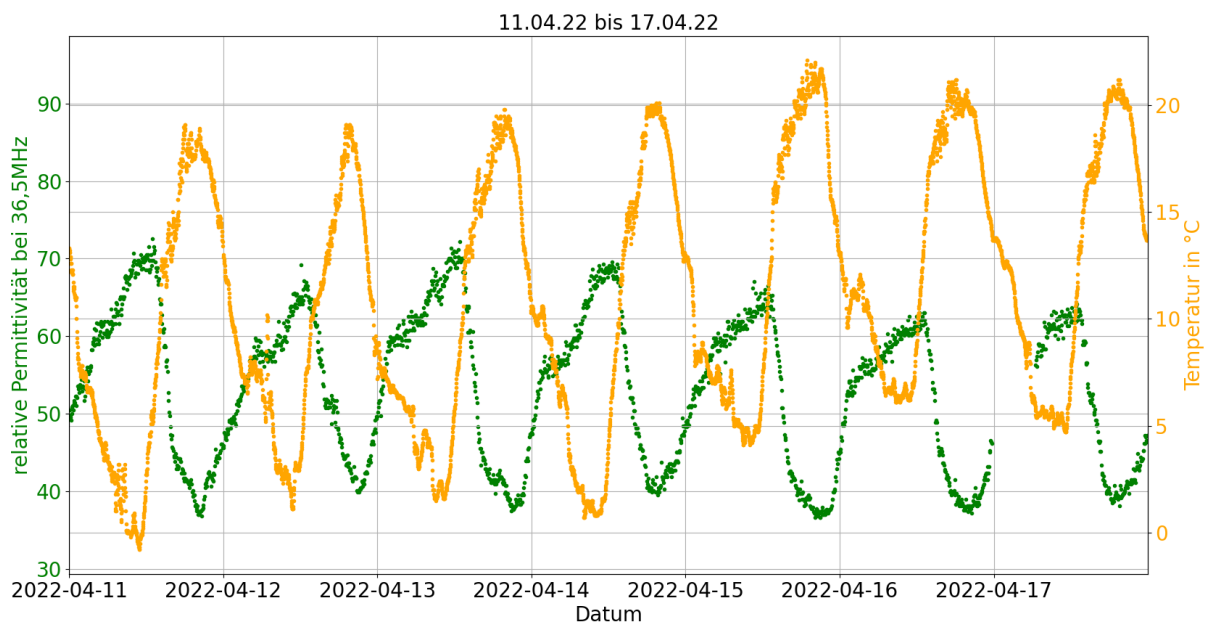


Abbildung 6.7.: Verlauf der relativen Permittivität und der Temperatur von 11.04.22 bis 17.04.22

Auffällig ist dabei, dass sich trotz der großen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit die relative Permittivität sowie die Temperatur gleichmäßig verändern. Während im Laufe der Woche die täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen ansteigen, sinken die Werte der relativen Permittivität. Das lässt einen stärkeren Einfluss der Temperatur auf die relative Permittivität im Vergleich zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit vermuten.

6.3. Abhängigkeit der Permittivität von Luftfeuchtigkeit und Temperatur

Im vorherigen Abschnitt konnte bereits verdeutlicht werden, dass die relative Permittivität des Bodens von Wettereinflüssen abhängig ist. Um zu ermitteln, bei welcher Frequenz sie am besten mit der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur korreliert, wurden ihre Korrelationskoeffizienten betrachtet. Es zeigten sich erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit der verschiedenen Frequenzen.

Für die Berechnung wurden die Wetterdaten, welche etwa alle 110 Sekunden erfasst, und die Daten der relativen Permittivität, welche etwa alle 5 Minuten gemessen wurden, zunächst über 5 Minuten gemittelt.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen der relativen Permittivität und der Luftfeuchtigkeit liegen am 14.04.22 im Bereich von $-0,88$ bis $0,82$, die der relativen Permittivität und der Temperatur zwischen $-0,88$ und $0,91$. Womit sich der zuvor vermutete, stärkere Einfluss der Temperatur auf die relative Permittivität auch in den Korrelationskoeffizienten widerspiegelt. Der betragslich höchste Korrelationskoeffizient lag an diesem Tag sowohl für die Luftfeuchtigkeit als auch für die Temperatur bei einer Frequenz von $79,5$ MHz vor.

Im Frequenzbereich von $35,0$ MHz bis $71,0$ MHz weist die relative Permittivität eine positive Korrelation mit der Luftfeuchtigkeit auf. Bei den Frequenzen außerhalb dieses Bereichs ist eine negative Korrelation zu beobachten. Bei der Betrachtung der Korrelation zwischen relativer Permittivität und Temperatur liegt eine negative Korrelation hingegen im Frequenzbereich von $35,0$ MHz bis $71,5$ MHz vor, wohingegen bei den übrigen Frequenzen eine positive Korrelation besteht.

Auffällig ist, dass es vor allem dann zu positiven Korrelationen zwischen relativer Permittivität und Temperatur sowie zu negativen Korrelationen zwischen Luftfeuchtigkeit und relativer Permittivität kommt, wenn die gemessenen relativen Permittivitätswerte im negativen Bereich oder knapp über null liegen.

Aus physikalischer Sicht sollte die relative Permittivität bei allen betrachteten Frequenzen positiv mit der Luftfeuchtigkeit und negativ mit der Temperatur korrelieren.

Da sich bei einem Anstieg der Feuchtigkeit der Anteil von Wasser im Boden erhöht und Wasser mit $\varepsilon_r = 80$ eine höhere relative Permittivität aufweist als trockener Boden mit etwa $\varepsilon_r = 3$, steigt mit einem Anstieg der Feuchtigkeit auch die relative Permittivität an [18].

Die negative Korrelation zwischen Temperatur und relativer Permittivität ist auf geringere thermische Bewegungen bei niedrigen Temperaturen zurückzuführen. Dipole richten sich leichter im elektrischen Feld aus, was zu einer stärkeren Polarisierung und somit zu einer höheren Permittivität führt [22].

Auch wenn die betraglich höchsten Korrelationskoeffizienten am 14.04.22 bei 79,5 MHz vorliegen, ist diese Frequenz für die Auswertung weniger geeignet als andere Frequenzen. Bei der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten anderer Zeiträume war bei dieser Frequenz eine große Varianz zu beobachten. Außerdem ist das Verhalten der relativen Permittivität bei 79,5 MHz bei Änderungen der Luftfeuchtigkeit und Temperatur entgegengesetzt zu dem, was zu erwarten wäre.

Gesucht wurde also eine Frequenz, bei der die relative Permittivität durchgehend stark sowohl negativ mit der Temperatur, als auch positiv mit der Luftfeuchtigkeit korreliert. Die Wahl fiel dabei auf 36,5 MHz, da sich die Korrelationskoeffizienten bei dieser Frequenz, betraglich betrachtet, fast durchgehend in einem hohen Bereich von über 0,80 befanden. Die Korrelationskoeffizienten sind allerdings, wie bereits erwähnt, nicht an allen Tagen bei einer Frequenz von 36,5 MHz am höchsten, jedoch sind ihre Schwankungen bei anderen Frequenzen deutlich größer. Ebenfalls liegen nicht an allen Tagen die besten Korrelationskoeffizienten zwischen der relativen Permittivität und der Temperatur sowie der relativen Permittivität und der Luftfeuchtigkeit bei derselben Frequenz vor. Da bei 36,5 MHz die Korrelationskoeffizienten bei Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgehend zuverlässig hoch sind, und an einigen Tagen bei dieser Frequenz am besten, fiel für die Auswertung die Wahl auf diese Frequenz.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen relativer Permittivität und Luftfeuchtigkeit schwanken bei 36,5 MHz hauptsächlich zwischen 0,82 und 0,89. Zwischen relativer Permittivität und Temperatur liegen die Schwankungen bei dieser Frequenz zwischen -0,85 und -0,96.

Auch in den Abbildungen 6.8 bis 6.13, sowie A.2 bis A.11 erkennt man, dass die Korrelationen zwischen der relativen Permittivität und der Luftfeuchtigkeit, ebenso wie die

zwischen der relativen Permittivität und der Temperatur eine starke Frequenzabhängigkeit aufweisen.

Wie in den Abbildungen 6.8 und 6.9 zu sehen ist, erhält man bei 35,0 MHz, also im Frequenzbereich, in dem der Übergang von negativen zu positiven Permittivitätswerten liegt, keine gute Korrelation zwischen relativer Permittivität und Luftfeuchtigkeit sowie zwischen relativer Permittivität und Temperatur. Zwar ist insgesamt bei einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit, beziehungsweise bei einem Absinken der Temperatur ein leichter Anstieg der relativen Permittivität zu erkennen, zeitlich betrachtet folgen die einzelnen Werte jedoch keinem klaren Verlauf.

In der Abbildung 6.10, in der die Korrelation der relativen Permittivität mit der Luftfeuchtigkeit bei 36,5 MHz abgebildet ist, kann man hingegen einen klaren zeitlichen Verlauf erkennen. Die Luftfeuchtigkeit und die relative Permittivität steigen bis zum Mittag an. Da die relative Permittivität auf die Veränderung der Luftfeuchtigkeit verzögert reagiert, bleiben ihre Werte Mittags im hohen Bereich, während die Luftfeuchtigkeit bereits wieder sinkt. Am Nachmittag sinken sowohl die Luftfeuchtigkeit, als auch die relative Permittivität, bis sie am Abend ihre Minima erreichen und wieder ansteigen. Am 14.04.22 hat die Luftfeuchtigkeit zu Beginn des Tages nahezu den gleichen Wert wie am Ende des Tages. Da dies ebenfalls auf die relative Permittivität zutrifft, treffen der Start- und Endpunkt wieder aufeinander.

Ein ähnlich klarer Verlauf ist in Abbildung 6.11 zu erkennen. Nur, dass die relative Permittivität mit einem Absinken der Temperatur steigt. Da die Temperatur am Ende des Tages höher ist als am Morgen, schließt sich die Kurve nicht ganz.

In den Abbildungen 6.12 und 6.13 kann man beim Absinken der Luftfeuchtigkeit, beziehungsweise bei einem Anstieg der Temperatur einen Anstieg der relativen Permittivität erkennen. Die Werte der einzelnen Messungen folgen zeitlich betrachtet jedoch keinem klaren Verlauf.

Auffällig ist, dass die Korrelationen der relativen Permittivität mit der Luftfeuchtigkeit und die mit der Temperatur bei Betrachtung zur selben Frequenz einen nahezu spiegelbildlichen Verlauf aufweisen. Dies wird auch in den betraglich vergleichbaren Korrelationskoeffizienten deutlich. Begründet liegt dieser spiegelbildliche Verlauf in der Korrelation von Temperatur und Luftfeuchtigkeit, welcher in Abbildung 6.14 dargestellt ist.

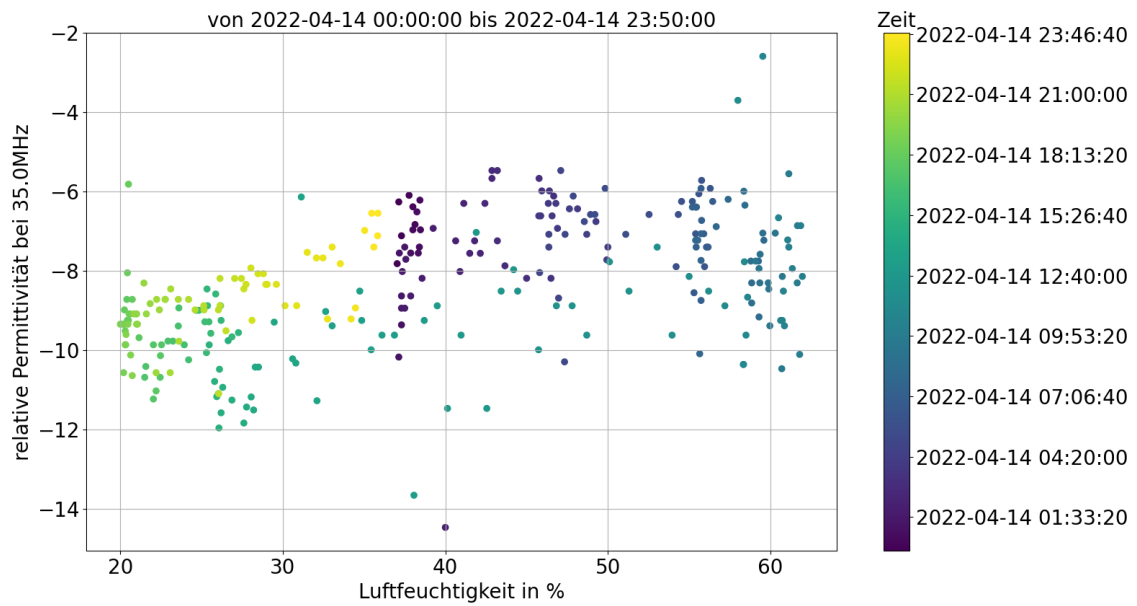


Abbildung 6.8.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 35,0 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,49.

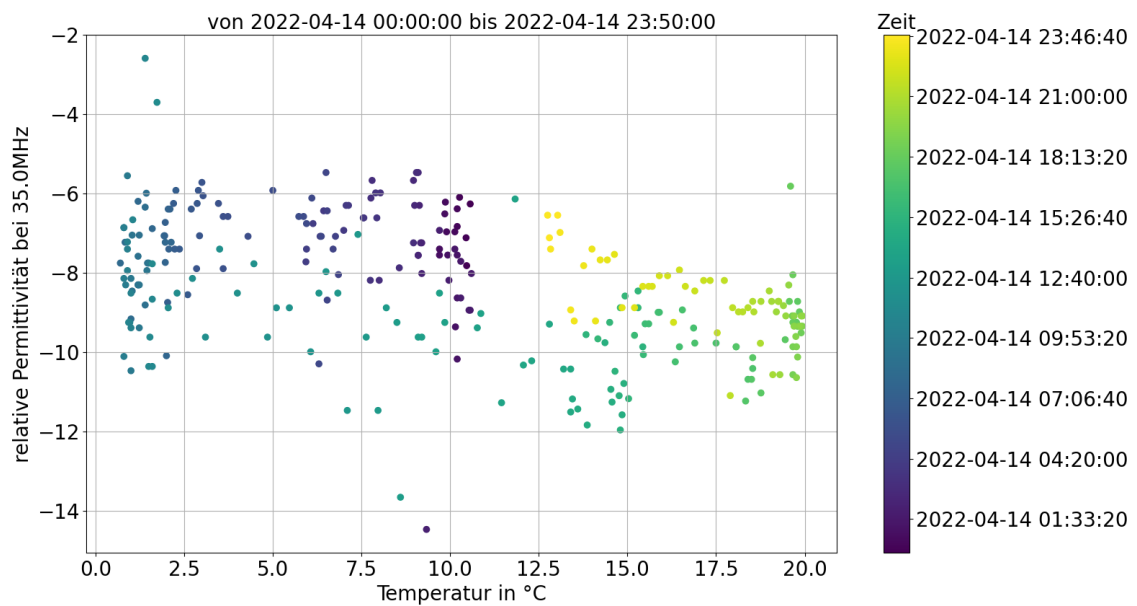


Abbildung 6.9.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 35,0 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0,45.

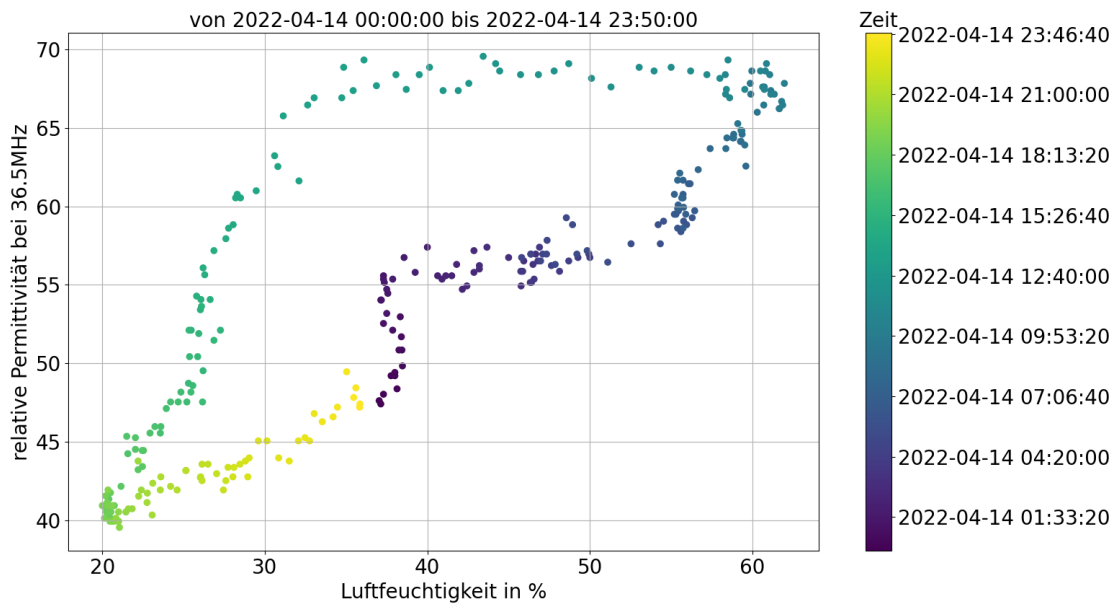


Abbildung 6.10.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 36,5 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,82.

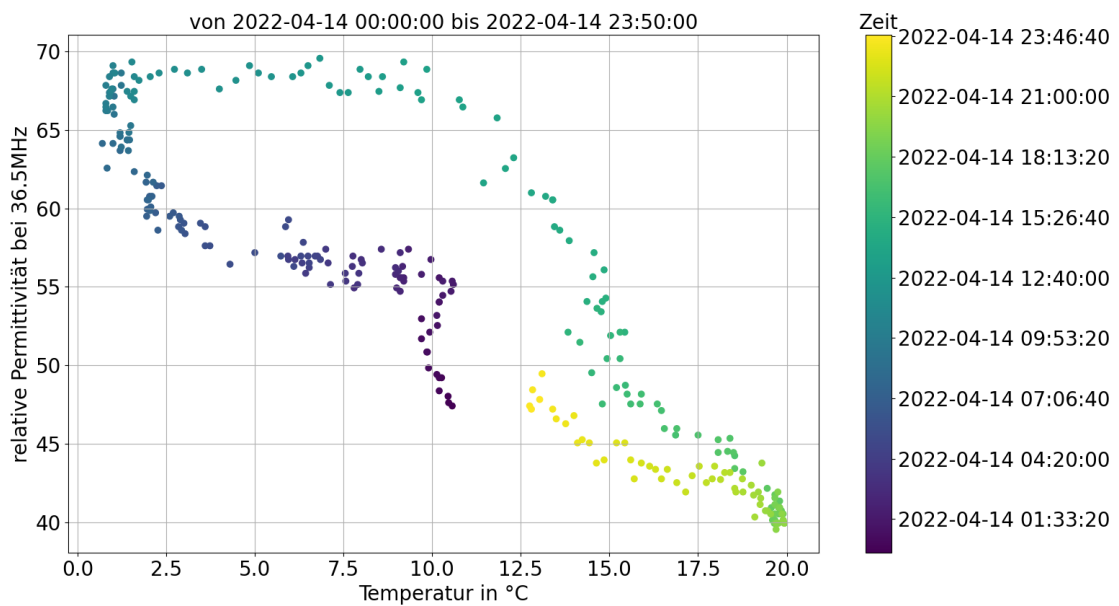


Abbildung 6.11.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 36,5 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0.88.

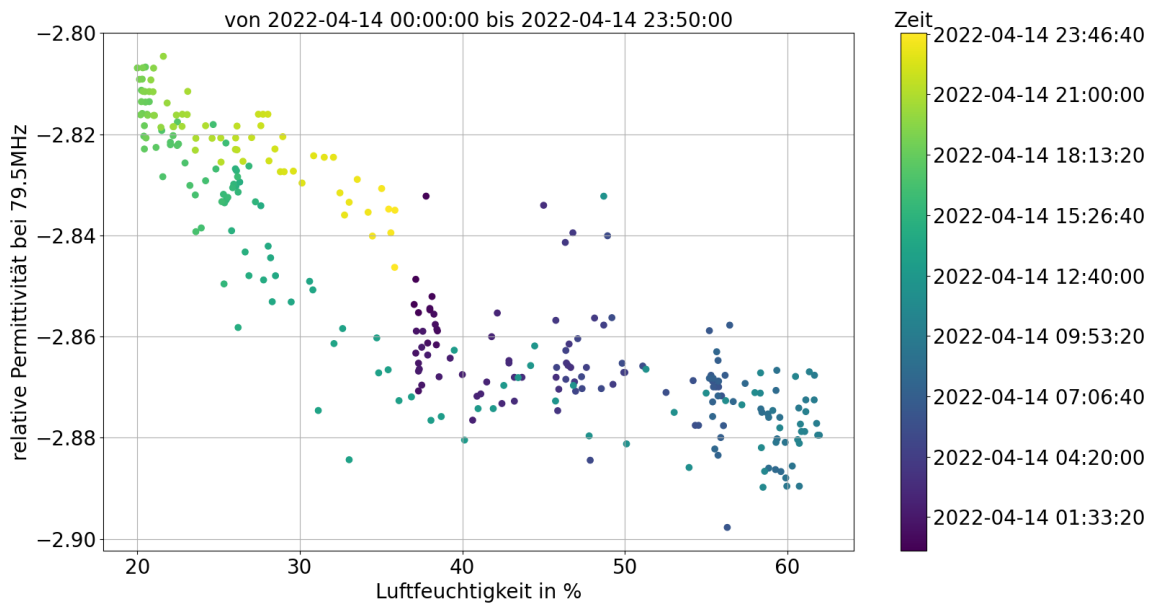


Abbildung 6.12.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 79,5 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0,88.

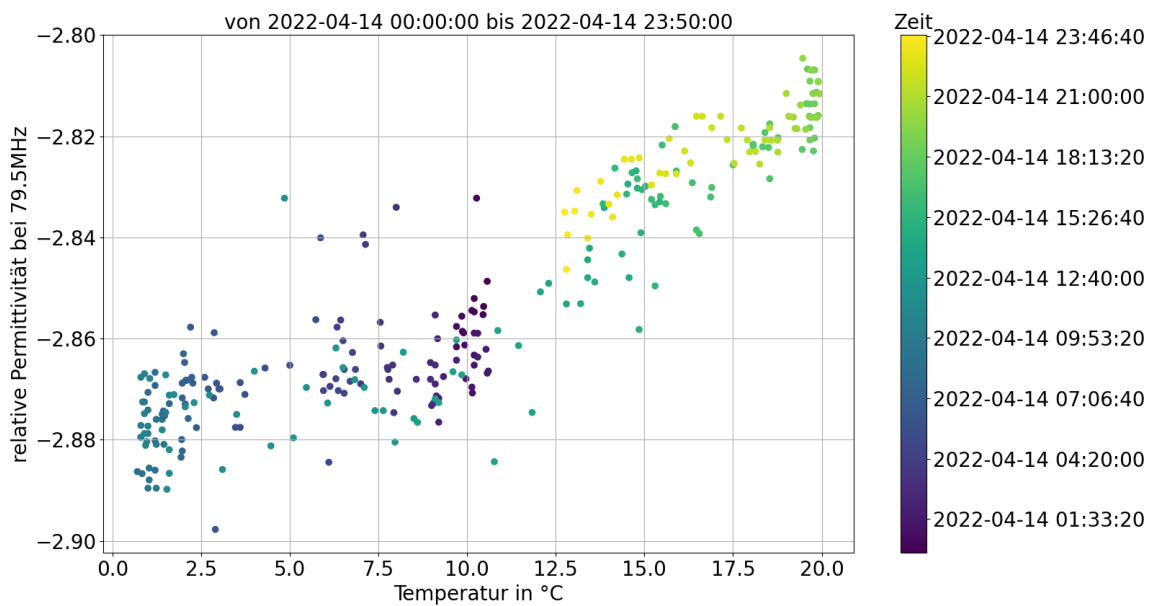


Abbildung 6.13.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur bei 79,5 MHz am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,91.

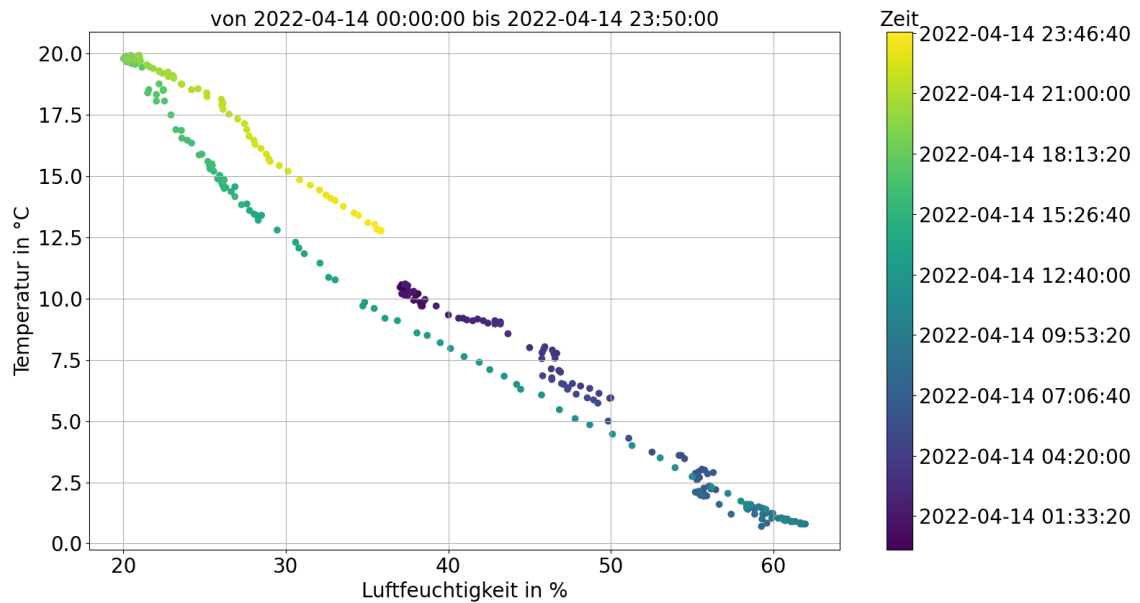


Abbildung 6.14.: Korrelation der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit am 14.04.22.
Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0,99.

Es ist klar zu erkennen, dass mit einem Anstieg der Temperatur die Luftfeuchtigkeit sinkt, ebenso wie mit dem Absinken der Temperatur die Luftfeuchtigkeit steigt. Diese sehr gute Korrelation wird auch durch den Korrelationskoeffizienten, welcher an diesem Tag bei -0,99 liegt, deutlich.

Auch wenn die Korrelationen zwischen der relativen Permittivität und der Temperatur sowie zwischen der relativen Permittivität und der Luftfeuchtigkeit gesondert betrachtet werden, beeinflussen sich die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit, wie beschrieben, gegenseitig. Sie sind daher nicht komplett gesondert zu betrachten.

6.4. Abhängigkeit der Permittivität von Niederschlagsereignissen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der durch Niederschlag hervorgerufenen Änderung der Bodenpermittivität. Die hierfür verwendeten Daten zum Niederschlag liegen

ab dem 20.11.2022 vor. In der Zeit davor konnten keine Niederschlagsereignisse registriert werden, da der Wettersensor bis zu seinem Maximum gefüllt war. Die Permittivitätsdaten weisen in dieser Zeit wiederum große Lücken auf, weshalb lediglich die Daten genutzt werden können, welche mit aufgezeichneten Niederschlagsereignissen zusammenfallen. Entsprechende Tage sind:

- 20.11.22 bis 21.11.22
- 04.12.22
- 29.01.23
- 12.02.23

Davon fand das stärkste Niederschlagsereignis am 29.01.23 von 21:22 Uhr bis 21:44 Uhr mit einer Gesamtintensität von 2,60 mm/h statt. Dieses ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Zwischen 21:29 Uhr und 21:33 Uhr erreichte es mit einer Intensität von 0,55 mm/h seinen Höchstwert.

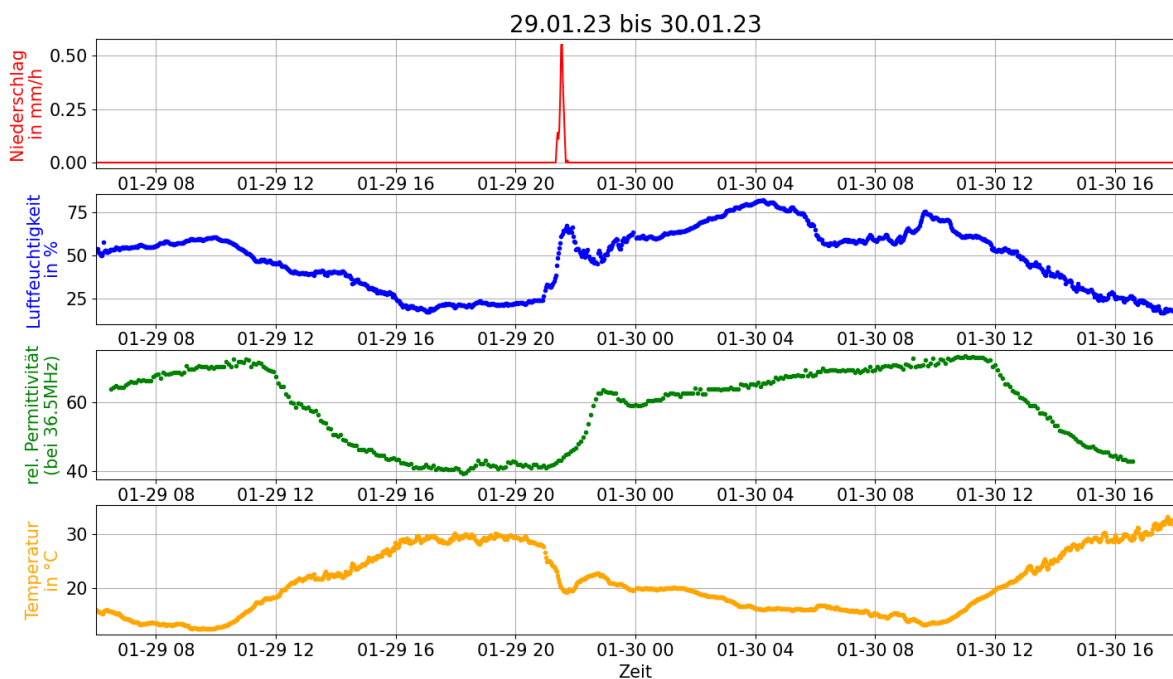


Abbildung 6.15.: Regenerereignis am 29.01.23.

Während die Luftfeuchtigkeit durch den Niederschlag von 22 % um 20:16 Uhr auf 67 % um 21:42 Uhr anstieg, sank die Temperatur von 29,3 °C um 20:21 Uhr bis sie um 21:42 Uhr ihren lokalen Minimalwert von 19,2 °C erreichte.

Die Permittivität stieg erwartungsgemäß durch das Regenereignis an. Die höchste relative Permittivität wurde jedoch erst um 22:55 Uhr gemessen. Während die relative Permittivität vor dem Niederschlag um 21:00 Uhr noch etwa $\varepsilon_r = 41,0$ betrug, erreichte sie ihr lokales Maximum nach dem Niederschlag mit $\varepsilon_r = 63,5$. Ihr Anstieg durch das Regenereignis betrug also knapp 55 % innerhalb von 115 Minuten.

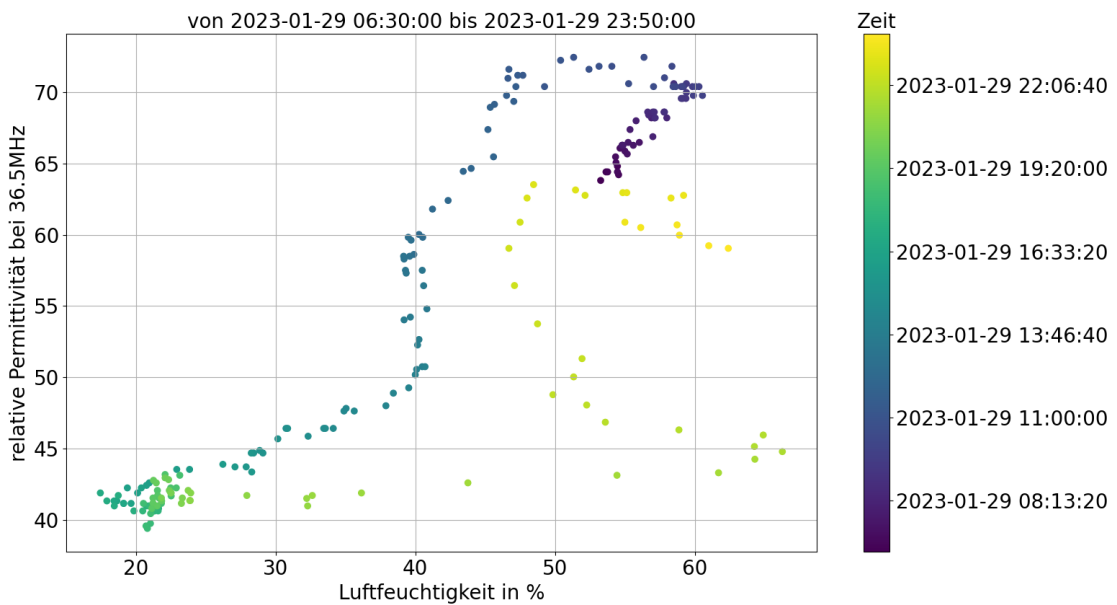


Abbildung 6.16.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 29.01.23.

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,83.

Bei der Betrachtung der Korrelation von relativer Permittivität und Luftfeuchtigkeit am 29.01.23, dargestellt in Abbildung 6.16, sieht man, dass zu Beginn des Tages die Luftfeuchtigkeit ansteigt, wodurch es auch zu einem Anstieg der relativen Permittivität kommt. Wenn die Luftfeuchtigkeit am späten Vormittag wieder sinkt, bleibt die relative Permittivität zunächst im hohen Bereich, bis sie etwas später ebenfalls sinkt. Nachdem beide Werte ihr jeweiliges Minimum erreicht haben, steigt die Luftfeuchtigkeit zur Zeit des Niederschlags schnell an. Der Anstieg der relativen Permittivität beginnt erst etwas später und zunächst auch langsamer. Als die Luftfeuchtigkeit nach dem Regenereignis ab

21:42 Uhr bereits wieder sinkt, steigt die relative Permittivität schließlich schnell an, bis sie ab 22:55 Uhr wieder langsam sinkt. Die Luftfeuchtigkeit steigt zu diesem Zeitpunkt bereits wieder an.

Die restlichen Niederschlagsereignisse sind deutlich weniger ausgeprägt und weisen dadurch nur geringe Einflüsse auf die relative Permittivität auf. Beim in Abbildung 6.17 dargestellten Regenereignis vom 20.11.22 bis zum 21.11.22, ist zwar ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit zu erkennen, die Temperatur ändert sich durch den Niederschlag, welcher eine geringe Gesamtintensität von 0,07 mm/h aufweist, jedoch kaum. Auch bei der relativen Permittivität ist kein klarer Anstieg durch den Niederschlag erkennbar.

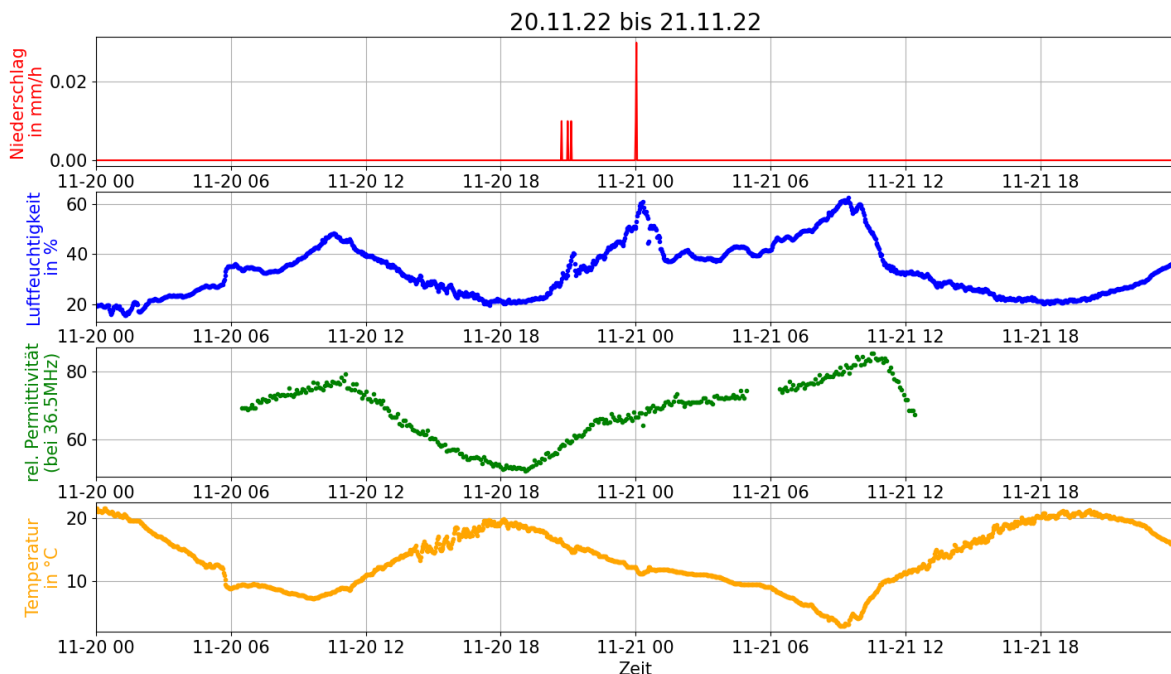


Abbildung 6.17.: Regenereignis am 20.11.22 und 21.11.22.

Das Niederschlagsereignis vom 04.12.22, welches in Abbildung 6.18 dargestellt ist, fand von 20:30 Uhr bis 20:47 Uhr statt, wobei bereits um 19:50 Uhr ein geringer Niederschlag gemessen wurde. Die Niederschlagsintensität lag an dem Tag bei insgesamt 0,25 mm/h. Während die relative Permittivität vor dem Regenereignis noch im Bereich von $\epsilon_r = 47,0$ lag, stieg sie nach dem Regenereignis auf bis zu $\epsilon_r = 58,4$ an. Der durch den Niederschlag

hervorgerufene Anstieg der relativen Permittivität lag somit bei etwa 22% innerhalb von 155 Minuten.

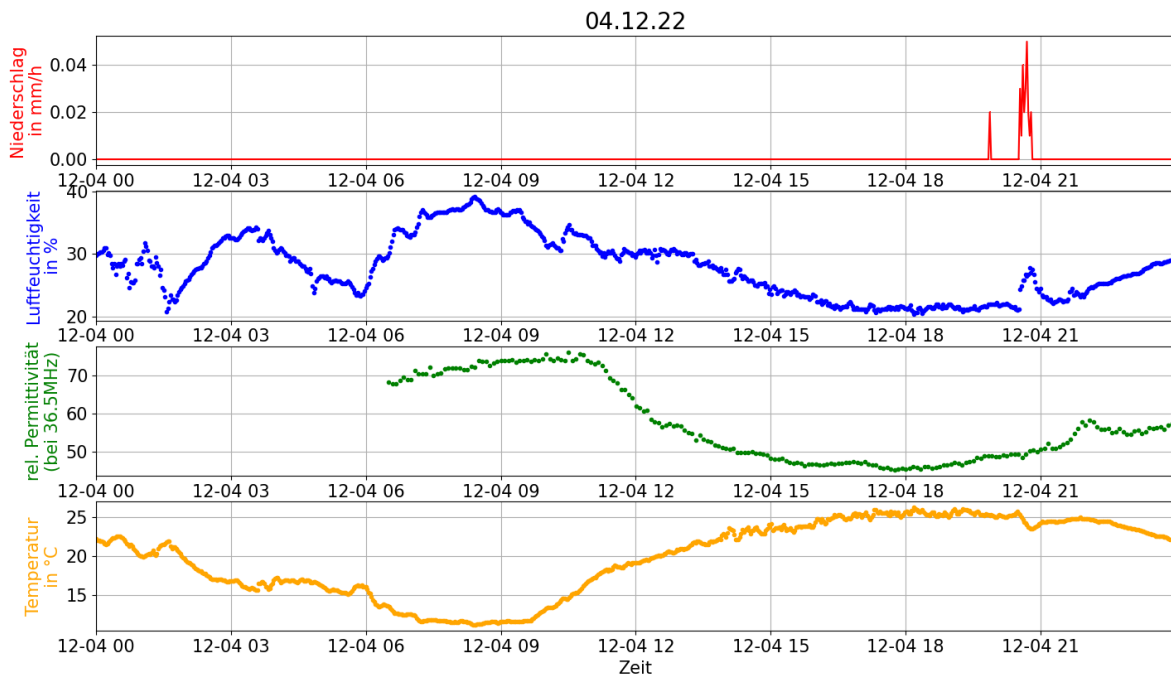


Abbildung 6.18.: Regenerereignis am 04.12.22.

Der Niederschlag der am 12.02.23 gegen 20:36 Uhr erfasst wurde, weist eine Intensität von 0,01 mm/h auf. Man sieht in Abbildung 6.19, dass die geringe Niederschlagsmenge keine erkennbare Auswirkung auf die Temperatur und die relative Permittivität hat. Die Luftfeuchtigkeit sinkt gegen 18 Uhr sprunghaft auf unter 5% und bleibt auch nach dem Niederschlag auffallend niedrig im Bereich unter 10%. Ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit durch das Regenerereignis ist nicht zu erkennen.

Die sprunghafte Veränderung und die auffallend niedrigen Werte lassen auf eine vorübergehende Fehlfunktion des Wettersensors in Bezug auf die Luftfeuchtigkeit schließen.

Ob es sich bei dem gemessenen Niederschlag ebenfalls um eine fehlerhafte Messung handelt ist nicht zu überprüfen, da bei dieser sehr geringen Niederschlagsmenge keine Veränderung der Permittivitäts- oder Temperaturwerte zu erwarten ist.

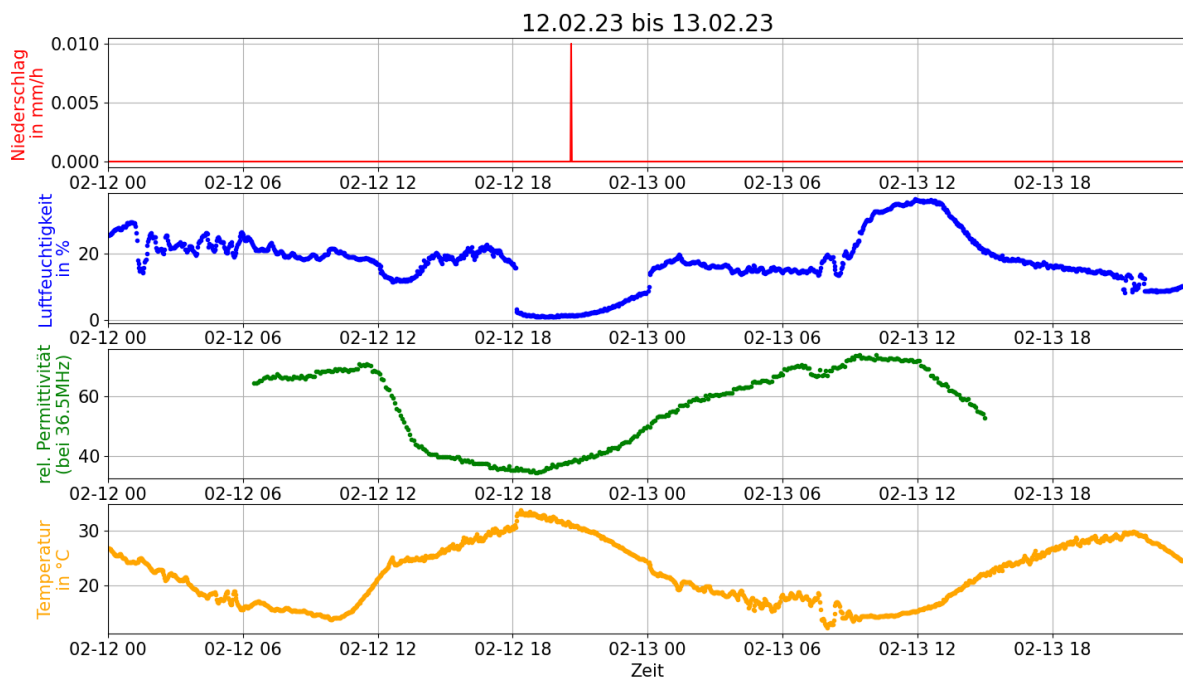


Abbildung 6.19.: Regenereignis am 12.02.23.

Bei der Betrachtung der vorliegenden Niederschlagsereignisse konnte festgestellt werden, dass sehr geringe Niederschlagsmengen keinen Einfluss auf die relative Permittivität hatten. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Regenmenge nicht ausreichte, um tief genug in den Boden zu sickern um auf die Sonde zu treffen, welche sich in einer Tiefe von etwa 0,18 m im Boden befindet [2].

Insgesamt konnten nur zwei Regenereignisse betrachtet werden, die zu einer Änderung der relativen Permittivität geführt haben. Unter der vereinfachten Annahme, dass durch die fehlerhafte Kalibrierung des VNA, bei 36,5 MHz nur eine falsche Skalierung vorliegt, kann daraus der Schluss gezogen werden, dass Regenereignisse mit einer Gesamtintensität von 2,60 mm/h eine Erhöhung der relativen Permittivität um den ermittelten Faktor von knapp 55% innerhalb von 115 Minuten verursachen. Bei dem geringeren Niederschlagsereignis von 0,25 mm/h entstand hier eine Änderung der relativen Permittivität um etwa 22% innerhalb von 155 Minuten.

Es wurde somit festgestellt, dass der Faktor um den sich die relative Permittivität erhöht von der Niederschlagsmenge abhängt. Zudem ist die Latenzzeit zwischen dem Regenereignis und dem Maximum der relativen Permittivität bei stärkeren Regenereignissen kürzer.

Da dies jedoch nur anhand von zwei Ereignissen untersucht werden konnte, müssen diese Überlegungen anhand einer größeren Datenmenge verifiziert werden. Sowohl die größere Erhöhung der relativen Permittivität, sowie die geringere Latenzzeit werden möglicherweise durch die größeren Wassermengen verursacht, da diese schneller und in größeren Mengen in den Boden eindringen. Außerdem hat ein stärkeres Regenereignis eine größere Auswirkung auf die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von den Umweltparametern Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag auf die relative Permittivität des Bodens am Pierre-Auger-Observatorium zwischen dem 06.04.22 und dem 13.02.23 untersucht. Bei der Auswertung der Daten der relativen Permittivität, welche im Frequenzbereich von 30,0 MHz bis 79,5 MHz vorlagen, wurden Werte im Bereich von $\varepsilon_r = -174$ bis $\varepsilon_r = 128$ berechnet.

Es konnte eine starke Abhängigkeit der relativen Permittivität von der Frequenz festgestellt werden, welche im betrachteten Frequenzbereich nicht der Erwartung entspricht. Ebenso ergab die Auswertung, dass die relative Permittivität in unphysikalischen, teilweise negativen Bereichen lag. Sowohl die starke Frequenzabhängigkeit, als auch die unphysikalischen Werte waren auf eine fehlerhafte Kalibrierung des VNA zurückzuführen.

Da sich die Auswirkungen von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Niederschlag auf die relative Permittivität bei den einzelnen Frequenzen stark unterschieden, wurde mit 36,5 MHz eine Frequenz ermittelt, bei der die relative Permittivität ein physikalisch sinnvolles Verhalten aufwies, obwohl die Absolutwerte weit über den Erwartungswerten lagen. Es wurde festgestellt, dass ein klarer Zusammenhang zwischen Änderungen der Luftfeuchtigkeit, sowie der Temperatur und der relativen Permittivität besteht. Zudem wies die relative Permittivität bei 36,5 MHz eine durchgehend hohe Korrelation zur Temperatur sowie zur Luftfeuchtigkeit auf.

Trotz diverser Probleme, wie einer instabilen Stromversorgung und einem saturierten Regensensor konnte anhand eines starken Regenereignisses ein Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität und Niederschlag festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die relative Permittivität durch den Niederschlag signifikant erhöhte. Ein ähnliches Verhalten konnte bei einem weiteren, weniger ausgeprägten Regenereignis bestätigt

werden. Dennoch wären weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Niederschlagsereignissen, sowie einer präzisen Kalibrierung, erforderlich, um den festgestellten Zusammenhang zu bestätigen.

Die Auswertung hat gezeigt, dass der Aufbau zur Messung der relativen Permittivität vor Ort eine Neuinstallation benötigt. Die Kalibrierung sollte dabei unbedingt sehr sorgfältig durchgeführt und zeitnah durch die Auswertung überprüft werden. Die Stromversorgung der Station wurde bereits vor Abschluss dieser Auswertung erneuert [23].

A. Anhang

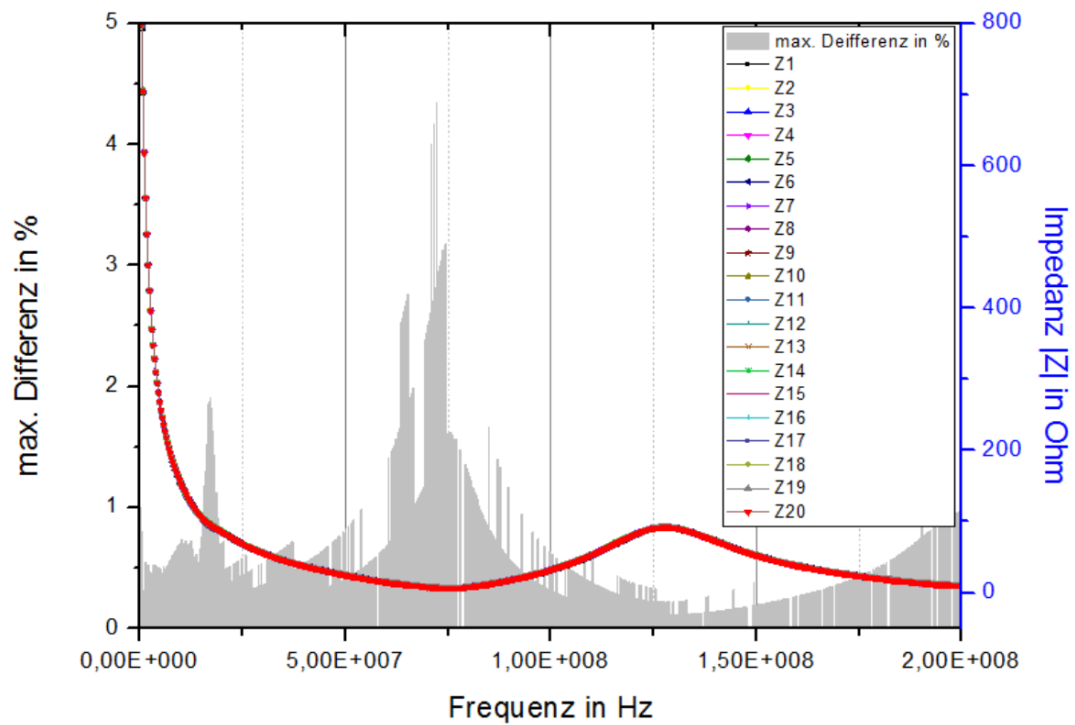


Abbildung A.1.: Die Abbildung zeigt die in der Diplomarbeit von M. Kasten durchgeführte Untersuchung der Impedanz auf statistische Fehler bei Bodenmessungen. Dazu wurden 20 Einzelmessungen miteinander verglichen [2].

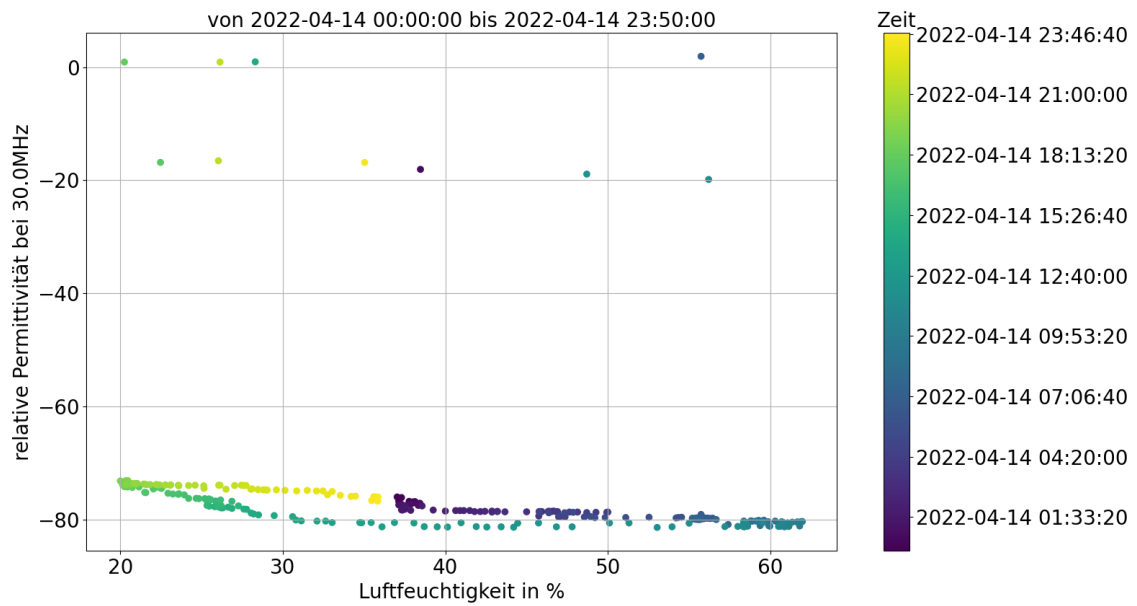


Abbildung A.2.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 30,0 MHz.
 Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,22.

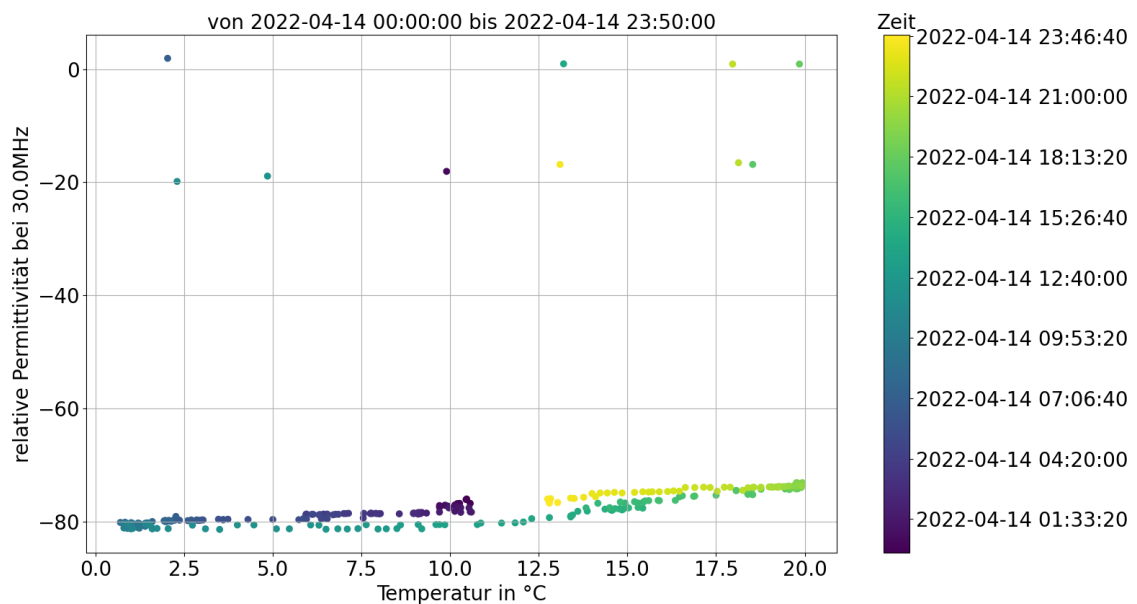


Abbildung A.3.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 30,0 MHz.
 Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,23.

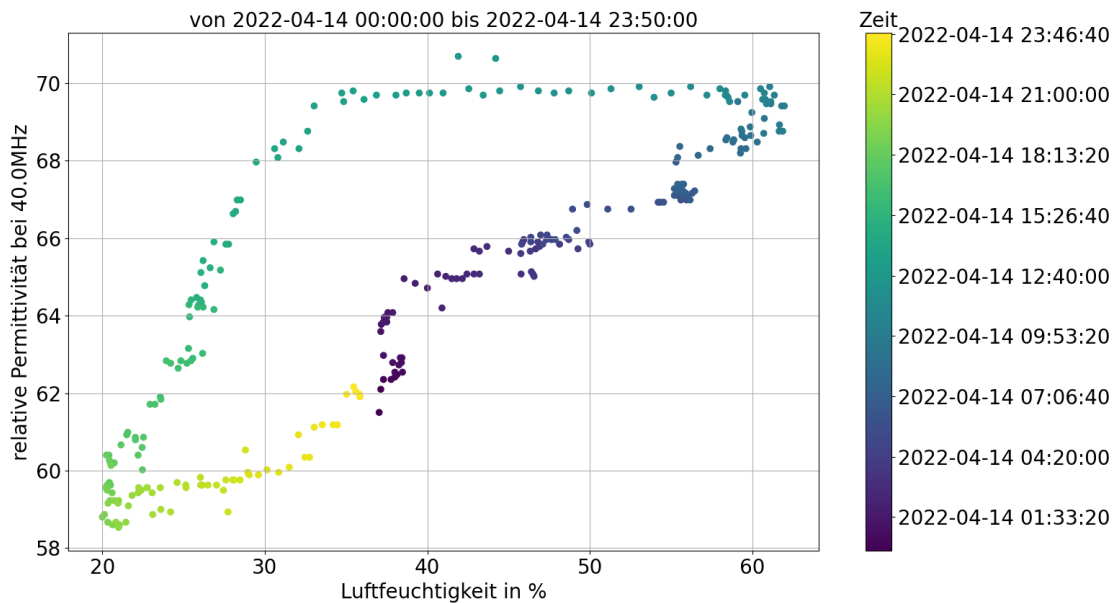


Abbildung A.4.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 40,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,81.

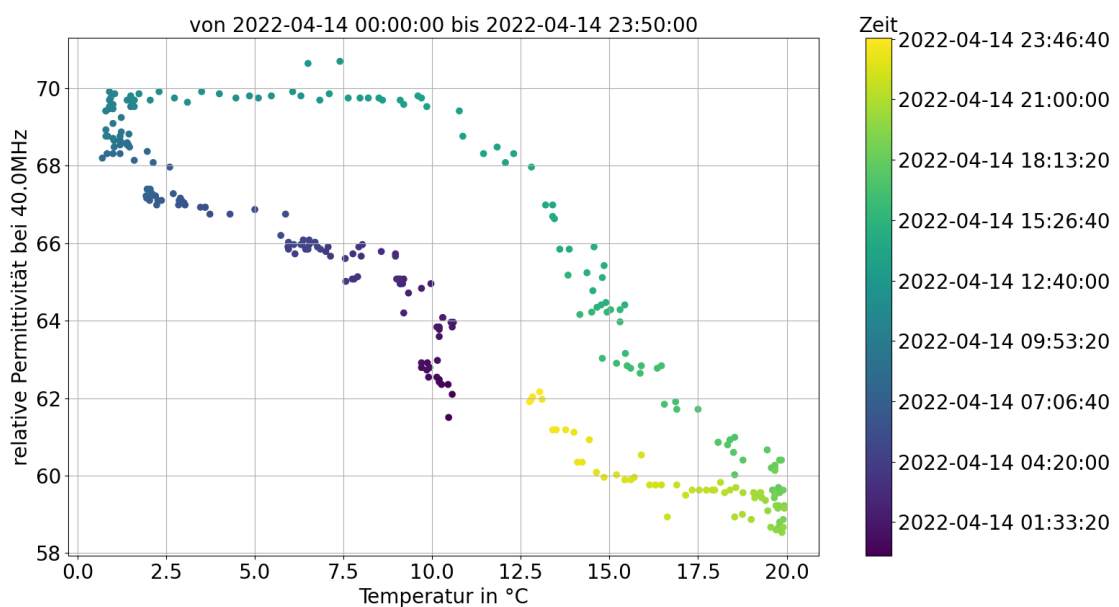


Abbildung A.5.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 40,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,88.

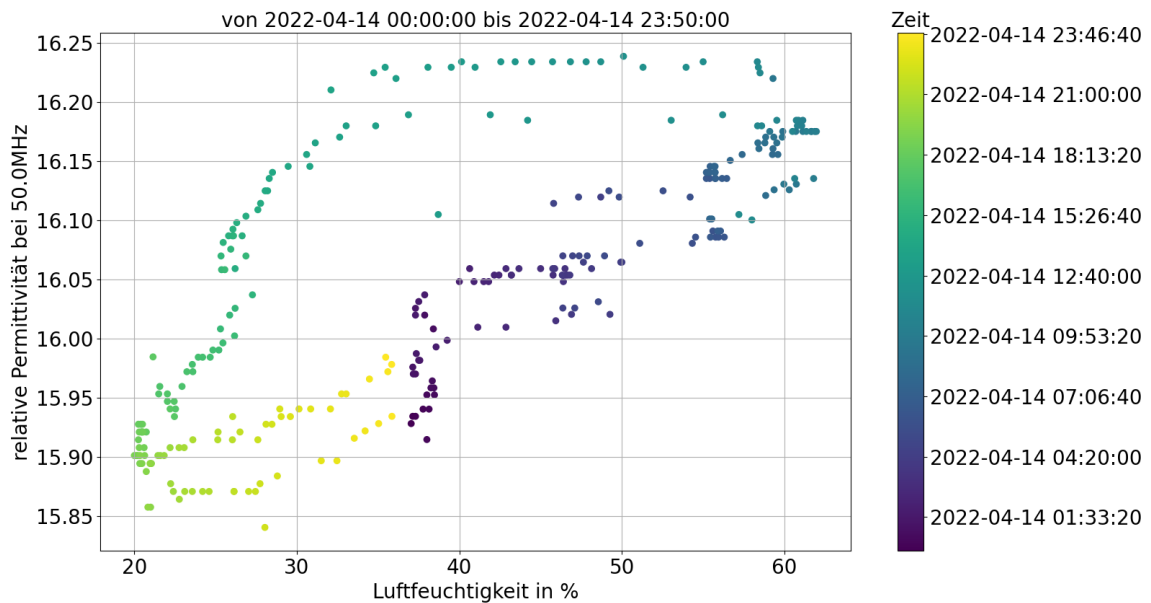


Abbildung A.6.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 50,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,73.

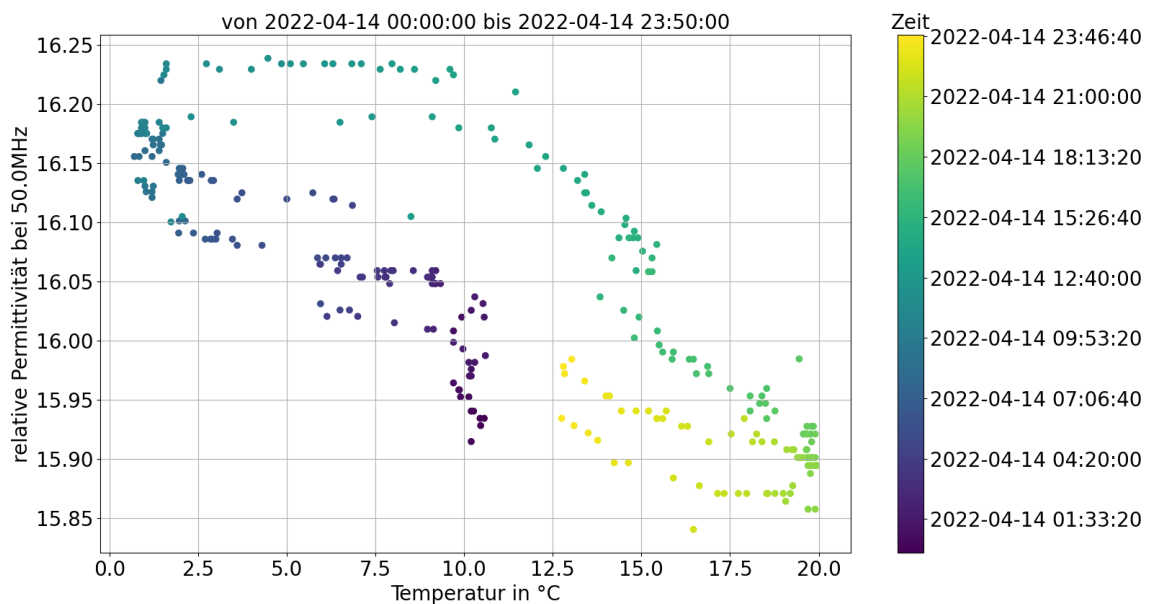


Abbildung A.7.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 50,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,80.

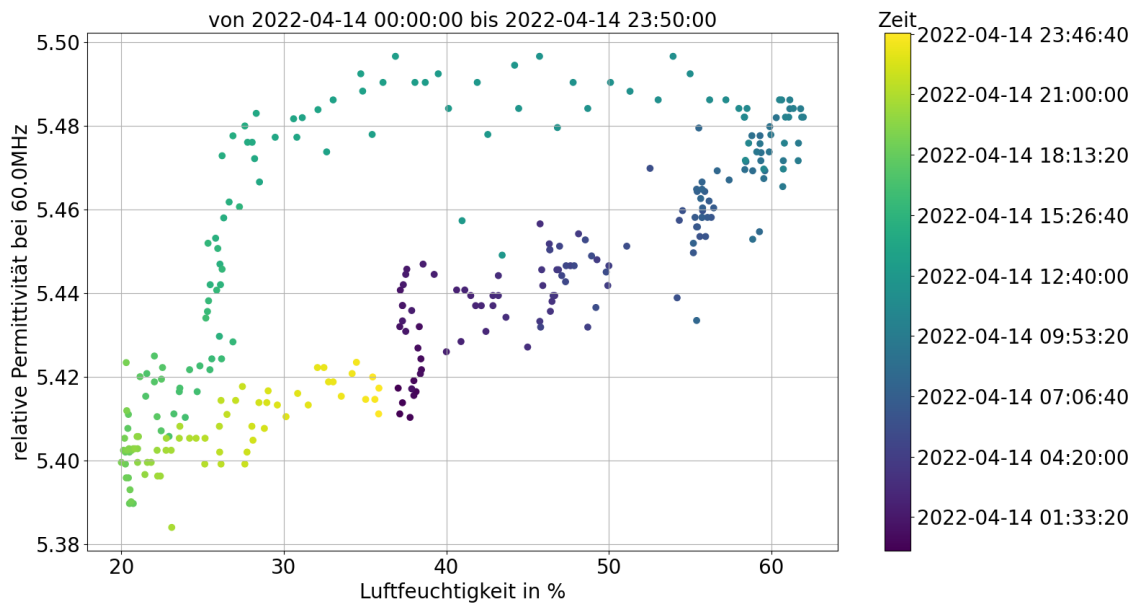


Abbildung A.8.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 60,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,71.

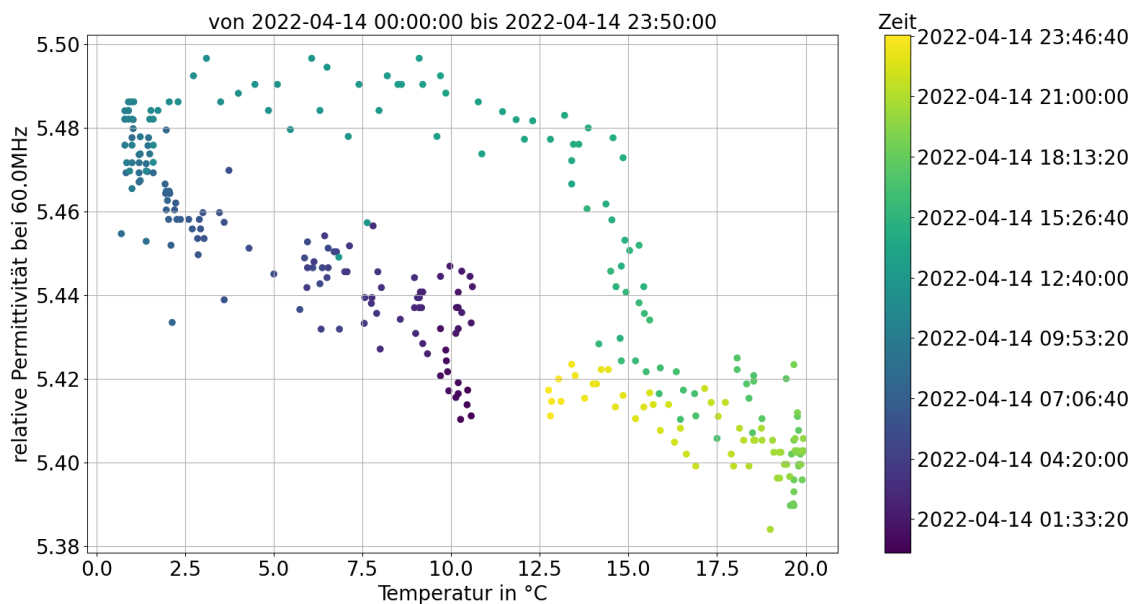


Abbildung A.9.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 60,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,78.

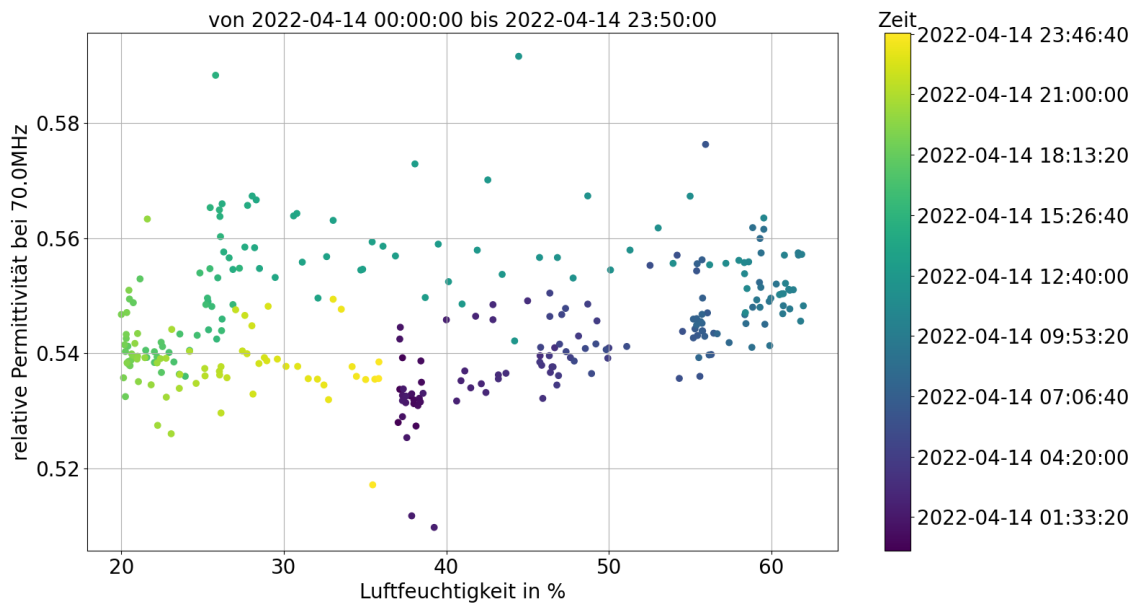


Abbildung A.10.: Korrelation der relativen Permittivität und der relativen Luftfeuchtigkeit am 14.04.22 bei 70,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,21.

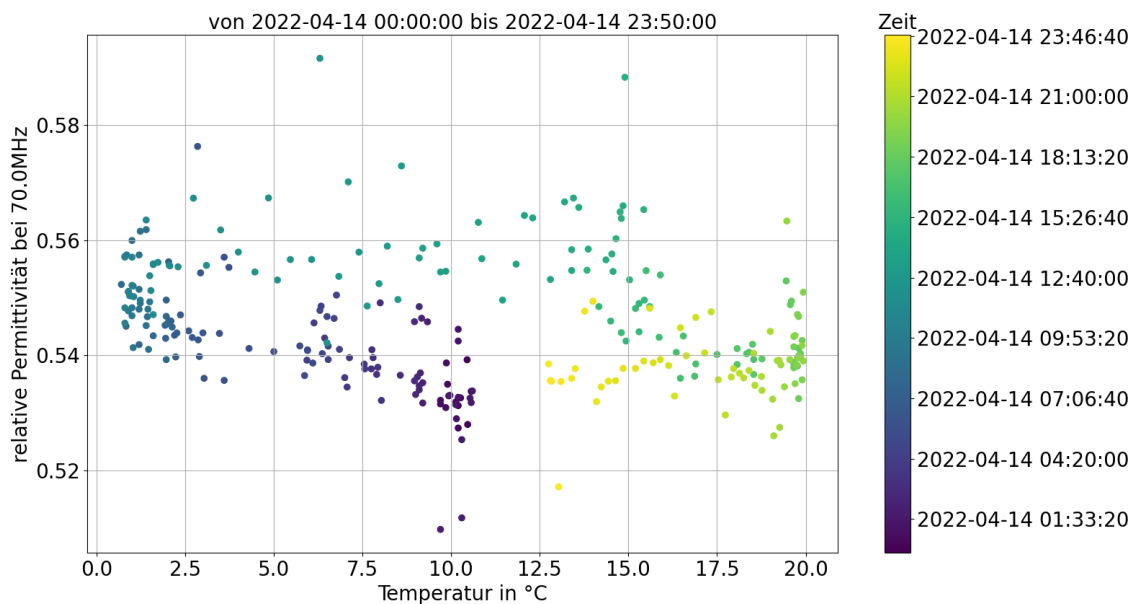


Abbildung A.11.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 14.04.22 bei 70,0 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,28.

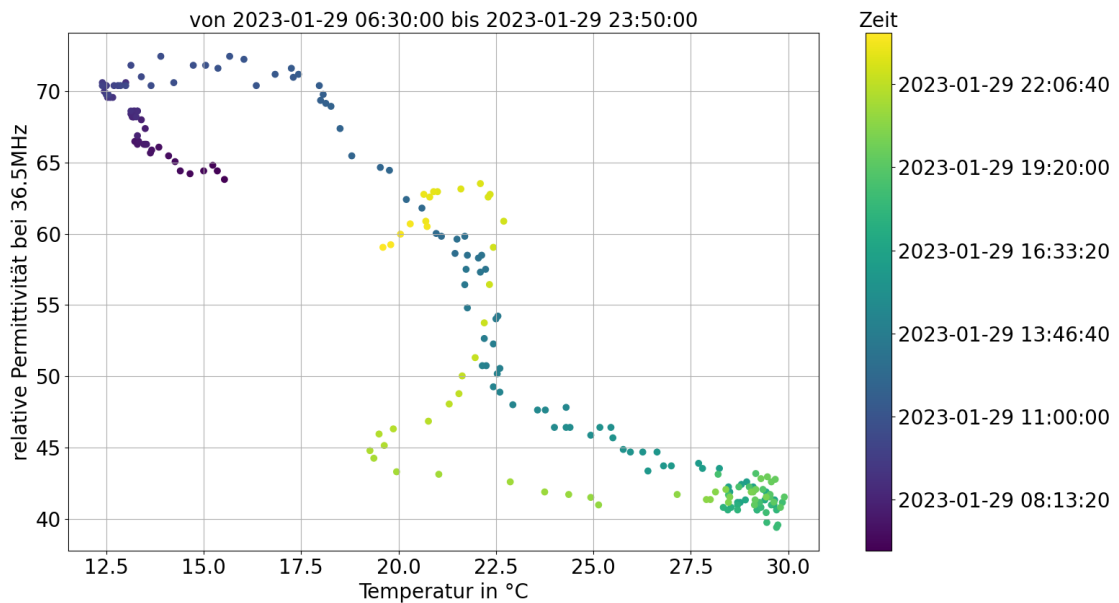


Abbildung A.12.: Korrelation der relativen Permittivität und der Temperatur am 29.01.23 bei 36,5 MHz.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,92.

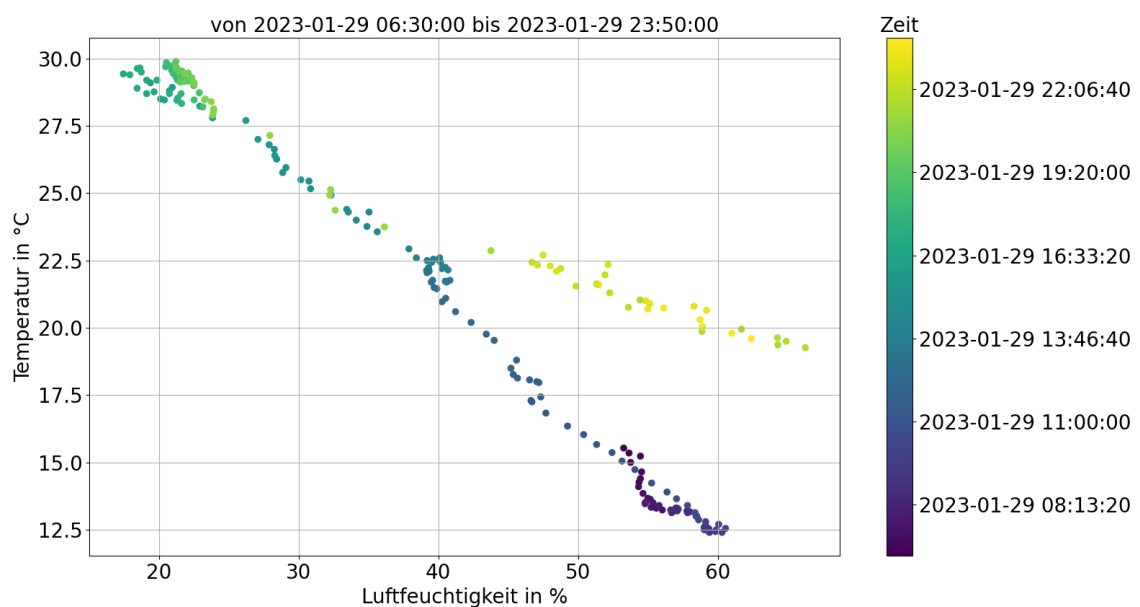


Abbildung A.13.: Korrelation der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit am 29.01.23.
Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,93.

Literatur

- [1] The Pierre Auger Collaboration. *The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report*. 2016. arXiv: 1604.03637.
- [2] Matthias Kasten. “Aufbau einer Mess-Station zur kontinuierlichen Bestimmung der Bodeneigenschaften beim Auger Engineering Radio Array”. Diplomarbeit. Bergische Universität Wuppertal, 2015. URL: <https://astro.uni-wuppertal.de/fileadmin/physik/astro/mainpage/publications/theses/Diplom/Kasten-Diplom.pdf>.
- [3] Victor Franz Hess. “3. Concerning Observations of Penetrating Radiation on Seven Free Balloon Flights”. In: *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975*. Hrsg. von Kenneth R. Lang und Owen Gingerich. Übers. von Brian Doyle. Cambridge, MA und London, England: Harvard University Press, 1979, S. 13. ISBN: 9780674366688. DOI: doi:10.4159/harvard.9780674366688.c5.
- [4] The Pierre Auger Collaboration. “The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 798 S.172-213* (2015). DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.058.
- [5] A. Abdul Halim u. a. “Radio measurements of the depth of air-shower maximum at the Pierre Auger Observatory”. In: *Phys. Rev. D* 109 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.109.022002.
- [6] *The Pierre Auger Observatory*. 2025. URL: <https://www.auger.org/observatory/observatory> (besucht am 29.08.2025).
- [7] A. Abdul Halim u. a. “AugerPrime surface detector electronics”. In: *Journal of Instrumentation* 18.10 (2023), P10016. DOI: 10.1088/1748-0221/18/10/P10016.

-
- [8] Tim Huege. “The Radio Detector of the Pierre Auger Observatory – status and expected performance”. In: *EPJ Web Conf.* 283 (2023). DOI: 10.1051/epjconf/202328306002.
- [9] A. Aab u. a. “Measurement of the Radiation Energy in the Radio Signal of Extensive Air Showers as a Universal Estimator of Cosmic-Ray Energy”. In: *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241101.
- [10] A. Aab u. a. “Observation of inclined EeV air showers with the radio detector of the Pierre Auger Observatory”. In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2018.10 (2018). DOI: 10.1088/1475-7516/2018/10/026.
- [11] Observatorio Pierre Auger. *RD*. 2022. URL: <https://visitantes.auger.org.ar/index.php/rd/> (besucht am 01.09.2025).
- [12] Tim Huege. “Radio detection of cosmic rays with the Auger Engineering Radio Array”. In: *EPJ Web Conf.* 210 (2019). DOI: 10.1051/epjconf/201921005011.
- [13] John David Jackson. *Klassische Elektrodynamik*. Übers. von Kurt Müller. 5. Aufl. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2014. ISBN: 9783110334463.
- [14] DKE – VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. *IEV Nummer: 121-12-13*. 2025. URL: <https://www.dke.de/de/services/iev-woerterbuch/iev-schablonen-detailseite?id=41144&type=dke%7Ciev> (besucht am 11.09.2025).
- [15] Tim Huege. *Radio Detection of Cosmic Rays – Achievements and Future Potential*. 2017. arXiv: 1704.05348.
- [16] Ewa Marlen Holt. “Combined Detection of Muons and Radio Emission of Cosmic-Ray Air Showers”. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2018. DOI: 10.5445/IR/1000083318.
- [17] Jannis Pawlowsky. “Analysis of the Permittivity Data Measured at the Pierre Auger Observatory”. Bachelorarbeit. Bergische Universität Wuppertal, 2018. URL: <https://astro.uni-wuppertal.de/fileadmin/physik/astro/mainpage/publications/theses/Bachelor/Pawlowsky-BSc.pdf>.
- [18] ITU-Radiocommunication Sector. *Recommendation ITU-R P.527-6: Electrical characteristics of the surface of the Earth*. Techn. Ber. International Telecommunication Union, 2021. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-6-202109-I!!PDF-E.pdf (besucht am 12.09.2025).

- [19] Q. Dorosti Hasankiadeh und T. Huege. *The weather stations at the Auger Engineering Radio Array*. GAP2016_030. 2016.
- [20] VAISALA. *User's Guide Vaisala Weather Transmitter WXT520*. 2012. URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/M210906EN-C.pdf> (besucht am 11.09.2025).
- [21] Dr. Jannis Pawlowsky: Private Kommunikation.
- [22] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton und Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics. Volume II: Mainly Electromagnetism and Matter*. 6. Aufl. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1977. ISBN: 020102117X.
- [23] Dr. Julian Rautenberg: Private Kommunikation.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst einmal besonders bei Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert bedanken, der es mir als Erstgutachter ermöglicht hat, diese Arbeit an der BUW zu schreiben.

Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr. Stefan Ulmer, der sich als Zweitgutachter der HHU zur Verfügung gestellt hat.

Außerdem möchte ich mich bei Dr. Julian Rautenberg herzlich für seine Unterstützung während des gesamten Arbeitsprozesses bedanken, und dafür, dass er mir geholfen hat, meine Ergebnisse in einem positiveren Licht zu betrachten, obwohl die Datenlage so schlecht war. Ebenso danke ich Dr. Jannis Pawlowsky, der mir ebenfalls immer wieder mit gutem Rat zur Seite stand.

Ein weiterer großer Dank geht an die gesamte Auger-Arbeitsgruppe für ihre hilfreichen Rückmeldungen während der Meetings und auch, dass immer jemand zur Stelle war, wenn man irgendwie Hilfe brauchte.

Bei meinen Kommilitonen und guten Freunden Joshi und Carina möchte ich mich ganz besonders bedanken. Nicht nur für ihre Unterstützung und Ratschläge während der Bachelorarbeit, sondern auch für ihre andauernde Unterstützung und Gesellschaft während unseres gesamten Studiums.

Zu guter Letzt danke ich auch ganz besonders meiner Familie und meinen weiteren Freunden für ihre durchgehende, vielfältige Unterstützung. Ein großer Dank im Zuge dieser Arbeit gilt dabei ganz besonders Simon, Mira, Marina, Jonas, Malte und Motte.