

Diese Arbeit wurde vorgelegt am
Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft

Laboruntersuchungen zur Dämpfung von Powerline- Kommunikation in Niederspannungsverteilnetzen

Laboratory Investigations of Attenuation of Powerline Communication in Low
Voltage Distribution Grids

Projektarbeit

von

Herrn Chijun Zhang

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser
2. Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Ulbig

Betreuer: Philipp Lutat, M. Sc.
Marcel Kurth, M. Sc.
Aachen, 31. Dezember 2021

Kurzfassung

Seit das Stromversorgungssystem aus den erneuerbaren Energiequellen ausgebaut wird, entsteht eine Herausforderung, dass die Stromversorgung und -nutzung dezentral werden. Um diese Herausforderung zu überwinden, wird das Smart Grid Konzept entwickelt. Eine der Kommunikationstechniken von Smart Grid ist Powerline-Kommunikation, die die elektrischen Energiekabel nutzt, um die Informationen zu übermitteln. Die Powerline-Kommunikation wird von der Dämpfung des Energiekabels beeinträchtigt. Die Dämpfung kann von Kabellänge, Kabelmaterialien, Frequenz usw. abhängen.

In dieser Projektarbeit wird zuerst ein Prüfstand aufgebaut, um zu untersuchen, wie ein Muffenstück im Mittelspannungskabel mit und ohne Muffen-Abzweig die Dämpfung beeinflusst. Nach der Dämpfungsmessung an diesem Prüfstand wird ein anderer Prüfstand zur Messung der temperaturabhängigen Dämpfung der Mittelspannungskabel aufgebaut. Nach der Messung der temperaturabhängigen Dämpfung werden die Messdaten in Python implementiert und analysiert, um herauszufinden, welche Einflüsse der Muffen-Abzweig, die Temperatur, die Frequenz und die Kabellänge auf die Dämpfung der Niederspannungskabel haben.

Abstract

Since the power supply system is expanded from the renewable energy sources, a challenge arises that the power supply and usage become decentralized. To overcome this challenge, the smart grid concept is developed. One of the communication techniques of smart grid is powerline communication, which uses the electric power cables to transmit the information. Powerline communication is affected by the attenuation of the power cable. The attenuation may depend on cable length, cable materials, frequency etc.

In this project work, a test platform is firstly set up to investigate how a sleeve piece in the medium voltage cable with and without a sleeve branch affects the attenuation. After the attenuation measurement on this test platform, another test platform is set up to measure the temperature-dependent attenuation of the medium-voltage cables. After measuring the temperature-dependent attenuation, the measurement data will be implemented and analyzed in Python to find out what influences the sleeve branch, temperature, frequency and cable length have on the attenuation of the low-voltage cables.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation.....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	1
2 Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Powerline-Kommunikation	3
2.1.1 Kategorien	3
2.1.2 Impedanz	4
2.1.3 Dämpfung	5
2.1.4 Modell.....	6
3 Versuchsaufbau.....	9
3.1 Muffenmessung.....	9
3.2 Messung der temperaturabhängigen Dämpfung.....	10
4 Ergebnisse.....	11
4.1 Datenanalyse der Muffenmessung.....	11
4.2 Datenanalyse der Messung der temperaturabhängigen Dämpfung.....	13

5 Zusammenfassung und Ausblick.....	23
--	-----------

Literaturverzeichnis.....	25
----------------------------------	-----------

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ersatzschaltbild der Powerline [And06]	4
Abbildung 2: PLC-Modell [And06]	6
Abbildung 3: PLC-Modell in einem Niederspannungsverteilnetz [Elf18]	7
Abbildung 4: Dämpfungen der beiden Testfälle Leerlauf und mit 50 Ohm	11
Abbildung 5: Regression der Dämpfungen der beiden Testfälle Leerlauf und mit 50 Ohm.....	12
Abbildung 6: Differenz der beiden Dämpfungskurven und deren Regression.....	13
Abbildung 7: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 30m.....	14
Abbildung 8: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 15m.....	14
Abbildung 9: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 10m.....	15
Abbildung 10: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 30m.....	15
Abbildung 11: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 15m.....	16
Abbildung 12: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 10m.....	16
Abbildung 13: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 30m.....	17
Abbildung 14: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 15m.....	17
Abbildung 15: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 10m.....	18
Abbildung 16: Dreidimensionale Darstellung der Regression von Dämpfung bei Kabellänge = 30m.....	19
Abbildung 17: Dreidimensionale Darstellung der Regression von Dämpfung bei Kabellänge = 15m.....	19
Abbildung 18: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(30m) – Dämpfung(15m).....	20
Abbildung 19: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(30m) – Dämpfung(10m).....	20
Abbildung 20: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(15m) – Dämpfung(10m).....	21

Abkürzungsverzeichnis

DLC	Distribution Line Communication
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
H	Morchhauser
HH	Hochspannung Hochleistung
IFHT	Institut für Hochspannungstechnik
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
kW	Kilowatt
MS	Mittelspannung
MW	Megawatt
NS	Niederspannung
OLTC	On Load Tap Changer
ONS	Ortsnetzstation
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
VDN	Verband der Netzbetreiber
PLC	Powerline-Kommunikation

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Verbrauch der konventionellen Energieträger führt nicht nur zum Klimawandel, sondern auch zur Energiekrise. Daher ist der Ausbau des Stromversorgungssystems aus den erneuerbaren Energien nötig. Dies stellt den Netzbetreib und die Netzplanung vor der Herausforderung, dass die Stromversorgung und der Stromverbrauch dezentral werden. Dazu wird das Smart Grid Konzept entwickelt. Das Smart Grid kommuniziert die Stromversorger, -verteiler, und -verbraucher bidirektional und nahezu echtzeitig. Dies wird durch die Vernetzung von Sensorik und Aktorik in den Verteilnetzen und die sichere Kommunikationstechnik realisiert. Ein elektrisches Energiekabel kann nicht nur den Strom übertragen, sondern auch mithilfe der Powerline-Kommunikationstechnik die Daten und Informationen zwischen den Komponenten in den Verteilnetzen übermitteln. Jedoch beeinträchtigt die Dämpfung der Energiekabel die Powerline-Kommunikation. Die Dämpfung kann von Kabelmaterialien, Kabellänge, Frequenz usw. abhängen. Ein Faktor, der die Dämpfung beeinflussen kann und in den Papers des Forschungsgebietes Powerline-Kommunikation wenig untersucht wird, ist Temperatur.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Projektarbeit ist es daher, den Prüfstand zur Messung der Kabeleigenschaften aufzubauen, die temperaturabhängige Dämpfung in Niederspannungsverteilstnetzen zu messen, und die Messdaten zu analysieren.

Im zweiten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Powerline-Kommunikation vorgestellt. Im dritten Kapitel werden der Prüfstandbau und das Messverfahren interpretiert. Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse der Messdatenanalyse gezeigt. Zum Schluss werden die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Powerline-Kommunikation bereit. Zuerst wird Powerline-Kommunikation in ihrem Anwendungshintergrund Smart Grid eingeführt. Nachfolgend werden jeweils Kategorien, Impedanz, Dämpfung und Modell der Powerline-Kommunikation betrachtet.

2.1 Powerline-Kommunikation

Im Vergleich zu konventionellen Stromnetzen versorgen Smart Grids nicht nur Elektrizität, sondern auch übertragen Informationsflüsse jeweils zwischen Stromerzeugern und -verteilern und zwischen Stromverteilern und -verbrauchern. Dies erfordert echtzeitige Kommunikation basierend auf dem Internet of Things [Elf18]. Eine der dafür wesentlichen Kommunikationstechnologien ist Powerline-Kommunikation. Eine Powerline ist ein elektrisches Energiekabel, in dem die Frequenz des Signals auf höher als 50 Hz moduliert wird, um das Übertragungsmedium zu realisieren [Kel11].

Powerline-Kommunikation ermöglicht intelligente Anwendungen in Demand Side Management, Rekonfiguration der Grids, echtzeitiger Preisbildung usw [Can13]. Gegenüber anderen Kommunikationstechnologien reduziert Powerline-Kommunikation die Abhängigkeit der Stromverteiler von dritten Dienstleistern in Verwaltung und Kontrolle der Grids [Can13]. Dies garantiert Datenschutz und Sicherheit und verringert die Kosten für Datenverwaltung [Can13].

2.1.1 Kategorien

Powerline-Kommunikation (PLC) verfügt über zwei Kategorien. Eine ist schmalbandige PLC, eine ist breitbandige PLC [Kel11].

Die CENELEC-A Norm lässt der schmalbandigen PLC den Frequenzbereich von 9 kHz bis zu 95 kHz zu, wobei in den USA die Federal Communications Commission die Frequenz bis zu 500 kHz erlaubt [Aal12]. Der typische Einsatz der schmalbandigen PLC ist in Überwachung, Optimierung, Automation und Schutz der Smart Grids [Elf18], [Duc14]. Die schmalbandige PLC weist eine geringe Datenrate bis zu 128 kbps auf

[Aal12]. Dies macht die schmalbandige PLC einen optimalen Kandidaten für Datenfernauslesen in Smart Metering, weil während Datenfernauslesen keine großen Datemengen übertragen werden [Kel11].

Der Frequenzbereich der breitbandigen PLC ist von 1,8 MHz bis zu 28 MHz und ihre Datenrate ist bis zu 220 Mbps [Aal12]. Wegen so hoher Frequenz kann Dämpfung passieren [Kel11]. Der typische Einsatz der breitbandigen PLC ist den Internetzugang für Haushalte und Büros und die Vernetzung zwischen diesen beiden zuzusichern [Duc14]. Um den gleichen Einsatz in Anwendungsszenen größeres Maßes zu realisieren, wird die breitbandige PLC durch die Wi-Fi Technologien ersetzt [Fra15].

2.1.2 Impedanz

Impedanz ist ein wichtiger physikalischer Parameter in PLC. Diese ist stark abhängig von den Lastzeiten der Nutzer, wobei die Lasten kontinuierlich am Smart Grid ein- und ausgeschaltet werden [And06]. Auch in verschiedenen Vierteln z.B. Städten, Land und Industrieparks variieren die Impedanzen groß [Cav08]. Dies führt dazu, dass die Impedanzen in Smart Grids häufig nicht angepasst sind, weshalb die Signalreflexionen auftreten und diese die Signalübertragung abbrechen können [And06]. Die Anpassung der Impedanzen in PLC kann nicht nur eine stabile Signalübertragung zusichern, sondern auch die Leistungsflüsse in Powerline maximieren, deshalb müssen die Impedanzen in PLC für die optimale Funktionalität der PLC durch Messung usw. vorher bekannt gemacht werden [Cav08].

Um die Impedanzen der Powerline deutlich in einem Ersatzschaltbild darzustellen, kann die Powerline als ein verteiltes RLC-Netzwerk wie in der Abbildung 1 angesehen werden, in der R' für Widerstandsbelag, L' für Induktivitätsbelag und C' für Kapazitätsbelag steht [And06].

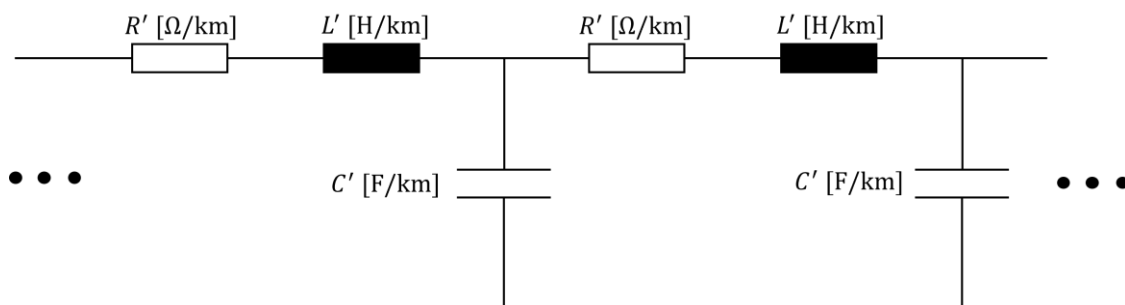


Abbildung 1: Ersatzschaltbild der Powerline [And06]

Der charakteristische Wert der Powerline-Impedanz kann durch

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

berechnet werden, wobei Z die charakteristische Powerline-Impedanz, L die gesamte Powerline-Induktivität und C die gesamte Powerline-Kapazität vertritt [And06]. Der Wertebereich der charakteristischen Powerline-Impedanz ist normalerweise von 70 Ω bis zu 100 Ω [Fer96].

Außer aus den Powerline-Impedanzen bestehen in einem Niederspannungsverteilnetz die Impedanzen in PLC auch aus den Impedanzen der Verteiltransformatoren, die proportional zur Frequenz sind, und den Impedanzen der ans Netz angeschlossenen Geräte, die meistens von 10 Ω bis zu 1000 Ω betragen [Fer96].

2.1.3 Dämpfung

Obwohl die PLC in hohen Frequenzbereichen operiert, ist die Powerline jedoch kein spezielles Kommunikationskabel, das die gleichen Frequenzbereiche wie PLC besitzt, sondern als ein elektrisches Energiekabel entworfen, das die 50 Hz- und 60 Hz-Leistungsflüsse transportiert [Mae06]. Dies führt zum häufigem Auftritt der Dämpfung in Kommunikation. Laut der Definition in [And06] ist Dämpfung in Kommunikation entweder Abnahme der Signalamplitude oder Differenz zwischen den Stärken des Input- und Outputsignals, und kann durch

$$\text{Dämpfung [dB]} = 20 \log \frac{V_{\text{output}}}{V_{\text{input}}} \quad (2)$$

berechnet werden. Dabei bedeutet V_{output} die Stärke des Outputsignals, V_{input} die Stärke des Inputsignals. In einem Niederspannungsverteilnetz kann die Dämpfung pro Kilometer bis zu 100 dB betragen [Fer96].

Dämpfung kann von vielen Faktoren abhängen. Je länger die Powerline ist, je mehr Zweigstellen die Powerline hat, je höher die Trägerfrequenz der Powerline ist, je kleiner die Leitungsquerschnittsfläche ist, umso ist die Dämpfung größer [Mae06], [Wan14], [Duc14]. Die Beziehung zwischen Dämpfung, Trägerfrequenz und Länge der Powerline kann durch die Formel

$$\text{Dämpfung [dB]} = e^{-(a_0 + a_1 f_{\text{Träger}}^k) \cdot \text{Länge der Powerline}} \quad (3)$$

beschrieben werden, in der $f_{Träger}$ für Trägerfrequenz steht, a_0 , a_1 und k die von Leitungseigenschaften und -frequenzen abhängigen Konstanten sind [Wan14]. Außerdem wird Dämpfung von Lastzeiten (Peak, Basic, Bottom) beeinflusst und variiert in verschiedenen Regionen (ländlich, städtisch, industriell) [Fer96], [Tak16]. Die Signale quer durch verschiedene Netzphasen können die Dämpfung von 2 dB bis zu 40 dB im Extremfall erzeugen [Fer96].

In dieser Arbeit wird mithilfe Labormessung untersucht, welchen Zusammenhang die PLC-Dämpfung im Niederspannungsverteilnetz und die Temperatur aufweisen können.

2.1.4 Modell

Die PLC besteht meistens aus Endknoten, Zugangspunkten und Repeaters, wobei die Endknoten die Kommunikation in Smart Grids ermöglichen, die Zugangspunkte die externen Systeme mit den Endknoten verbinden, und die Repeaters die Signale und die Kommunikation zwischen Endknoten und Zugangspunkten im Dämpfungsfall verstärken [Can13].

Rein mathematisch kann ein PLC-Modell durch eine komplexe Übertragungsfunktion

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f_{Träger}^k) \cdot \text{Länge der Powerline}_i} e^{-j2\pi f \frac{\text{Länge der Powerline}_i}{v_{Ausbreitung}}} \quad (4)$$

dargestellt werden [Aal12]. Diese berechnet die Superposition der Signale aus N Powerlines, die jeweils nach dem Faktor g_i gewichtet werden [Aal12]. Die erstere exponentielle Funktion ist die Formel (3), die Dämpfung berechnet. Die letztere exponentielle Funktion beschreibt die Signalechos, in der $v_{Ausbreitung}$ für Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale steht [Aal12].

In der Abbildung 2 wird ein einfach schematisches und für alle Kommunikationsmedien einsetzbares Modell der PLC illustriert [And06].

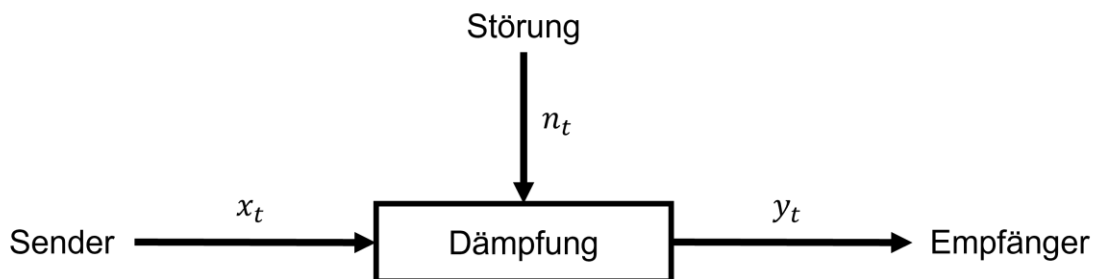


Abbildung 2: PLC-Modell [And06]

Dass das Input-Signal x_t wegen Störungssignal n_t gedämpft wird und im Output-Signal y_t resultiert wie die Abbildung 2 beschreibt, kann durch

$$y_t = x_t \cdot \text{Dämpfungsfaktor} + n_t \quad (5)$$

mathematisch formuliert werden [And06].

In einem Niederspannungsverteilnetz kann ein PLC-Modell wie in der Abbildung 3 illustriert werden, wobei die Kommunikationsqualität hauptsächlich auf Dämpfung, Rauschen der Verteilleitung und Anpassung der Impedanzen ankommt [Elf18].

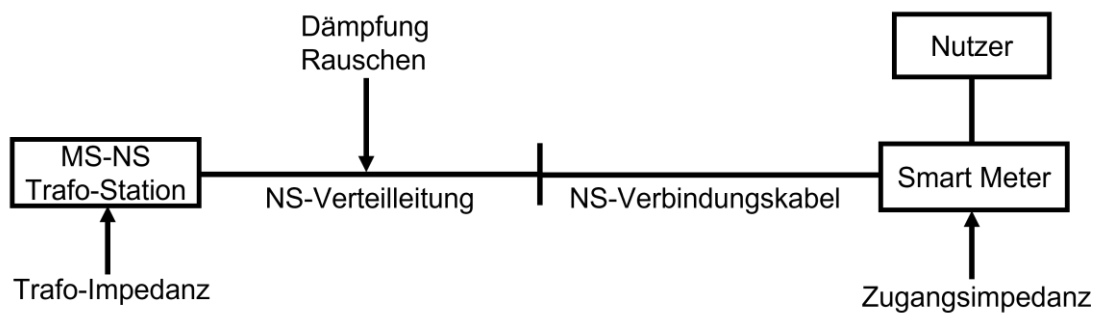


Abbildung 3: PLC-Modell in einem Niederspannungsverteilnetz [Elf18]

3 Versuchsaufbau

Um die PLC-Dämpfung in Niederspannungsverteilsnetzen zu untersuchen, werden zwei Prüfstände jeweils für Muffenmessung und Messung der temperaturabhängigen Dämpfung der Niederspannungskabel aufgebaut.

3.1 Muffenmessung

Für die Muffenmessung wird ein 30 Meter langes Niederspannungskabel aus Aluminium mit einem Querschnitt von 35mm^2 mit einem 15 Meter langen Abgang bereitgestellt. Die beiden Kabelenden werden mit den BNC-Kabeln, die zu einem Network-Analyser führen, verbunden. Dadurch wird ein Messkreis gebildet. Der Network-Analyser misst die Dämpfung des Messkreises und gibt Frequenzen und diesen entsprechende Dämpfungswerte als Messergebnisse aus.

Weil außer das Niederspannungskabel die BNC-Kabel und der Network-Analyser Dämpfung haben und dies die Dämpfungsmesswerte des Niederspannungskabels beeinflusst, wird zuerst die Kalibrierung durchgeführt, indem der Network-Analyser die Dämpfung des Messkreises misst. Danach werden bei jeder Messung die Dämpfungsmesswerte um die Kalibrierungsdämpfung reduziert.

Nach der Kalibrierung werden die BNC-Kabel vom Niederspannungskabel entfernt. Im Mittelpunkt wird das Niederspannungskabel zerschnitten und eine Muffe, die im Mittelpunkt des Kabels die beiden zerschnittenen Kabelhälften wieder verbindet, installiert. Dann werden die beiden Kabelenden mit den BNC-Kabeln verbunden. Der Network-Analyser misst die Dämpfung dieses Messkreises.

Nach der Messung wird ein 15 Meter langes Niederspannungskabel aus Aluminium mit einem Querschnitt von 95mm^2 , dessen Impedanz 50Ω beträgt, in die Muffe eingesteckt, um den Muffen-Abzweig zu bilden. Dann misst der Network-Analyser die Dämpfung dieses Messkreises.

3.2 Messung der temperaturabhängigen Dämpfung

Für die Messung der temperaturabhängigen Dämpfung wird zuerst ein 30 Meter langes Niederspannungskabel aus Aluminium mit einem Querschnitt von 240mm^2 bereitgestellt. Die beiden Kabelenden werden jeweils mit einer Connection-Box verbunden. Die beiden Connection-Boxen werden jeweils durch die kleinen Kabel mit einem High-Frequency-Coupler verbunden. Die beiden High-Frequency-Coupler werden durch die BNC-Kabel mit dem Network-Analyser verbunden. So wird ein Messkreis gebildet.

Zuerst wird die Kalibrierung durchgeführt, indem der Network-Analyser die Dämpfung des Messkreises misst. Dann wird die Temperaturmesstechnik installiert. Die Temperaturmesstechnik besteht aus einem Data-Logger und einem Temperatursensor vom Typ K. Ein 10cm langes und 6cm breites Stück Isolierungshülle des Niederspannungskabels wird aufgeschnitten. Der Sensor wird unter die Isolierungshülle in das Kabel eingesteckt. Dann wird der Sensor mit dem Data-Logger verbunden und der Data-Logger mit dem Computer verbunden, damit die Software die Temperaturen im Niederspannungskabel aufzeichnet.

Dann wird eine Connection-Box durch zwei große Kabel mit der DC-Stromquelle verbunden. Die Stromversorgung wird gestartet. Die Stromversorgung beträgt $1,1\text{kA}$, damit das Niederspannungskabel kontinuierlich aufgeheizt wird. Nachdem die Temperatur im Kabel 75°C erreicht, wird die Stromversorgung gebrochen. Dann wird die Dämpfung des Messkreises gemessen bei jedem Temperaturabfall von $0,2^\circ\text{C}$ oder $0,3^\circ\text{C}$ oder $0,4^\circ\text{C}$, bis die Temperatur auf 20°C sinkt. Dies wird manuell ausgeführt.

Mit dem 15 Meter langen und dem 10 Meter langen Niederspannungskabel aus Aluminium mit demselben Querschnitt wird derselbe Versuchsvorgang wiederholt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messdatenanalyse dargestellt. Die Datenanalyse wurde mithilfe Python realisiert.

4.1 Datenanalyse der Muffenmessung

Die Abbildung 4 zeigt die Dämpfungen in Abhängigkeit von Frequenzen der beiden Testfälle, in denen einmal in die Muffe kein Muffen-Abzweig eingesteckt wurde (Leerlauf), und einmal ein anderes Niederspannungskabel mit dem Widerstand 50 Ohm in die Muffe eingesteckt wurde. Die beiden Dämpfungskurven weisen die Spearman-Korrelation von 0,73 auf. D.h. teilen die beiden Kurven eine hohe lineare Ähnlichkeit.

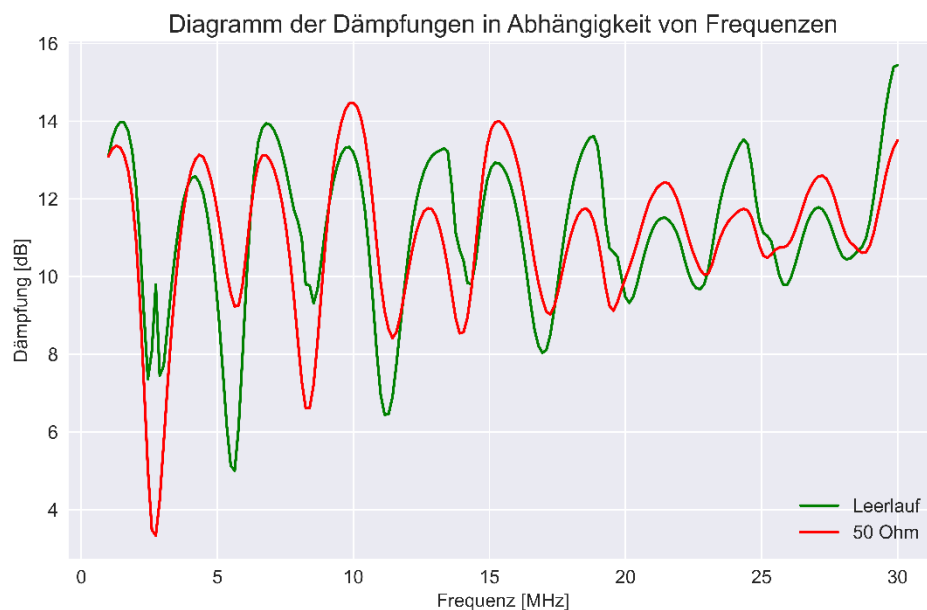


Abbildung 4: Dämpfungen der beiden Testfälle Leerlauf und mit 50 Ohm

Um die Trends vom Kurvenverlauf festzulegen, werden die beiden Regressionslinien der beiden Testfälle mithilfe Kleinst-Quadrat-Regression in der Abbildung 5 ermittelt. Die beiden Dämpfungskurven weisen einen steigenden Trend auf, während die Frequenz zunimmt.

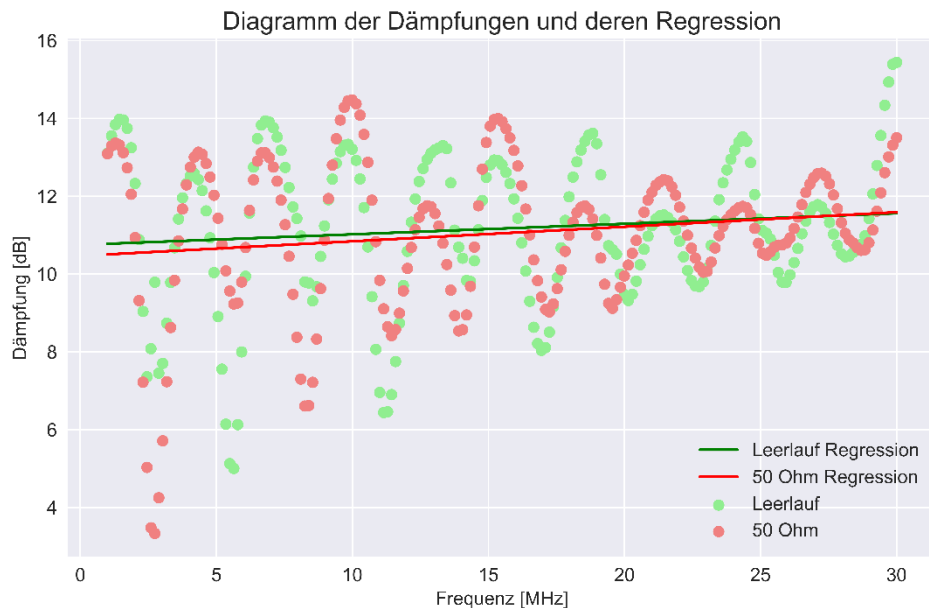


Abbildung 5: Regression der Dämpfungen der beiden Testfälle Leerlauf und mit 50 Ohm

Die Abbildung 6 stellt die Differenzkurve der beiden Dämpfungskurven (Dämpfung(Leerlauf) – Dämpfung(mit 50 Ohm)) und die Regressionslinie der Differenzkurve dar. Die Regressionslinie wurde durch die Kleinste-Quadrate-Regression ermittelt. Die Differenzkurve schwankt periodisch um die Frequenz-Achse (Dämpfung = 0dB), wobei die Periode zwischen 5,4 MHz und 6 MHz beträgt. Innerhalb einer Periode, die Dämpfung des Testfalls Leerlauf ist größer als die Dämpfung des Testfalls mit 50 Ohm für halbe Periode, und für andere halbe Periode ist umgekehrt. Die mathematische Gleichung der Regressionslinie lautet

$$Dämpfung [dB] = -0,0104 \left[\frac{dB}{MHz} \right] \cdot Frequenz [MHz] + 0,283 [dB] \quad (6)$$

Die Regressionslinie weist einen sinkenden Trend auf beim Steigen der Frequenz. Weil die Steigung und der Achsenabschnitt der Regressionslinie beide nahe 0 sind, ist der Trend der Differenzkurve nicht signifikant.

Während die Frequenz zunimmt, verfügt die Dämpfung des Niederspannungskabels mit einer Muffe in der Kabelmitte einen steigenden und schwankenden Trend. Ob die Dämpfung des Kabels ohne Muffen-Abzweig größer als die mit Muffen-Abzweig ist oder umgekehrt, hängt von Frequenz ab. Beim Steigen der Frequenz passiert periodisch, dass in einem Frequenzintervall mit Intervalllänge zwischen 2,7 MHz und 3 MHz die

Dämpfung des Kabels ohne Muffen-Abzweig größer ist, und im nächsten Frequenzintervall mit Intervalllänge zwischen 2,7 MHz und 3 MHz die Dämpfung des Kabels mit Muffen-Abzweig größer ist.

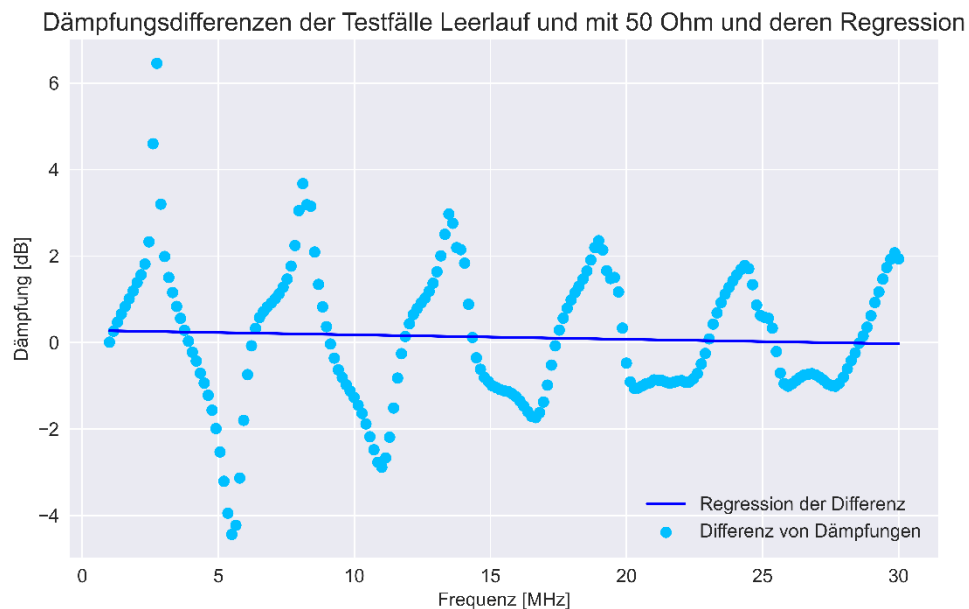


Abbildung 6: Differenz der beiden Dämpfungskurven und deren Regression

4.2 Datenanalyse der Messung der temperaturabhängigen Dämpfung

Die Abbildungen 7, 8, 9 zeigen die dreidimensionale Darstellung der temperaturabhängigen Dämpfung bei Kabellänge von 30m, 15m und 10m. Die Dämpfung ändert sich mit der Änderung der Frequenz, Temperatur und Kabellänge.

Zuerst wird der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfung untersucht. Zur genaueren Untersuchung wird bei jeder Kabellänge die dreidimensionale Darstellung in die zweidimensionale Darstellung in den Abbildungen 10, 11, 12 umgewandelt, wobei die x-Achse die Frequenz-Achse ist, die y-Achse die Dämpfung-Achse ist, und die Farben die Temperaturintervalle darstellen. Die blauen Kurven beschreiben die Dämpfungen der Temperaturen unter 30 °C. Die lila Kurven beschreiben die Dämpfungen der Temperaturen von 30 °C bis 40 °C. Die gelben Kurven beschreiben die Dämpfungen der Temperaturen von 40 °C bis 50 °C. Die roten Kurven beschreiben die Dämpfungen der Temperaturen von 50 °C bis 60 °C. Die braunen Kurven beschreiben die Dämpfungen der Temperaturen über 70 °C.

Diagramm der Dämpfungen in Abhängigkeit von Frequenzen, 30m

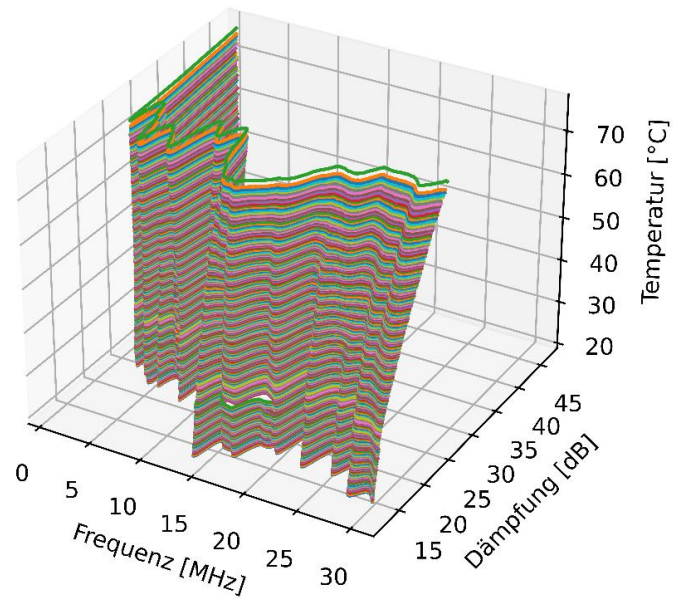


Abbildung 7: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 30m

Diagramm der Dämpfungen in Abhängigkeit von Frequenzen, 15m

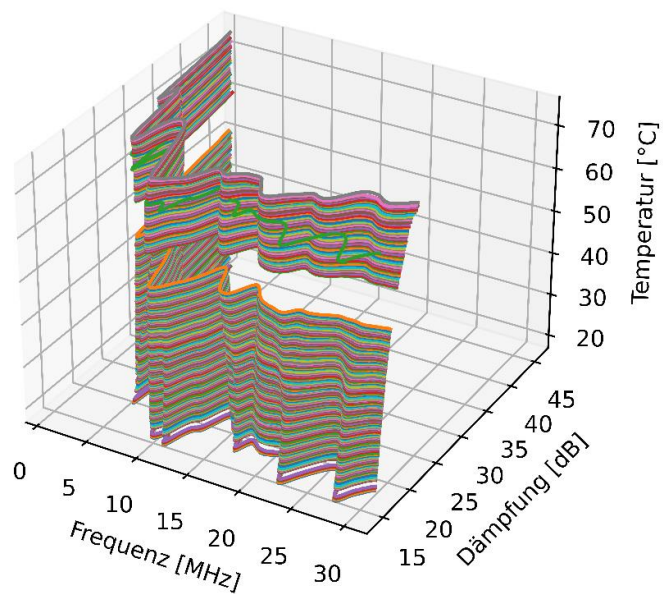


Abbildung 8: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 15m

Diagramm der Dämpfungen in Abhängigkeit von Frequenzen, 10m

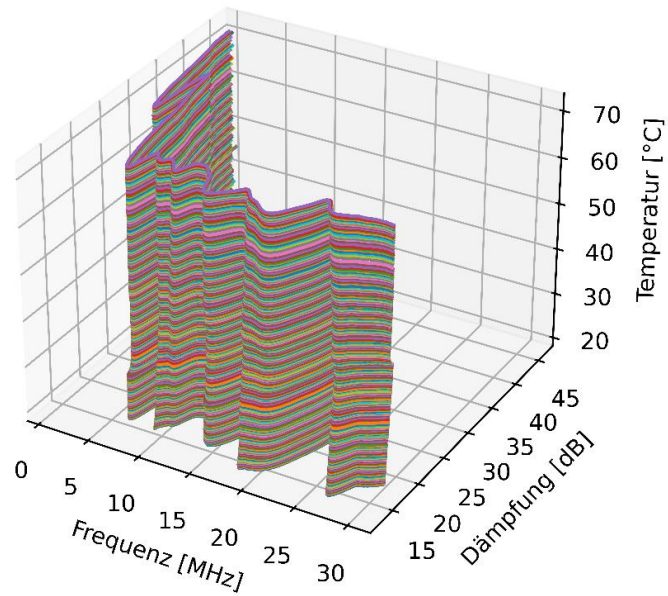


Abbildung 9: Dreidimensionale Darstellung der Dämpfungen bei Kabellänge = 10m

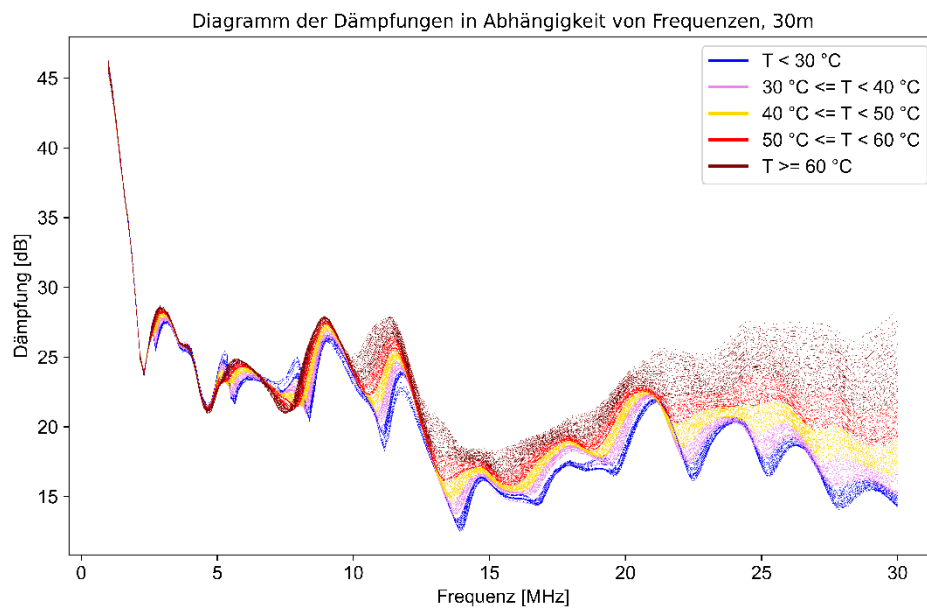


Abbildung 10: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 30m

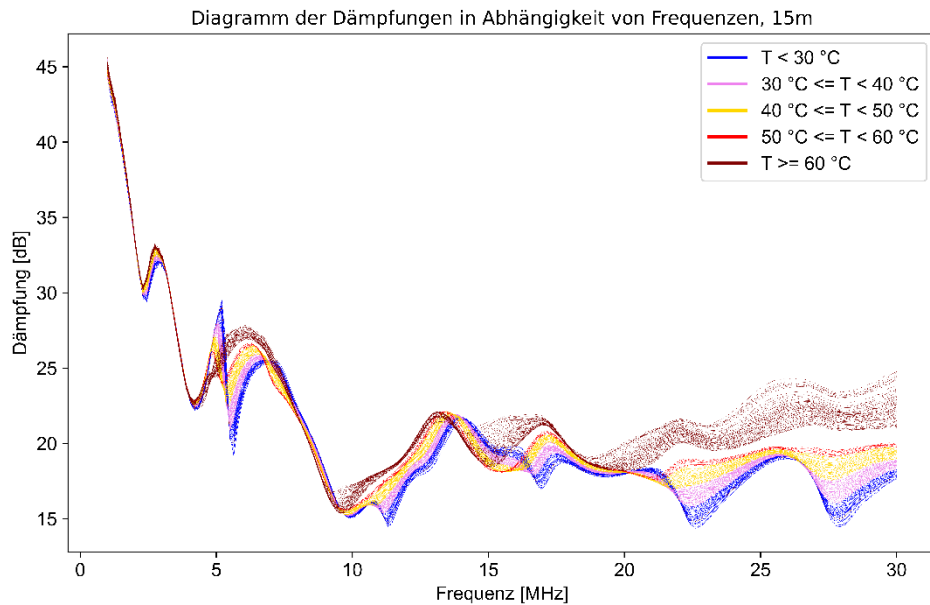


Abbildung 11: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 15m

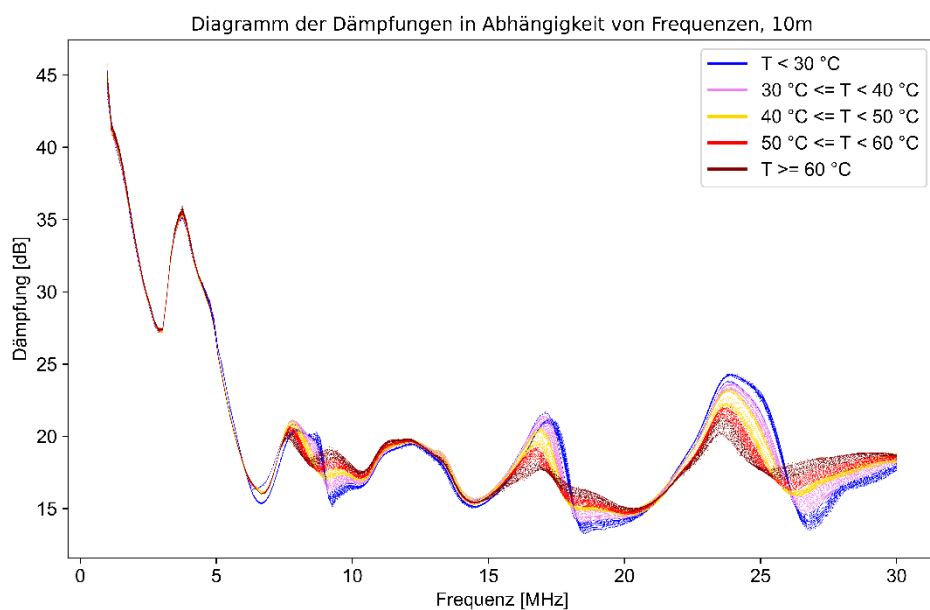


Abbildung 12: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung bei Kabellänge = 10m

In den Abbildungen 10 und 11 sind in den meisten Frequenzpunkten die Dämpfungen höherer Temperaturintervalle höher als die Dämpfungen niedrigerer Temperaturintervalle. In der Abbildung 12 (Kabellänge = 10m) lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob in den meisten Frequenzpunkten die Dämpfungen höherer

Temperaturintervalle höher als die Dämpfungen niedrigerer Temperaturintervalle sind. Um die Trends vom Kurvenverlauf festzulegen, werden die Regressionslinien mithilfe Kleinst-Quadrat-Regression in den Abbildungen 13, 14 und 15 ermittelt.

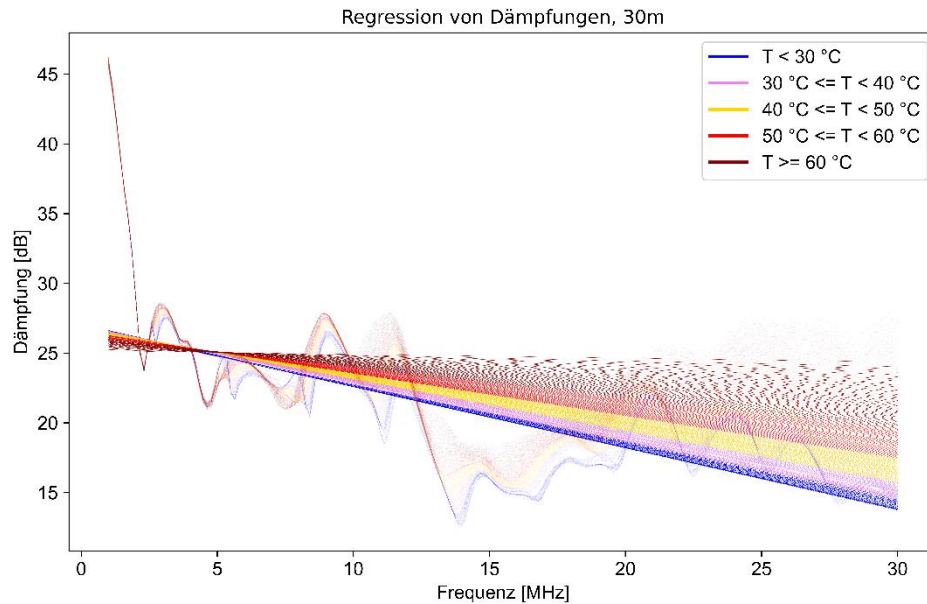


Abbildung 13: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 30m

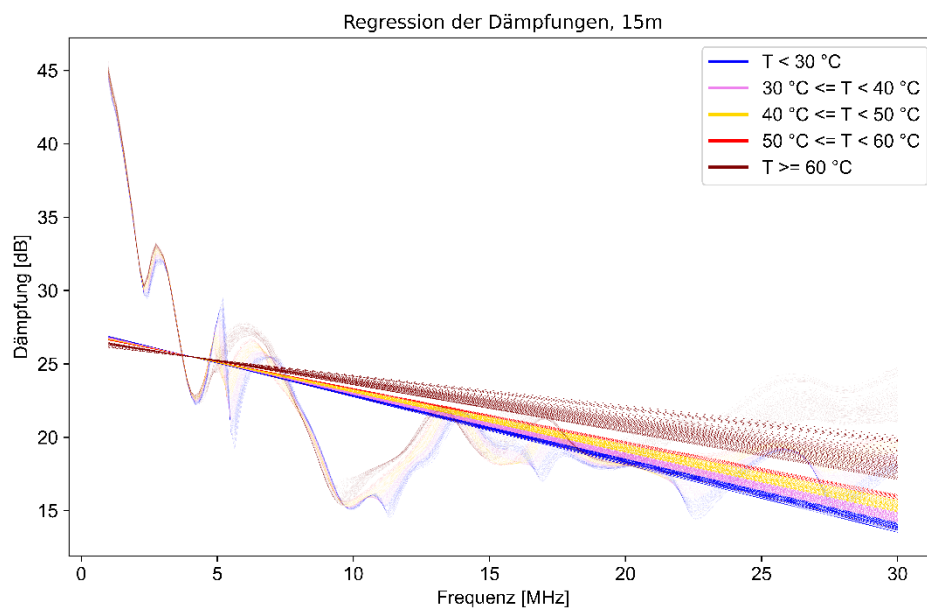


Abbildung 14: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 15m

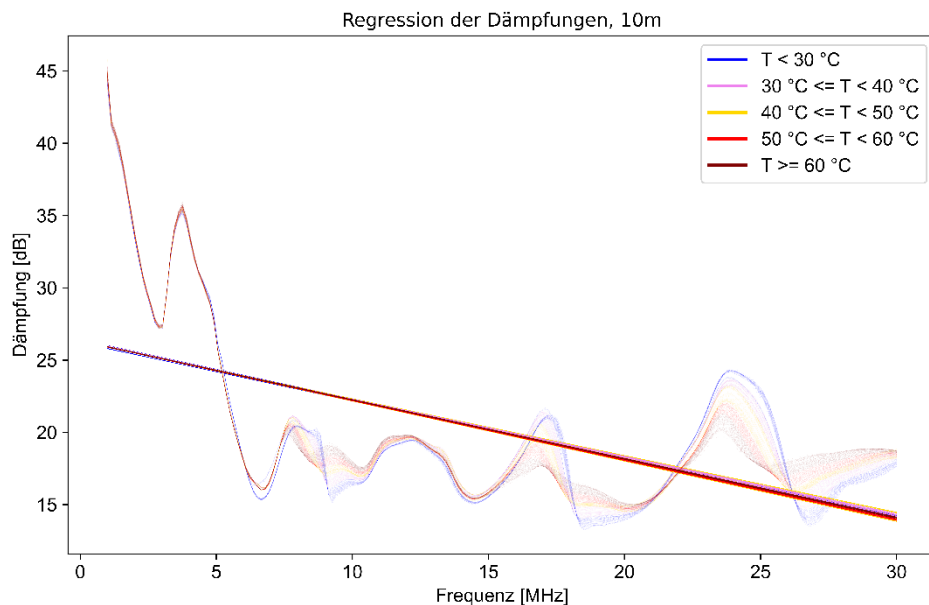


Abbildung 15: Zweidimensionale Darstellung der Dämpfung und deren Regression bei Kabellänge = 10m

Die Regressionslinien bei allen drei Kabellängen weisen einen sinkenden Trend auf beim Steigen der Frequenz. In der Abbildung 13 und 14 sind ab Frequenz von 5 MHz die Regressionslinien höherer Temperaturintervalle höher als die Regressionslinien niedrigerer Temperaturintervalle. In der Abbildung 15 (Kabellänge = 10m) sind alle Regressionslinien konzentriert verteilt, wobei es schwer die Aussagen zu liefern ist, ob die Temperatur bei der Verteilung der Regressionslinien eine Rolle spielt. Daher wird der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfung bei Kabellänge von 10m nicht mehr untersucht. Die Aussage aus den Abbildungen 13 und 14 basiert auf dem Vergleich der fünf Temperaturintervalle. Zur Überprüfung, ob diese Aussage ebenfalls gilt nach dem Vergleich aller einzelnen Temperaturen, werden alle Regressionslinien bei Kabellänge von 30m in der Abbildung 16 und alle Regressionslinien bei Kabellänge von 15m in der Abbildung 17 dreidimensional dargestellt. Werden die Seitenansichten der Abbildungen 16 und 17 von rechts beobachtet (d.h. die Frequenz-Achse ist nun ein Punkt und nur die Dämpfung-Achse und die Temperatur-Achse werden beobachtet), steigt die Dämpfung, während die Temperatur steigt. Bei Kabellänge von 30m steigt die Dämpfung beim Steigen der Temperatur schneller als die bei Kabellänge von 15m. Somit ist Dämpfung mit der Temperatur positiv korreliert bei Kabellängen von 15m und 30m.

Regression von Dämpfungen, 30m

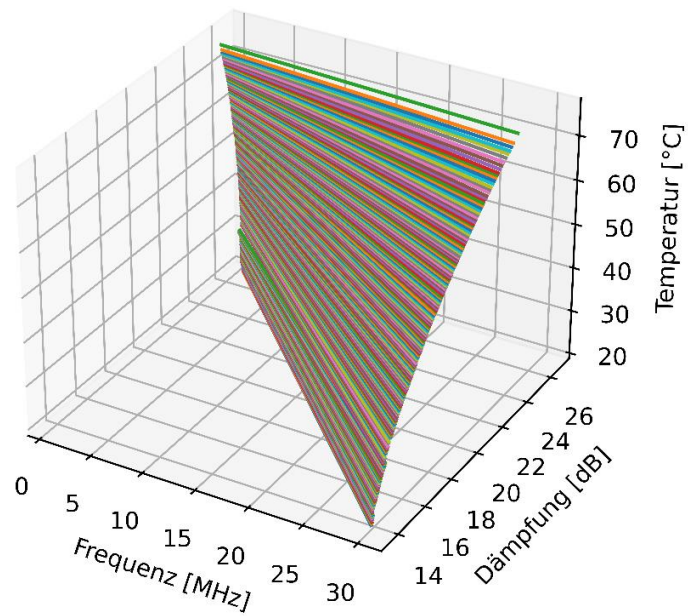


Abbildung 16: Dreidimensionale Darstellung der Regression von Dämpfung bei Kabellänge = 30m

Regression von Dämpfungen, 15m

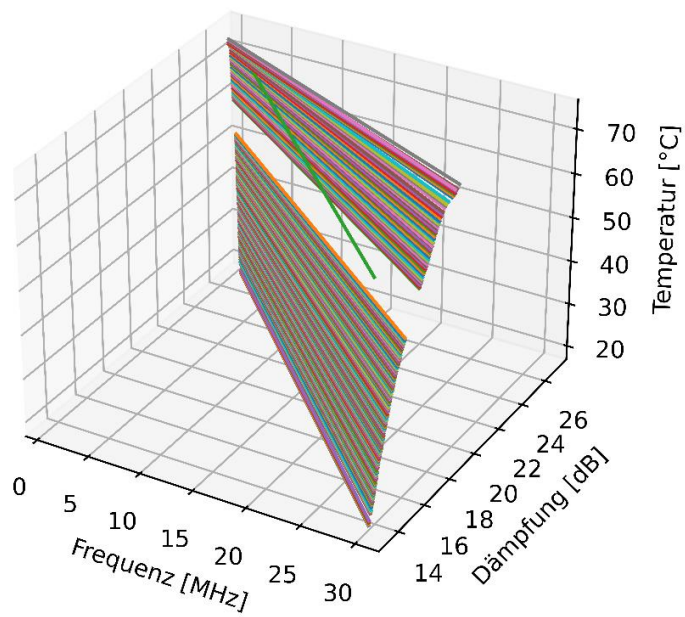


Abbildung 17: Dreidimensionale Darstellung der Regression von Dämpfung bei Kabellänge = 15m

Dämpfung(30m) - Dämpfung(15m)

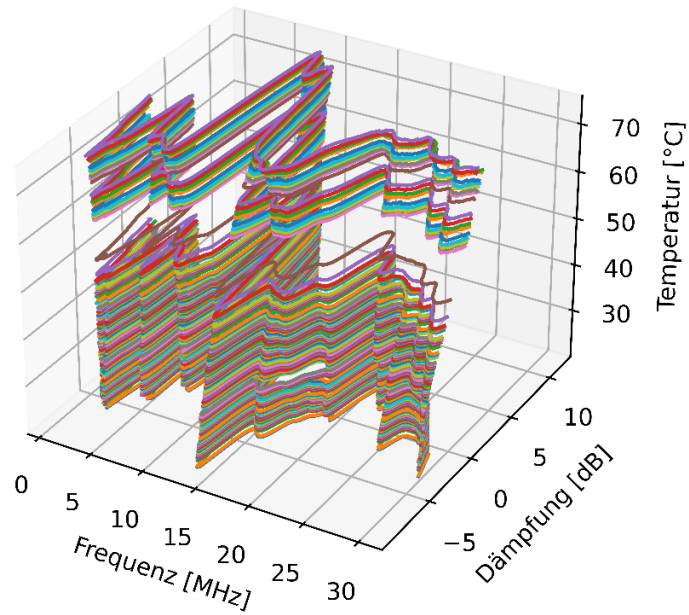


Abbildung 18: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(30m) – Dämpfung(15m)

Dämpfung(30m) - Dämpfung(10m)

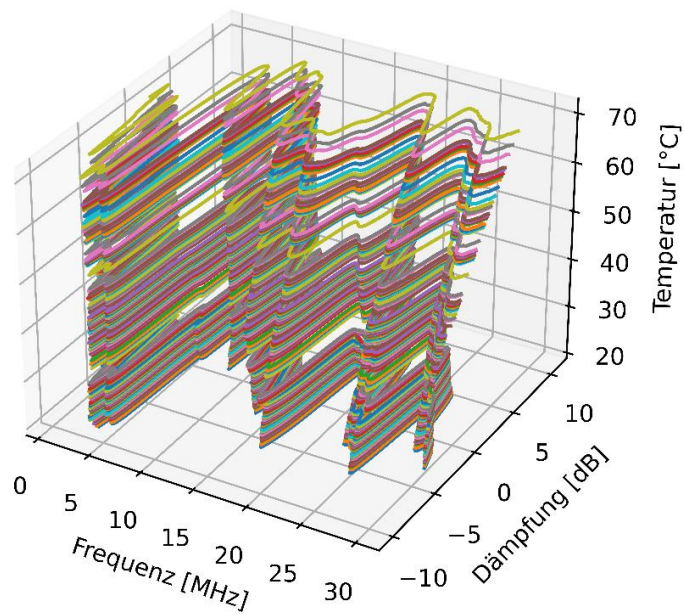


Abbildung 19: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(30m) – Dämpfung(10m)

Dämpfung(15m) - Dämpfung(10m)

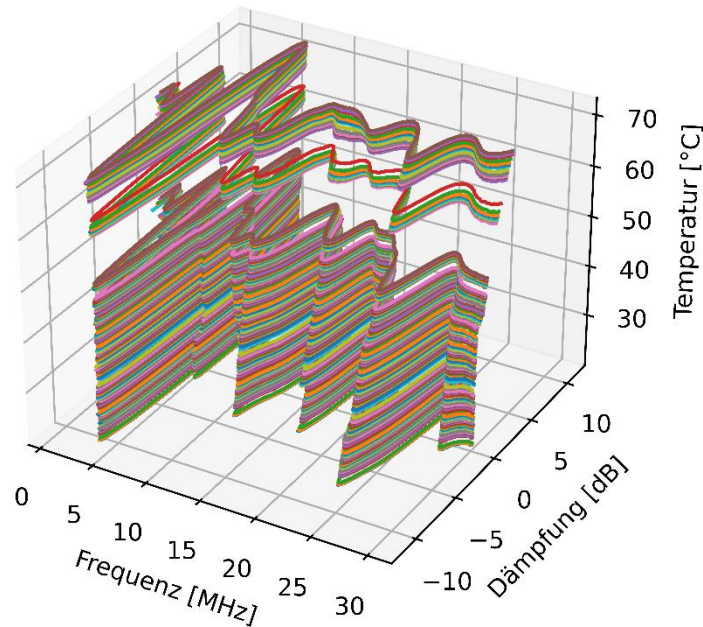


Abbildung 20: Dreidimensionale Darstellung der Differenzkurven Dämpfung(15m) – Dämpfung(10m)

Um den Einfluss der Kabellänge auf die Dämpfung zu untersuchen, werden die Differenzkurven von Dämpfung(30m) – Dämpfung(15m), Dämpfung(30m) – Dämpfung(10m), Dämpfung(15m) – Dämpfung(10m) jeweils in der Abbildung 18, 19 und 20 dreidimensional dargestellt. Weil die Differenzkurven in allen drei Abbildungen um die horizontale Achse mit Dämpfung von 0 dB unregelmäßig schwanken, lässt sich keine allgemeine Aussage über den Einfluss der Kabellänge auf die Dämpfung treffen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Dämpfung des Niederspannungskabels mit einer Muffe in der Kabelmitte weist einen schwankenden und steigenden Trend auf, während die Frequenz zunimmt. Das Vorzeichen der Dämpfungsdifferenz des Kabels ohne und mit Muffen-Abzweig wechselt periodisch beim Steigen der Frequenz. Die Periode beträgt im Versuch dieser Projektarbeit zwischen 5,4 MHz und 6 MHz.

Im Prozess der natürlichen Temperaturabnahme des Niederspannungskabels weist die Kabeldämpfung einen schwankenden und sinkenden Trend auf bei jeder Temperatur und beim Steigen der Frequenz. Bei einer bestimmten Frequenz steigt die Dämpfung des Kabels, das länger als 15 Meter ist (inkl. 15 Meter), beim Steigen der Temperatur. Je länger das Kabel ist, desto stärker steigt die Dämpfung. Welchen Einfluss die Temperatur auf die Dämpfung des 10 Meter langen Kabels hat, ist unbekannt.

Ob die Kabellänge einen allgemeinen Einfluss auf die Kabeldämpfung hat, lässt sich aus der Datenanalyse dieser Projektarbeit keine Aussage treffen. In der Zukunft können sowohl bei der Muffenmessung als auch bei der Messung der temperaturabhängigen Dämpfung die Kabel mit mehr verschiedenen Kabellängen z.B. 10m, 12m, 14m, ..., 26m, 28m, 30m für die Untersuchung des Einflusses der Kabellänge auf die Dämpfung eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [Aal12] Aalamifar, F.; Hassanein, H. S.; Takahara, G.: Viability of powerline communication for the smart grid. In IEEE, 2012; S. 19–23.
- [And06] Andersson, M. O. J.; Rönnerberg, S. K.; Lundmark, C. M.; Larsson, E.; Wahlberg, M.; Bollen, M. Andersson, M. O. J.; Rönnerberg, S. K.; Lundmark, C. M. et al.: Interfering signals and attenuation - potential problems with communication via the power grid, 2006.
- [Can13] Canale, S.; Di Giorgio, A.; Lanna, A. et al.: Optimal Planning and Routing in Medium Voltage PowerLine Communications Networks. In IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4; S. 711–719.
- [Cav08] Cavdar, I. H.; Karadeniz, E.: Measurements of Impedance and Attenuation at CENELEC Bands for Power Line Communications Systems. In Sensors (Basel, Switzerland), 2008, 8; S. 8027–8036.
- [Duc14] Duche, D.; Gogate, V.: Signal Attenuation in Powerline Communication Channel. In International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science, 2014, 3; S. 123–130.
- [Elf18] Elfeki, I.; Jacques, S.; Aouichak, I. et al.: Characterization of Narrowband Noise and Channel Capacity for Powerline Communication in France. In Energies, 2018, 11; S. 1–20.
- [Fer96] Ferreira, H. C.; Grové, H. M.; Hooijen, O.; Vinck, A. J. H.: Power Line Communications: An Overview. In 1996 IEEE, 1996; S. 558–563.
- [Fra15] Franek, L.; Stastny, L.; Kaczmarczyk, V.; Bradac, Z.: Multiwire Power Line Communication Model. In IFAC-PapersOnLine, 2015, 48; S. 147–152.
- [Kel11] Kellerbauer, H.: Simulation von Powerline-Übertragungstechnologien im SmartGrid-Kontext mit OMNeT++. Dissertation, 2011.
- [Mae06] Maenou, T.; Katayama, M.: Study on Signal Attenuation Characteristics in Power Line Communications: 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. IEEE, 2006; S. 217–221.

- [Tak16] Takmaz, E.: Impedance, attenuation and noise measurements for power line communication: 2016 4th International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG). IEEE, 2016; S. 1–4.
- [Wan14] Wang, Y.; Wang, Q. D.; Hou, X. Z. et al.: Measurement and Research on Attenuation Characteristics of Low Voltage Power Line Communication Channel. In Advanced Materials Research, 2014, 986-987; S. 2068–2072.