



HTBLuVA St. Pölten

Höhere Abteilung Elektrotechnik

3100 St. Pölten, Waldstrasse 3 Tel: 02742-75051-300
Homepage: <http://et.htlstp.ac.at> E-Mail: et@htlstp.ac.at



Titel des Projektes

MESSUNGEN AN ABGESCHIRMTER LEITUNG

Mitglieder:

LABENBACHER MICHAEL

KIENINGER DOMINIK

IBRAHIM IBRAGIMOV

Projektort: HTBLuVA in St. Pölten

Projektdatum: 2. März 2015

Projektnummer: 16

Projektgruppe: 3

Unterrichtsgegenstand: Laboratorium

Jahrgang/Klasse: 2014/15 4AHET

Lehrer: Prof. Dipl.-Ing. Helge Frank

Protokollführer	Unterschriften	Note
Labenbacher		

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
2 Verwendete Geräte & Betriebsmittel	7
3 Messungen an abgeschirmter Leitung	8
3.1 Kennwerte einer abgeschirmten Leitung	8
3.1.1 Herleitung der Kennwerte einer Leitung	9
3.1.2 Verlustlose Leitung	16
3.1.3 Leerlauf (Verlustlose Leitung)	17
3.1.4 Kurzschluss (Verlustlose Leitung)	18
3.1.5 Anpassung (Verlustlose Leitung)	19
3.1.6 Zusammenfassend bezogen auf eine Koaxialleitung	20
3.2 Wellenwiderstandsbestimmung	21
3.2.1 Aufgabenstellungen	21
3.2.2 Ermittlung des Widerstandsbelages	22
3.2.2.1 Schaltungsentwicklung	22
3.2.2.2 Messvorgang & Auswertung	23
3.2.2.3 Messbericht & Vergleich	23
3.2.3 Ermittlung des Kapazitätsbelages	24
3.2.3.1 Schaltungsentwicklung	24
3.2.3.2 Messvorgang & Auswertung	25
3.2.3.3 Messbericht & Vergleich	26
3.2.4 Ermittlung des Induktivitätsbelages	27
3.2.4.1 Schaltungsentwicklung	27
3.2.4.2 Messvorgang & Auswertung	28
3.2.4.3 Messbericht & Vergleich	29
3.2.5 Ermittlung des Wellenwiderstandes	30
3.3 Dämpfungsmessung	31
3.3.1 Aufgabenstellungen	31
3.3.2 Schaltungsentwicklung	32
3.3.3 Messvorgang & Auswertung	33
3.3.4 Messbericht	34
3.4 Frequenzabhängigkeitsbestimmung	35
3.4.1 Aufgabenstellungen	35
3.4.2 Schaltungsentwicklung	36
3.4.3 Messvorgang & Auswertung	37
3.4.4 Messbericht	39

3.5	Eingangswiderstandsmessung	40
3.5.1	Aufgabenstellungen	40
3.5.2	Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Anpassung	41
3.5.2.1	Schaltungsentwicklung	41
3.5.2.2	Messvorgang & Auswertung	42
3.5.2.3	Messbericht	42
3.5.3	Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Leerlauf	43
3.5.3.1	Schaltungsentwicklung	43
3.5.3.2	Messvorgang & Auswertung	44
3.5.3.3	Messbericht	44
3.5.4	Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Kurzschluss	45
3.5.4.1	Schaltungsentwicklung	45
3.5.4.2	Messvorgang & Auswertung	46
3.5.4.3	Messbericht	46
3.5.5	Verläufe des Eingangswiderstandes	47
3.6	Stehende Welle	48
3.6.1	Aufgabenstellungen	48
3.6.2	Ermittlung der stehenden Welle	49
3.6.2.1	Schaltungsentwicklung	49
3.6.2.2	Messvorgang & Auswertung	50
4	Resümee	52
5	Kennwert und Tabellen von Leitungen	53

Tabellenverzeichnis

1	Geräte & Betriebsmittel	7
2	Zusammenfassung Widerstandsbelag	23
3	Zusammenfassung Kapazitätsbelag	26
4	Zusammenfassung Induktivitätsbelag	29
5	Zusammenfassung Wellenwiderstand (verlustlos)	30
6	Messwerte der Dämpfungsmessung	33
7	Zusammenfassung Dämpfungsmessung	34
8	Messwerte der Frequenzabhängigkeitsmessung	38
9	Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Anpassung	42
10	Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Leerlauf	44
11	Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Kurzschluss	46

Abbildungsverzeichnis

1	Aufbau einer Koaxialleitung	8
2	Allgemeine Nachbildung einer Leitung	9
3	Leitungsdarstellung	14
4	Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Leerlauf	17
5	Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Kurzschluss	18
6	Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Anpassung	19
7	Messschaltung zur Ermittlung des Widerstandsbelages einer Koaxialleitung	22
8	Realisierung der Widerstandsbelagsbestimmung mittels dem KB1	22
9	Messschaltung zur Ermittlung des Kapazitätsbelages einer Koaxialleitung	24
10	Oszilloskopeaufnahme des Rechtecksprunges zur Ermittlung des Kapazitätsbelages . .	25
11	Messschaltung zur Ermittlung des Induktivitätsbelag einer Koaxialleitung	27
12	Oszilloskopeaufnahme zur Ermittlung des Induktivitätsbelages	28
13	Messschaltung zur Ermittlung der Dämpfungserscheinung einer Koaxialleitung . . .	32
14	Oszilloskopeaufnahme der Dämpfung bei einem Koaxialleiters	33
15	Dämpfungserscheinung einer Koaxialleitung	34
16	Messschaltung zur Ermittlung der Frequenzabhängigkeit einer Koaxialleitung . . .	36
17	Realisierung der Frequenzabhängigkeitsbestimmung mittels dem KB1	36
18	Oszilloskopeaufnahme der Frequenzabhängigkeit eines Koaxialleiters bei $f = 10\text{Hz}$.	37
19	Oszilloskopeaufnahme der Frequenzabhängigkeit eines Koaxialleiters bei $f = 1\text{MHz}$.	37
20	Frequenzabhängigkeitserscheinung einer Koaxialleitung	39
21	Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Anpassung	41
22	Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Anpassung bei $f = 1\text{MHz}$	42
23	Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Leerlauf	43
24	Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Leerlauf bei $f = 1\text{MHz}$.	44
25	Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Kurzschluss	45
26	Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Kurzschluss bei $f = 1\text{MHz}$	46
27	Gegenüberstellung der Eingangswiderstandsverläufe	47
28	Messschaltung zur Ermittlung der stehenden Wellen einer Koaxialleitung	49
29	Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 0,45\text{MHz}$	50
30	Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 0,9\text{MHz}$	50
31	Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 1,8\text{MHz}$	50
32	Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Leerlauf $f = 0,45\text{MHz}$	51
33	Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Leerlauf $f = 0,9\text{MHz}$	51

1 Einleitung

Dieses Projekt befasst sich mit dem Erfassen der Eigenschaften eines Koaxialleiters. Ein solches Kabel dient in der heutigen Zeit zB. für die Informationsübertragung, als Atennenkabel, . . .

Am Beginn werden einige Kennwerte von Leitungen aufgelistet, welche für die nachstehenden Messungen und deren Auswertung zum Verstehen sehr wichtig sind. Dabei sollen verschiedene Messmethoden aufgezeigt und auf deren Genauigkeit hin analysiert werden.

Diese Übungen werden im Prinzip nach dem von unserem Prof. Dipl.-Ing. Helge Frank zur Verfügung gestellten hps Skriptum „Versuche zur abgeschirmten Leitung“ durchgeführt und es wurde somit mit dem dazugehörigen Koaxial Board gearbeitet.

Dieses Projekt soll somit zeigen, wie wichtig das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten, wie Kabel, Abschlusswiderstand, . . . , in Bezug auf Dämpfung, Phasenverschiebung, usw. ist. Somit werden diverse Versuche zur Analyse vom Verhalten des Koaxialkabels bei unterschiedlicher Eingangsspannungen, Frequenzen, . . . , durchgeführt.

2 Verwendete Geräte & Betriebsmittel

Bezeichnung/Nr.	Gerät/Betriebsmittel	Beschreibung/Typ	Geräte-Nr.
KB1	Koaxial Board	hps 4284	—
FG1	Funktionsgenerator	Voltcraft 7202	GA - 01/03
O1	Oszilloskope	Tektronix TDS 2004B	GA - 01/04
P1	Digitalmultimeter	UNI-T UT70A	—

Tabelle 1: Geräte & Betriebsmittel

Bevor die Übungen durchgeführt werden, ist es wichtig sich mit den Betriebsmittel und vor allem den Messgeräten vertraut zu machen. Die dazugehörigen Datenblätter können z.B. auf folgenden Webseiten (Stand: 2.März.2015) entnommen werden oder stehen selbstverständlich im Laborunterricht zur Verfügung:

Coaxial Board CB1

<http://hps-enterprise.de/etc/cdn/deutsch/4284.pdf>

Funktionsgenerator FG1

http://eitidaten.fh-pforzheim.de/daten/labore/ellt/2006/bedienungsanleitungen/funktionsgenerator_7202.pdf

Oszilloskope O1

http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/122855-da-01-de-OSZILLOSKOP_TDS2004B.pdf

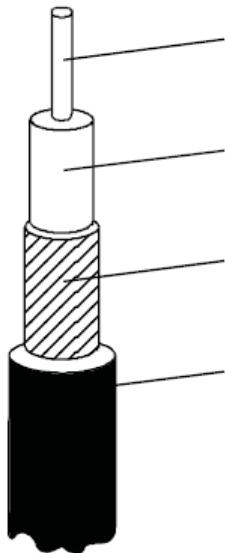
Digitalmultimeter P1

<http://www.pollin.de/shop/downloads/D830297B.PDF>

3 Messungen an abgeschirmter Leitung

3.1 Kennwerte einer abgeschirmten Leitung

Ein Koaxialkabel, welches zur Beförderung von elektromagnetischen Wellen, oder anders gesagt zur Übertragung von Informationen dient, besteht aus folgenden Komponenten:



Erklärung:

1. **Innenleiter** (z.B. massiver Draht aus Elektrolytkupfer, versilbert)
2. **Isolierung** (Dielektrikum), **Kunststoff**, (z.B. Polyethylen (PE))
3. **Außenleiter, Geflecht** (Abschirmung) (z.B. verzinkten Kupferdrähten)
4. **Mantel** (Schutzmantel), **Kunststoff** (z.B. Polyvinylchlorid (PVC))

Abbildung 1: Aufbau einer Koaxialleitung

Es wird nun im Folgenden versucht eine solche Koaxialleitung nachzubilden, dabei wird für die weitere Betrachtung die Leitung als homogen angenommen, sprich die Leitungsbeläge ändern sich entlang der Leitung nicht. Bei der Nachbildung der Leitung wird diese in kleine, differentielle Stücke zerlegt und dann aufsummiert.

Dabei gibt es einen ohmsch-induktiven Längszweig, welcher aus einem Widerstand besteht, der die längs der Leitung entstehenden Wirkverluste beinhaltet und aus einer Induktivität.

Weiters existiert ein ohmsch-kapazitiver Querzweig, welcher einerseits die Summenwirkung von Kapazität gegen Erde und Kapazität zwischen Leitern angibt und andererseits besteht dieser aus einem Wirkleitwert, welcher aber oft eine vernachlässigbare Rolle spielt, da eine gute Isolierung bei Leitungen vorausgesetzt wird.

Im Folgenden wird versucht sich bei der Herleitung der einzelnen Kenngrößen solcher Koaxialleitungen und Weiteres allgemein zu halten und erst darauf auf Koaxialleitungen im Speziellen eingegangen. Aus einer solchen Leitung kann nun ein Ersatzschaltbild, wie es im nachfolgenden Kapitel 3.1.1 ersichtlich ist, erstellt werden.

3.1.1 Herleitung der Kennwerte einer Leitung

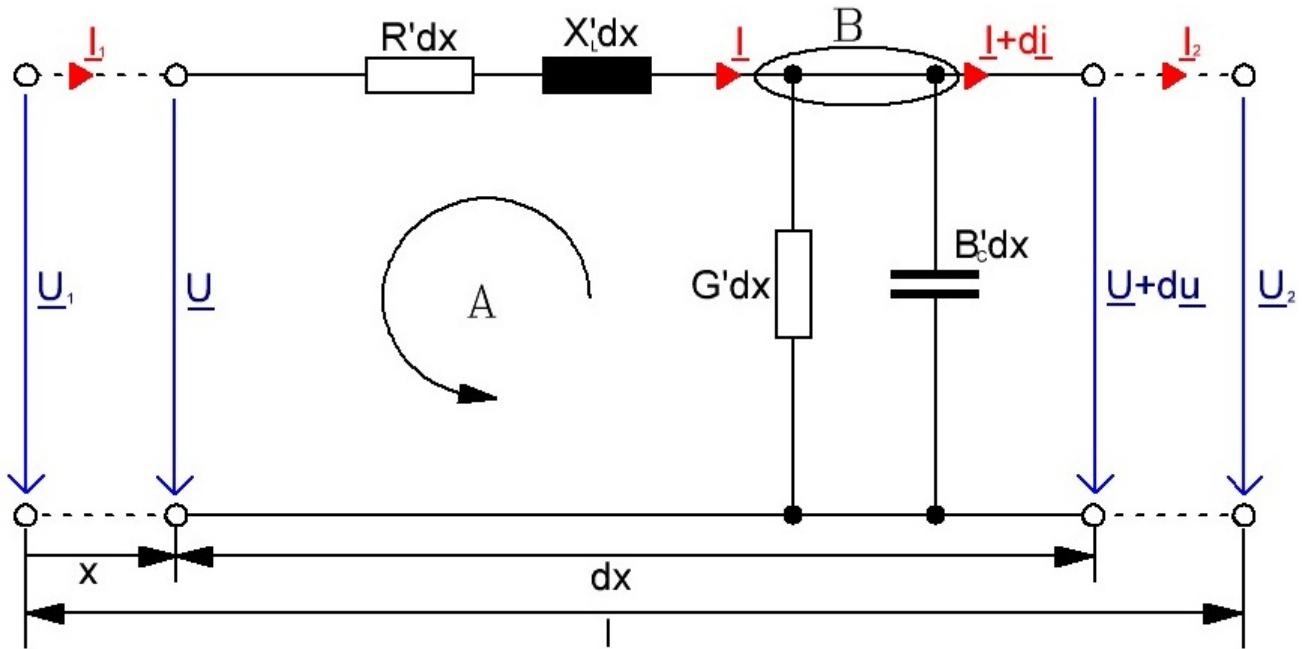


Abbildung 2: Allgemeine Nachbildung einer Leitung

Folgende Bezeichnungen werden dabei verwendet:

- R' Widerstandsbelag
- L' Induktivitätsbelag
- X'_L Längsreaktanzbelag / Längsblindwiderstandsbelag
- G' Ableitungsbelag
- C' Kapazitätsbelag
- B'_C Queradmittanzbelag / Querblindleitwertsbelag
- x Betrachtungsposition (zur Beschreibung der Ortsabhängigkeit)
- dx Länge der differentiellen Leitungsteilstücke
- l Gesamtlänge der Leitung
- \underline{U}_1 Eingangsspannung (komplex)
- \underline{I}_1 Eingangsstrom
- \underline{U}_2 Ausgangsspannung
- \underline{I}_2 Ausgangsstrom
- \underline{U} Leitungsspannung an der Stelle x
- \underline{I} Leitungsstrom an der Stelle x
- $\underline{U} + du$ Leitungsspannung an der Stelle $x+dx$
- $\underline{I} + di$ Leitungsstrom an der Stelle $x+dx$

Der Ansatz der Herleitung besteht aus Knoten- & Maschengleichungen des des differentiellen Leitungselementes:

$$\text{Aus der Masche I} \rightarrow \underline{I} \cdot R' dx + \underline{I} \cdot jX'_L dx + \underline{U} + d\underline{u} - \underline{U} = 0$$

$$\text{Aus dem Knoten A} \rightarrow \underline{I} - (\underline{U} + d\underline{u}) \cdot G' dx - (\underline{U} + d\underline{u}) \cdot jB'_C dx - \underline{I} - d\underline{i} = 0$$

Hier wird nun eine kleine Vernachlässigung gemacht, indem bei der Knotengleichung die differentiellen Spannungselemente $d\underline{u}$ vernachlässigt werden, da es ansonst zu komplexeren Differentialgleichungen kommt. Somit gilt folgendes:

$$\frac{d\underline{u}}{dx} = -\underline{I} \cdot (R' + jX'_L) \quad (1)$$

$$\frac{d\underline{i}}{dx} = -\underline{U} \cdot (G' + jB'_C) \quad (2)$$

Nun wird noch ein zweites mal nach dx differenziert und man erhält die Differentialgleichung für den Strom & Spannung. Da diese Betrachtungsweise komplex ist, können nur stationäre Zustände damit betrachtet werden:

$$\frac{d^2\underline{u}}{dx^2} = \underline{U} \cdot (R' + jX'_L) \cdot (G' + jB'_C) \quad (3)$$

Differentialgleichung für die Spannung

$$\frac{d^2\underline{i}}{dx^2} = \underline{I} \cdot (R' + jX'_L) \cdot (G' + jB'_C) \quad (4)$$

Differentialgleichung für den Strom

Aus diesen beiden Differentialgleichungen 4 & 3 kann ein sogenannter Ausbreitungskoeffizient bestimmt werden, dabei sind zuvor noch folgende Formeln für die Berechnung der Längsreaktanz & Queradmittanz von Bedeutung:

$$X'_L = \omega L' \quad (5)$$

$$B'_C = \omega C' \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (7)$$

ω Winkelgeschwindigkeit

f Frequenz

Somit ist folgender Zusammenhang als Ausbreitungskoeffizient definiert:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (8)$$

α Dies ist der Realteil des Ausbreitungskoeffizienten, welcher auch als Dämpfungsfaktor bezeichnet wird. Er ist für die Bedämpfung von Zustandsänderungen entlang der Leitung maßgeblich.

β Der Imaginärteil des Ausbreitungskoeffizienten wird auch als Phasenkeffizient bezeichnet. Dieser ist für die Phasendrehung entlang der Leitung maßgeblich.

Nun ergeben sich mit der Leitungslänge l die Leitungsparameter der gesamten Leitung:

$$a = \alpha \cdot l \quad (9)$$

$$b = \beta \cdot l \quad (10)$$

$$g = a + jb = \gamma \cdot l \quad (11)$$

a *Dämpfungsmaß*

b Phasenmaß

g *komplexes Dämpfungsmaß*

Der Lösungsansatz für die nun aufgestellte homogene Differentialgleichung: $\frac{d^2\underline{u}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \cdot \underline{U}$, lautet nun:

$$\underline{U} = \underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} + \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x} \quad \text{mit } \underline{k}_1, \underline{k}_2 \dots \text{komplexe Integrationskonstanten} \quad (12)$$

Nun folgt mit dem Ansatz 12 und der Formel 1:

$$\underline{U}' = \frac{du}{dx} = \underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} \cdot \underline{\gamma} + \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x} \cdot (-\underline{\gamma}) = \underline{\gamma} \cdot (\underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} - \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x}) = -\underline{I} \cdot (R' + jX'_L) \rightarrow$$

$$\underline{I} = -\left[\frac{\underline{\gamma}}{R' + jX'_L} \right] \cdot (\underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} - \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x}) \quad \text{mit } \underline{k}_1, \underline{k}_2 \dots \text{komplexe Integrationskonstanten} \quad (13)$$

Hier ist nun schon der zweite Kennwert von Leitungen (umrandet) ersichtlich, nämlich der komplexe Wellenwiderstand einer Leitung, welcher folgendermaßen definiert ist:

$$\frac{\underline{\gamma}}{R' + jX'_L} = \frac{\sqrt{(R' + jX'_L) \cdot (G' + jB'_C)}}{R' + jX'_L} = \sqrt{\frac{G' + jB'_C}{R' + jX'_L}} = \frac{1}{Z_W} \rightarrow$$

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + jX'_L}{G' + jB'_C}} = Z_W \angle \varphi_W \quad (14)$$

Also zusammengefasst gibt es zwei wichtige Kenngrößen einer Leitung, nämlich den Ausbreitungskoeffizienten $\underline{\gamma}$ & den Wellenwiderstand Z_W .

Es gibt nun zwei Gleichungen, eine für die Spannung \underline{U} und eine für den Strom \underline{I} entlang der Leitung. Darin sind jedoch noch die beiden komplexen Integrationskonstanten \underline{k}_1 und \underline{k}_2 .

Zur Bestimmung dieser Integrationskonstanten wird als Randbedingung festgelegt, dass:

Am Ende der Leitung, bei $x = l$ die Spannung der Leitung $\underline{U} = \underline{U}_2$ & der Strom der Leitung $\underline{I} = \underline{I}_2$ ist.

Somit ergeben sich letztendlich die beiden Leitungsgleichungen, mit den Formeln 12 & 13, einer langen Leitung:

$$\underline{U} = \underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} + \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x} \quad \text{mit } x = l \text{ & } \underline{U} = \underline{U}_2 \rightarrow$$

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}l} + \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}l} \quad (15)$$

$$\underline{I} = -\frac{1}{Z_W} \cdot \underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}x} - \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}x} \quad \text{mit } x = l \text{ & } \underline{I} = \underline{I}_2 \rightarrow$$

$$\underline{I}_2 = -\frac{1}{Z_W} \cdot (\underline{k}_1 \cdot e^{\underline{\gamma}l} - \underline{k}_2 \cdot e^{-\underline{\gamma}l}) \quad (16)$$

Mit Formel 15 + Formel 16 →

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{I}_2 \cdot Z_W}{2} \cdot e^{-\underline{\gamma}l} \quad (17)$$

Mit Formel 15 - Formel 16 →

$$\underline{k}_2 = \frac{\underline{U}_1 + \underline{I}_2 \cdot Z_W}{2} \cdot e^{\underline{\gamma}l} \quad (18)$$

Nun werden die beiden komplexen Integrationskonstanten in die Gleichungen 12 & 13 eingesetzt und somit folgt:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \frac{1}{2} \cdot [(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{-\underline{\gamma}l} \cdot e^{\underline{\gamma}x} + (\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{\underline{\gamma}l} \cdot e^{-\underline{\gamma}x}] = \\ &= \frac{1}{2} \cdot [(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{-\underline{\gamma}(l-x)} + (\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{\underline{\gamma}(l-x)}] = \\ &= \underline{U}_2 \cdot \frac{e^{\underline{\gamma}(l-x)} + e^{-\underline{\gamma}(l-x)}}{2} + \underline{I}_2 \cdot Z_W \cdot \frac{e^{\underline{\gamma}(l-x)} - e^{-\underline{\gamma}(l-x)}}{2} = \\ \text{mit } \cosh(z) &= \frac{e^z + e^{-z}}{2} \text{ & } \sinh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{2} \quad z \dots \text{beliebige Zahl} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot (l - x)) + \underline{I}_2 \cdot Z_W \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot (l - x)) \quad (19)$$

Das selbe mit dem Strom:

$$\begin{aligned} \underline{I} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{Z_W} \cdot [(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{-\gamma \cdot (l-x)} - (\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \cdot Z_W) \cdot e^{\gamma \cdot (l-x)}] = \\ &= \frac{\underline{U}_2}{Z_W} \cdot \frac{e^{\gamma \cdot (l-x)} - e^{-\gamma \cdot (l-x)}}{2} + \underline{I}_2 \cdot \frac{e^{\gamma \cdot (l-x)} + e^{-\gamma \cdot (l-x)}}{2} = \\ \text{mit } \cosh(z) &= \frac{e^z + e^{-z}}{2} \quad \& \quad \sinh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{2} \quad z \dots \text{beliebige Zahl} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot (l-x)) + \underline{I}_2 \cdot \cosh(\gamma \cdot (l-x)) \quad (20)$$

Nun kann die Leitung auch als Vierpol betrachtet werden und das ganze in eine Matrixform folgender Form umgeschrieben werden, was dann eine Verknüpfung der Spannungen und Ströme am Anfang & Ende der Leitung mit der Übertragungsfunktion in Matrixform darstellt:

$$\begin{pmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot (l-x)) & Z_W \cdot \sinh(\gamma \cdot (l-x)) \\ \frac{1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot (l-x)) & \cosh(\gamma \cdot (l-x)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

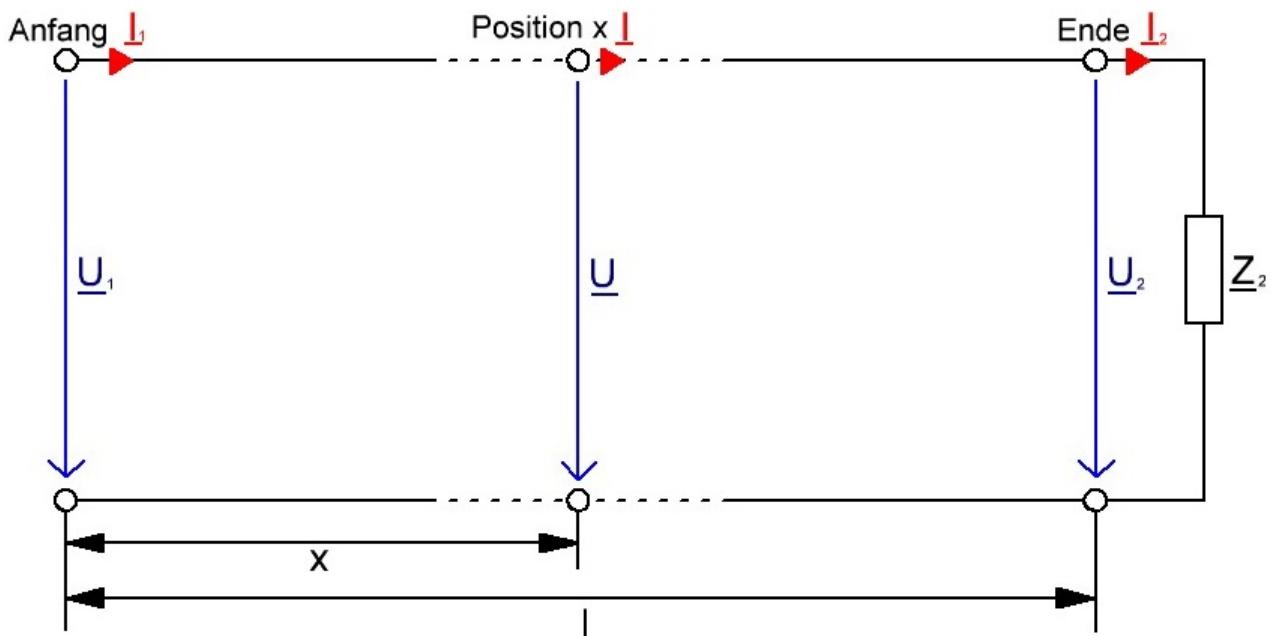


Abbildung 3: Leitungsdarstellung

Mit dieser Matrixform können nun die Spannung \underline{U} & der Strom \underline{I} an jedem beliebigen Ort der Leitung x ermittelt werden, dabei sind \underline{U}_2 & \underline{I}_2 die elektrischen Größen am Ende der Leitung, wo gilt:

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \quad (22)$$

Es gibt nun im Wesentlichen 3 spezielle Betriebsfälle der Leitung:

- 1. Leerlauf: $\underline{Z}_2 \rightarrow \infty$ Bei uns als ∞ betrachtet.
- 2. Kurzschluss: $\underline{Z}_2 \rightarrow 0$ Bei uns als 0 betrachtet.
- 3. Anpassung: $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_W$ Anpassung der Leitung durch abschließen mit dem Wellenwiderstand.

3.1.2 Verlustlose Leitung

Im Allgemeinen sind die spannungsabhängigen Ableitverluste im Querzweig, welche durch G' verursacht werden gegenüber den belastungsabhängigen Verlusten im Längszweig, welche von R' verursacht werden, klein. Für die näherungsweise Betrachtung der Leitung kann diese verlustlos betrachtet werden, sprich: $R' = 0$ & $G' = 0$.

Die Kenngrößen einer solchen verlustlosen Leitung sind dann:

1. Ausbreitungskeoeffizient:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} \quad \text{mit } R' = 0, \& G' = 0 \rightarrow \sqrt{jX'_L \cdot jB'_C} \rightarrow$$

$$\underline{\gamma} = j\omega \cdot \sqrt{L' \cdot C'} \quad , \text{rein imaginär} \quad (23)$$

- $\alpha = 0 \dots$ Ausbreitungskoeffizient, bei der verlustlosen Leitung gibt es so keine Dämpfung, do die ohmschen Anteile hauptverantwortlich für die Dämpfung sind.
- $\beta = \omega \cdot \sqrt{L' \cdot C'} \dots$ Phasenkoeffizient

2. Wellenwiderstand:

$$\underline{Z_W} = \sqrt{\frac{R' + jX'_L}{G' + jB'_C}} = \sqrt{\frac{j\omega \cdot L'}{j\omega \cdot C'}} \rightarrow$$

$$\underline{Z_W} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad , \text{rein reell} \quad (24)$$

Somit lässt sich sagen, dass bei der verlustlosen Betrachtung der Wellenwiderstand rein ohmsch ist.

3.1.3 Leerlauf (Verlustlose Leitung)

Beim Leerlauf kann folgendes Ersatzschaltbild verwendet werden:

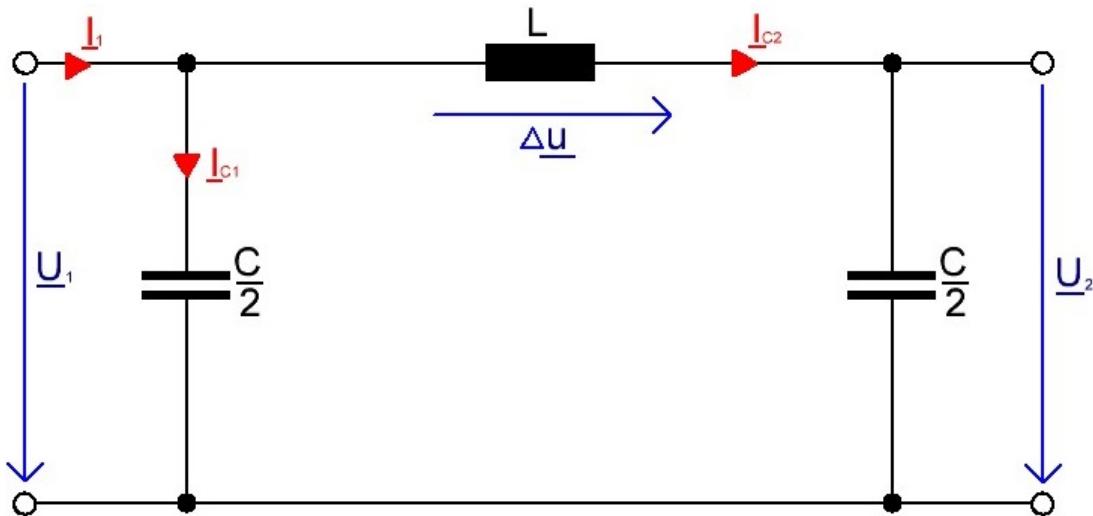


Abbildung 4: Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Leerlauf

Bei diesem Betriebsfall gilt:

$\rightarrow Z_2 \rightarrow \infty$, sprich $I_2 = 0$ laut der Matrixformel folgt somit :

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cosh(\gamma \cdot l) \quad \text{und} \quad \underline{I}_1 = \underline{U}_2 \cdot \frac{1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot l)$$

Dabei ist der Strom I_1 hauptsächlich da, um die Leitungskapazitäten zu versorgen. Bei der Spanngleichung fällt einem auf, dass der sogenannte Ferranti-Effekt auftritt, sprich bei einer leerlaufenden Leitung ist $|\underline{U}_2| > |\underline{U}_1|$. Diese Spannungserhöhung wird durch den Spannungsabfall des kapazitiven Ladestromes an der Längsinduktivität der Leitung hervorgerufen und es gilt:

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\cosh(\gamma \cdot l)} > 1 \quad \text{bei Leerlauf (verlustlose Leitung)} \quad (25)$$

Man kann dies auch so interpretieren, dass die Induktivität und der rechte Kondensator eine Serienresonanz bilden und es somit zu einer Spannungserhöhung kommt.

3.1.4 Kurzschluss (Verlustlose Leitung)

Beim Kurzschluss kann folgendes Ersatzschaltbild verwendet werden:

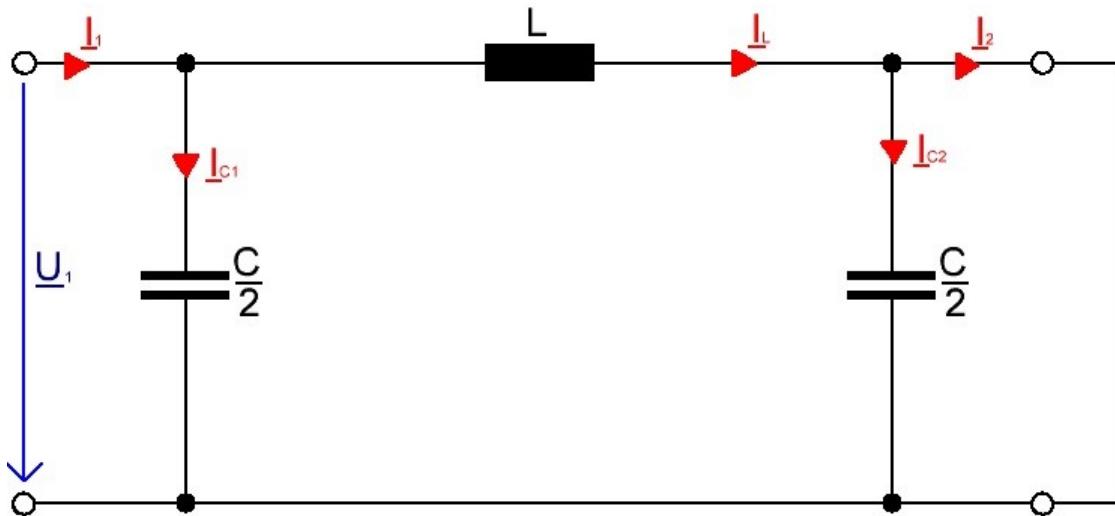


Abbildung 5: Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Kurzschluss

Dieser Fall liegt vor, wenn:

$$\rightarrow Z_2 \rightarrow 0 (= 0)$$

Man unterscheidet hier im Wesentlichen zwischen:

1. transient: Beim Kurzschluss-Eintritt erfolgt sofort die Entladung vom rechten Kondensator über die Kurzschlussstelle.
2. stationär: Der rechte Kondensator ist ungeladen und liefert keinen Strom mehr und es tritt somit eine Parallelresonanz (Stromresonanz) auf, sprich der Strom am Ende der Leitung ist größer als der am Beginn.

Aus der Matrixformel folgt somit:

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = \frac{1}{\cosh(\gamma \cdot l)} > 1 \quad \text{bei Kurzschluss (verlustlose Leitung)} \quad (26)$$

3.1.5 Anpassung (Verlustlose Leitung)

Bei der Anpassung kann folgendes Ersatzschaltbild verwendet werden:

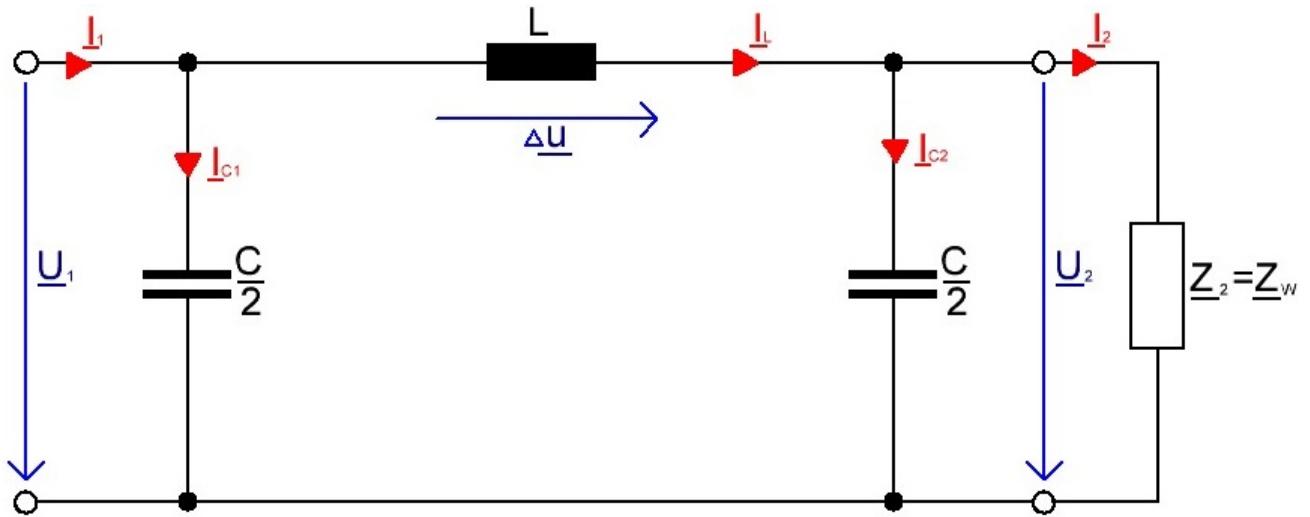


Abbildung 6: Ersatzschaltbild der verlustlosen Leitung bei Anpassung

Dieser Fall liegt vor, wenn:

$$\rightarrow \underline{Z}_2 = \underline{Z}_W \quad \text{ist, sprich} \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_W}$$

Im verlustlosen Fall ist der Wellenwiderstand dabei rein ohmsch, sprich es liegt eine ohmsche Belastung am Leitungsende vor. Da ein ausgeglichener Blindleistungshaushalt der Leitung bei Anpassung von $Q_{\text{ind}} = Q_{\text{kap}}$ vorliegt ist der Lastbedarf am Leitungsanfang eine reine Wirkleistung!

Aus der Matrixformel folgt somit:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot [\cosh(\gamma \cdot l) + \sinh(\gamma \cdot l)] = \underline{U}_2 \cdot e^{j\vartheta_u} \quad \text{mit } \vartheta_u \dots \text{Spannungswinkel}$$

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot [\sinh(\gamma \cdot l) + \cosh(\gamma \cdot l)] = \underline{I}_2 \cdot e^{j\vartheta_u}$$

$$|\underline{I}_1| = |\underline{I}_2|$$

3.1.6 Zusammenfassend bezogen auf eine Koaxialleitung

Bei einer Koaxialleitung, welche zB. in der Nachrichtentechnik eingesetzt wird, werden die Leitungsbeläge auf eine Länge von 1m bezogen.

Da der Frequenzbereich hier relativ hoch ist, kann man vernachlässigbar mit einer verlustlosen Leitung rechnen, da der ohmsche Widerstandsbelag R' und der Ableitungsbelag G' gegenüber dem Induktivitätsbelag L' und dem Kapazitätsbelag C' sehr klein sind, sprich:

$$\omega \cdot L' \gg R' \quad \& \quad \omega \cdot C' \gg G'$$

Eine Formel die hier noch erwähnt werden soll, ist die, für die Berechnung des Wellenwiderstandes aus den Abmessungen des Koaxalkabels bei bekanntem Dielektrikum:

$$Z_W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) \quad (27)$$

- μ_0 Vakuumpermeabilität (magnetische Feldkonstante)
- ϵ_0 Permittivitätszahl des Vakuums (elektrische Feldkonstante)
- ϵ_r Permittivitätszahl des Dielektrikums
- d_a Durchmesser des Außenleiters
- d_i Durchmesser des Innenleiters

Um nun endlich ein Ende vom theoretischen Teil zu schaffen, wird nun mit der ersten Übung, sprich mit der Bestimmung des Wellenwiderstandes begonnen.

3.2 Wellenwiderstandsbestimmung

3.2.1 Aufgabenstellungen

Die erste Aufgabe besteht darin den Wellenwiderstand der Leitung bei der verlustlosen Betrachtungsweise messtechnisch zu ermitteln. Dabei sollen verschiedene Verfahren zur Erfassung der Leitungsbeläge aufgezeigt werden.

Dieses Kapitel unterteilt sich in insgesamt 4 Teilbereiche:

1. Messung des Widerstandsbelages
2. Erfassung des Kapazitätsbelages
3. Ermittlung des Induktivitätsbelages
4. Berechnung des Widerstandsbelages

Dabei wird je eine Messmethode aufgezeigt und im Anschluss mit den Werten aus den Datenblättern verglichen, um feststellen zu können ob Abweichungen vorliegen, und falls, dann sind diese zu begründen.

3.2.2 Ermittlung des Widerstandsbelages

3.2.2.1 Schaltungsentwicklung

Es wurde hier, um möglichst Zeit zu sparen, die einfachste Messmethode zur Bestimmung des Längswiderstandes, bzw. des Widerstandbelages, gewählt, nämlich einfach ein Ohmmeter. Dafür wurde folgende Messschaltung verwendet.

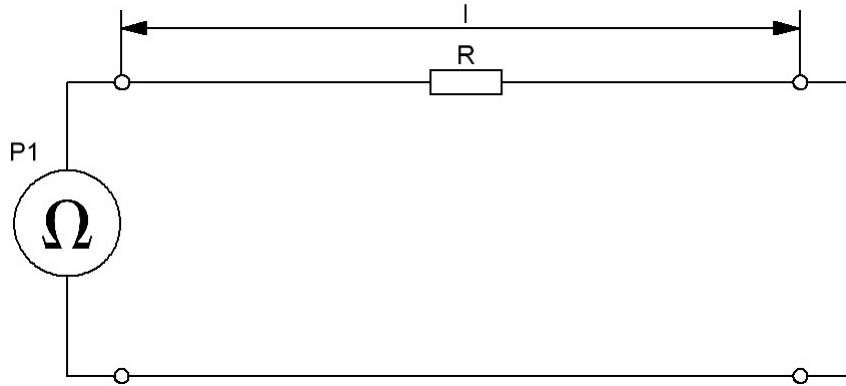


Abbildung 7: Messschaltung zur Ermittlung des Widerstandsbelages einer Koaxialleitung

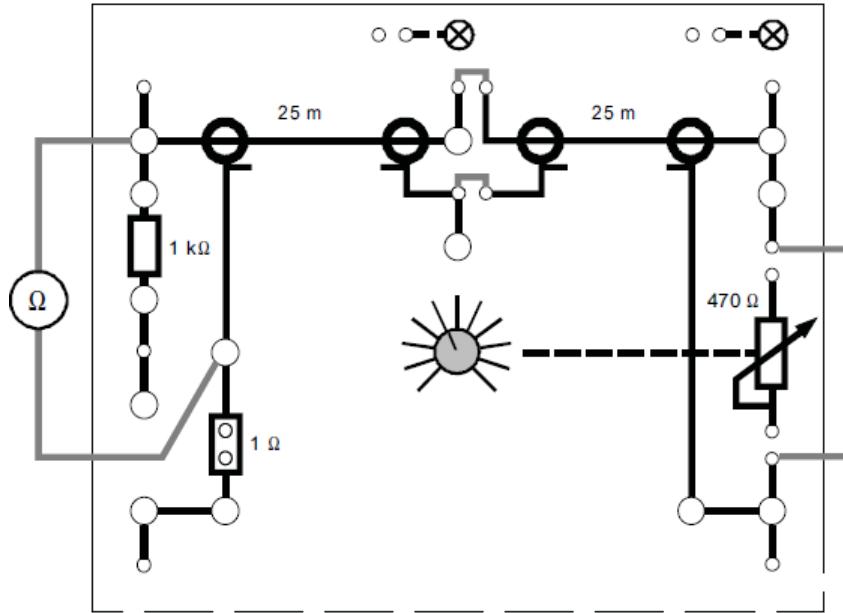


Abbildung 8: Realisierung der Widerstandsbelagsbestimmung mittels dem KB1

Das Bild zeigt die dazugehörige Realisierung mittels dem Koaxialbord, sprich es sind eigentlich zwei jeweils 25m lange Leitungen, welche einfach verbunden werden und somit eine Gesamtlänge des Koaxialkabels von $l = 50m$ ergeben.

3.2.2.2 Messvorgang & Auswertung

Nach der Realisierung & dem Aufbau konnte mit dem Messen des Widerstandes der Koaxialleitung begonnen werden und ergab folgendes:

$$R = 15,8 \Omega$$

$$R \dots \quad \text{Leitungswiderstand}$$

Daraus lässt sich mit der nachfolgenden Formel auch gleich der Widerstandsbelag ermitteln:

$$R' = \frac{R}{l} \quad (28)$$

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{15,8 \Omega}{50 m} = 0,316 \Omega/m$$

3.2.2.3 Messbericht & Vergleich

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass dieser Widerstandsbelag einer der hauptverantwortlichen Komponenten für die Dämpfung sein wird und der Vergleich mit dem Datenblatt zeigt:

Messung	Datenblatt
R'	R'
$[\Omega/m]$	$[\Omega/m]$
0,316	0,317 – 0,360

Tabelle 2: Zusammenfassung Widerstandsbelag

3.2.3 Ermittlung des Kapazitätsbelages

3.2.3.1 Schaltungsentwicklung

Es wurde für diese Messung auch wieder ein relative schnelles Verfahren gewählt, nämlich die Kapazitätsbestimmung durch Messung der Zeitkonstante.

Dabei wurde am Eingang mittels dem Frequenzgenerator eine rechteckförmige Eingangsspannung U_e mit einer Frequenz von ca. $f = 2kHz$ angelegt. Bei einem Rechtecksignal lässt sich der kleine Induktivitätsbelag relativ gut vernachlässigen und die Messschaltung nimmt nun folgende Form an:

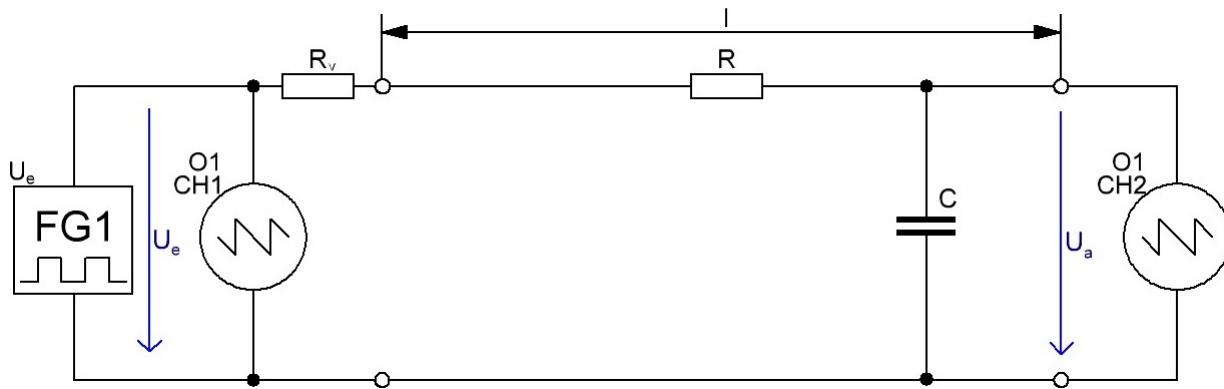


Abbildung 9: Messschaltung zur Ermittlung des Kapazitätsbelages einer Koaxialleitung

Als Eingangsspannung wurde eine Rechteckspannung von $0 - 5V$ gewählt und die Länge der Koaxialleitung betrug im Gesamten $l = 50m$.

Der Vorwiderstand R_V ist so zu wählen, dass der Leitungswiderstand R vernachlässigbar wird, welcher hier somit mit $1\text{ k}\Omega$ festgelegt wurde. Nun kann die Zeit τ mit dem Oszilloskope gemessen werden, sprich die Zeit, in der sich der Kondensator auf rund 63 % auflädt, was bei uns folgende Spannung ergibt:

$$\tau = U_{\text{e,max}} \cdot \frac{63\%}{100\%} = 5V \cdot \frac{63\%}{100\%} = 3,15V \quad \text{genauer: } \tau = U_{\text{e,max}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 5V \cdot (1 - e^{-1}) = 3,16V$$

Wobei gilt:

$$\tau = (R + R_V) \cdot C \quad (29)$$

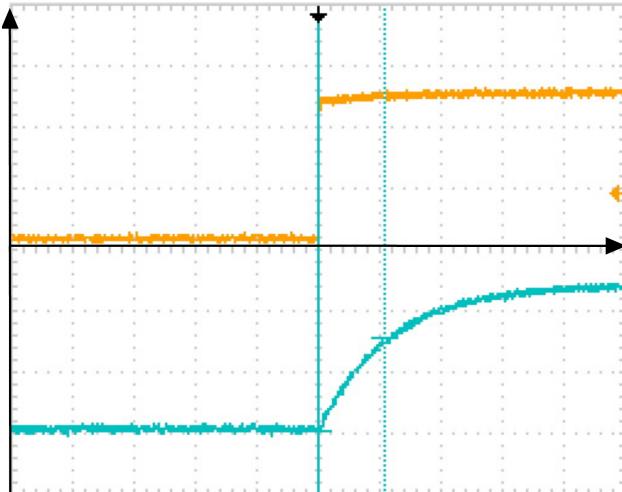
τ Zeitkonstante

R_V Vorwiderstand

C Leitungskapazität

3.2.3.2 Messvorgang & Auswertung

Nun kann die Messschaltung Abb. 9 aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Das Oszilloskope lieferte dabei folgendes Bild:



Dabei gilt folgendes:

y – Achse	$U(t)$
x – Achse für U_e	t (gelb)
$2.x$ – Achse für U_a ...	t (blau)
U_e	[2 V/Div.] (gelb) CH1
U_a	[2 V/Div.] (blau) CH2
M	[5 μ s/Div.] horiz. Skalenteilung

Abbildung 10: Oszilloskopeaufnahme des Rechtecksprunges
zur Ermittlung des Kapazitätsbelages

Mittels den Coursern konnte folgendes τ bei einer Spannung von $U_a = 3,16 V$ abgelesen werden:

$$\tau = 5,4 \mu s$$

Daraus lässt sich mit der Formel 29 die Kapazität der Leitung bestimmen:

$$C = \frac{\tau}{R + R_V} = \frac{5,4 \mu s}{15,8 \Omega + 1000 \Omega} = 5,32 nF$$

Erneut gilt folgender Zusammenhang, mit welcher dann der Kapazitätsbelag der Koaxialleitung mit einer Länge von 50m berechnet werden kann:

$$C' = \frac{C}{l} \quad (30)$$

$$C' = \frac{C}{l} = \frac{5,32 nF}{50m} = 106 pF/m$$

3.2.3.3 Messbericht & Vergleich

Die Gegenüberstellung zwischen Messwert und Datenblattwert zeigt nun folgendes:

Messung	Datenblatt
C'	C'
$[pF/m]$	$[pF/m]$
106	101 – 105

Tabelle 3: Zusammenfassung Kapazitätsbelag

Es lässt sich hier somit sagen, dass diese angewandte Messmethode für schnelle Messungen durchaus geeignet ist und man nicht unbedingt ein Kapazitätsmessgerät dazu braucht.

3.2.4 Ermittlung des Induktivitätsbelages

3.2.4.1 Schaltungsentwicklung

Für die Messung der Induktivität kann einerseits die Phasenverschiebung vom Eingangssinussignal und dem Ausgangssignal gemessen werden, was sich hier nicht bewähren wird, da die Induktivität sehr klein ist. Eine schnelle und gleichzeitig relativ gute Messmethode ist folgende:

Am Eingang wird ein Sinussignal U_e mit einem Spitzenwert von $u_e = 1 \text{ V}$ angelegt und der Strom durch den Leiter gemessen. Es wird jedoch nicht direkt der Strom sondern die Spannung an einem 1Ω Widerstand gemessen, was gleichzeitig nach dem ohmschen Gesetz dem Strom in A entspricht. Bei diesen Messungen ist die Kapazität kurzzuschließen, sprich am Ende des Koaxialleiters muss ein Kurzschluss hergestellt werden.

Die Frequenz des Sinussignales sollte hier im Bereich von $50 \text{ kHz} < f < 250 \text{ kHz}$ liegen, um vor allem die kapazitiven Anteile gering zu halten. Gewählt wurde $f = 100 \text{ kHz}$.

Die Messschaltung weist nun folgende Form auf:

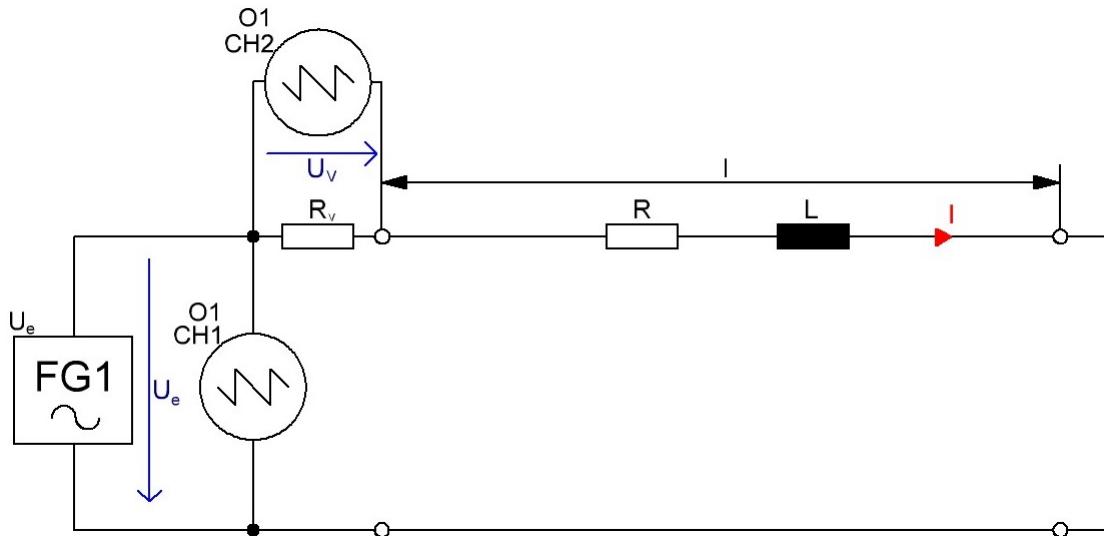
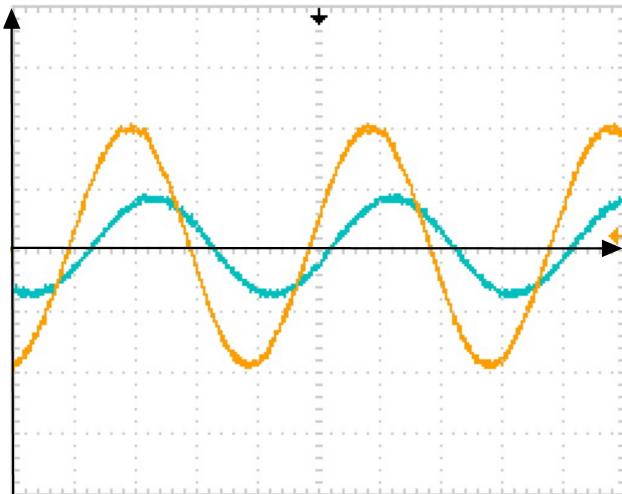


Abbildung 11: Messschaltung zur Ermittlung des Induktivitätsbelag einer Koaxialleitung

Dabei betrug natürlich die Gesamtlänge der Koaxialleitung erneut 50m. Falls der Strom direkt erfasst werden möchte könnte auch ein Trennverstärker verwendet werden, falls dieser eine solche Auflösung schaft.

3.2.4.2 Messvorgang & Auswertung

Folgendes konnte nach der Inbetriebnahme der Schaltung auf dem Oszilloskope graphisch zur Anzeige gebracht werden:



Dabei gilt folgendes:

$y - Achse$	$U(t)$
$x - Achse$	t
U_e	[500mV/Div.]
UV	[50mV/Div.]
M	[1 μ s/Div.]

Abbildung 12: Oszilloskopeaufnahme zur Ermittlung des Induktivitätsbelages

Mittels dem Oszilloskope kann nun durch drücken auf die Measure-Taste folgender Wert abgelesen werden:

$$\hat{u_v} = 46 \text{ mV} \quad \rightarrow \quad \hat{i} = \frac{\hat{u_v}}{R_V} = \frac{46 \cdot 10^{-3} V}{1 \Omega} = 46 \text{ mA}$$

Aus diesen Messwerten kann mit den nachfolgenden Formeln die Induktivität, bzw. Induktivitätsbelag bestimmt werden:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{(R + R_V)^2 + X_L^2} = \frac{\hat{u}_e}{\hat{i}}$$

$$\rightarrow |Z| = \frac{\hat{u}_e}{\hat{i}} = \frac{1V}{46 \cdot 10^{-3} A} = 21,74 \Omega$$

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - (R + R_V)^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{(21,74\Omega)^2 - (15,8\Omega + 1\Omega)^2}}{2\pi \cdot 100\,000 Hz} = 21,96\mu H$$

Nun folgt noch der Zusammenhang von der Leitungsinduktivität und des Induktivitätsbelages bei einer Leitungslänge von $50m$:

$$L' = \frac{L}{l} \quad (31)$$

$$L' = \frac{L}{l} = \frac{21,96 \mu H}{50 m} = 0,439 \mu H/m \quad L \dots \dots \text{Leitungsinduktivität}$$

3.2.4.3 Messbericht & Vergleich

Zusammenfassend noch die Gegenüberstellung der Messungen (Berechnungen) und den Datenblattwerten:

Messung	Datenblatt
L'	L'
$[\mu H/m]$	$[\mu H/m]$
0,439	0,250

Tabelle 4: Zusammenfassung Induktivitätsbelag

Mit dieser hier angewendeten Messmethode lässt sich die Induktivität der Leitung näherungsweise bestimmen, da mit dem zur Verfügung stehenden Induktivitätsmessgerät die tatsächliche Induktivität nicht bestimmt werden konnte, da die Auflösung dieses Gerätes $\pm 1 \mu H$ beträgt.

Um diese Messungen noch exakter durchführen zu können wären geeignetere und genauere Messgeräte notwendig.

3.2.5 Ermittlung des Wellenwiderstandes

Aus den vorherigen Messungen kann der Wellenwiderstand (verlustlose Betrachtung) mit der Formel 24 berechnet werden:

$$Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{0,439 \cdot 10^{-6} H/m}{106 \cdot 10^{-12} F/m}} = 64,35 \Omega$$

Zum Vergleich kann einerseits das Datenblatt herangezogen werden und auch mit den Abmessungen des Kkoaxialkabels bei bekanntem Dielektrikum gerechnet werden, was folgenden Wert bei folgenden Angaben aus den Datenblättern ergibt:

ϵ_r [—]	$d_{a,\min}$ [mm]	$d_{i,\min}$ [mm]	$d_{a,\max}$ [mm]	$d_{i,\max}$ [mm]
2,4	1,770	0,455	2,030	0,505

$$Z_{W,\max} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,\max}}{d_{i,\min}}\right) = \frac{60}{\sqrt{2,4}} \cdot \ln\left(\frac{2,030 \text{ mm}}{0,455 \text{ mm}}\right) = 57,92 \Omega$$

$$Z_{W,\min} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,\min}}{d_{i,\max}}\right) = \frac{60}{\sqrt{2,4}} \cdot \ln\left(\frac{1,770 \text{ mm}}{0,505 \text{ mm}}\right) = 48,57 \Omega$$

Zusammenfassend lässt sich also folgendes feststellen:

Messung	Berechnung	Datenblatt
Z_W [Ω]	Z_W [Ω]	Z_W [Ω]
64,35	48,57 – 57,92	50 ± 2

Tabelle 5: Zusammenfassung Wellenwiderstand (verlustlos)

3.3 Dämpfungsmessung

3.3.1 Aufgabenstellungen

Das 2.Hauptprojekt besteht darin, herasuzufinden wie stark die Dämpfung entlang einer Koaxialleitung ist. Diese Dämpfung wurde nämlich bei der verlustlosen Betrachtung fast vollkommen vernachlässigt.

Nochmals kurz zusammengefasst verursachen der ohmsche Leitungswiderstand R und Leitungsableitungswiderstand G Verluste in der Leitung bzw. Dielektrikum in Form von Wärme. Diese werden auch als Dämpfungsmaß a angegeben und können bei unseren Messungen noch mit:

$$a = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad \text{in } dB \quad (32)$$

berechnet werden.

Wird das Dämpfungsmaß mit der Leitungslänge l verknüpft so folgt nach Gleichung 9 der Dämpfungsfaktor α , welcher dann die Dämpfung meist bei Koaxialleitungen in dB pro 100m angibt.

3.3.2 Schaltungsentwicklung

Um „nur“ den Einfluss der ohmschen Anteile bei der Dämpfung und keine Phasenverschiebung (siehe Kap. 3.6) zu erzeugen, wurde eine kleine Frequenz von $f = 50\text{kHz}$ gewählt. Die sinusförmige Eingangsspannung vom Frequenzgenerators betrug $U_{1,\text{ss}} = 5\text{V}$. Die dafür entwickelte Messschaltung hat folgende Form:

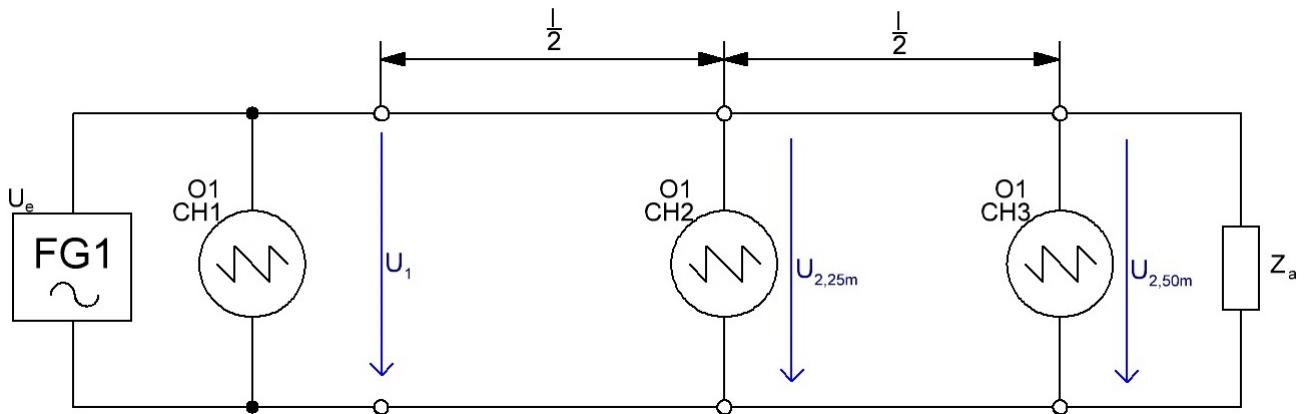
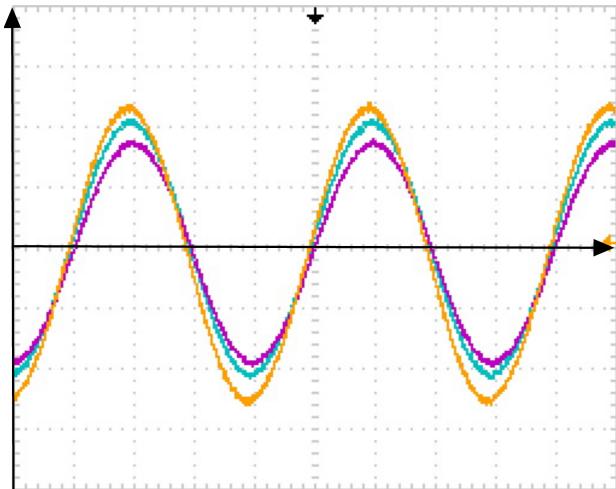


Abbildung 13: Messschaltung zur Ermittlung der Dämpfungserscheinung einer Koaxialleitung

Das Leitungsende des insgesamt 50m langen ($2 \cdot 25\text{m}$) ist hierbei mit laut Angabe des hps-Skriptums mit einem Widerstand von $Z_a = 50\Omega$ abzuschließen. (Meiner Meinung nach wäre es jedoch besser gewesen mit dem selbst berechneten Wellenwiderstand abzuschließen, als den aus dem Datenblatt zu nehmen.)

3.3.3 Messvorgang & Auswertung

Nach dem Aufbau erfolgt die Inbetriebnahme und das Oszilloskope lieferte somit folgende Graphik:



Dabei gilt folgendes:

$y - Achse$	$U(t)$
$x - Achse$	t
U_1	[1 V/Div.]
$(gelb)$	CH1
$U_{2,25m}$..	[1 V/Div.]
$(blau)$	CH2
$U_{2,50m}$..	[1 V/Div.]
$(lila)$	CH3
M	[5 μ s/Div.]
	horiz. Skalenteilung

Abbildung 14: Oszilloskopeaufnahme der Dämpfung bei einem Koaxialleiters

Gleichzeitig konnte mit dem Oszi O1 folgendes gemessen werden:

$U_{1,\text{ss}}$	$U_{2,25\text{m},\text{ss}}$	$U_{2,50\text{m},\text{ss}}$
[V]	[V]	[V]
5	4, 36	3, 76

Tabelle 6: Messwerte der Dämpfungsmessung

Mit der Formel 32 kann nun jeweils die Dämpfung an den beiden Stellen $x = 25m$ und $x = 50m$ die Dämpfung berechnet werden:

$$a_{25m} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_{1,ss}}{U_{2,25m,ss}} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{5V}{4,36V} \right) = 1,190 dB$$

$$a_{50m} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_{1,ss}}{U_{2,50m,ss}} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{5V}{3,76V} \right) = 2,476 dB$$

Die graphische Darstellung der Dämpfung durch $U(l)$ zeigt:

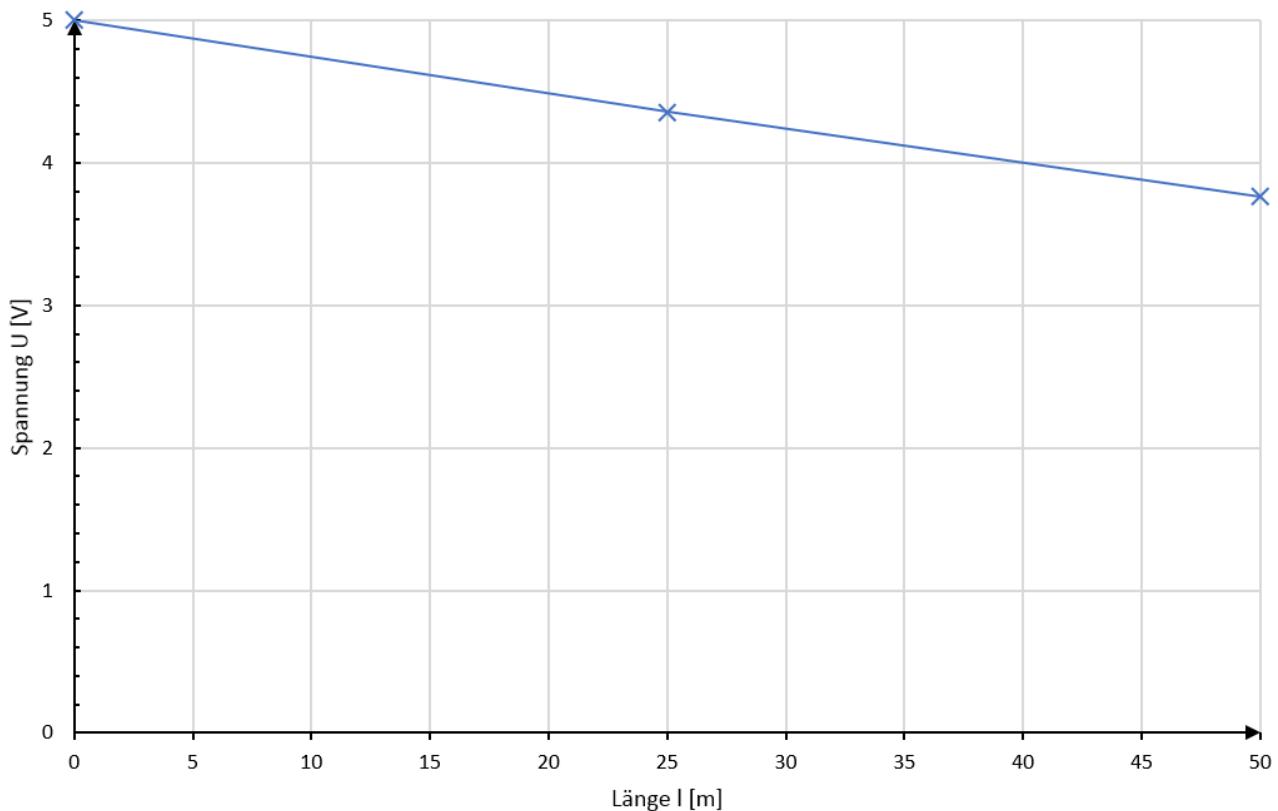


Abbildung 15: Dämpfungserscheinung einer Koaxialleitung

Will man nun den Dämpfungsfaktor α in dB bezogen auf eine Länge von 100m ermitteln so gilt:

$$\alpha = \frac{a_{50m}}{l} \cdot 100 \text{ m} = \frac{2,476 \text{ dB}}{50 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 4,952 \text{ dB}/100 \text{ m}$$

3.3.4 Messbericht

In diesem Teil des Gesamtprojektes konnten wir feststellen, dass zusätzlich zu anderen Faktoren auch die Leitungslänge eine Rolle für die Dämpfung spielt. Man kann in der Abb. 15 sehr gut den linearen Verlauf der Funktion $U(l)$ erkennen und zusammengefasst stellen wir in diesem Teilprojekt fest:

a_{25m} [dB]	a_{50m} [dB]	α [dB/100 m]
1,190	2,476	4,952

Tabelle 7: Zusammenfassung Dämpfungsmessung

3.4 Frequenzabhängigkeitsbestimmung

3.4.1 Aufgabenstellungen

Der 3. Teil des Gesamtpunktes besteht aus dem Erfassen des Dämpfungseinflusses von den induktiven und kapazitiven Leitungsbelägen. Es kommt nämlich durch den Skineffekt, dass allgemein die Dämpfung entlang einer Leitung mit steigender Frequenz zunimmt. Da vor allem der kapazitive Anteil bei höheren Frequenzen zunimmt mit seinen Auswirkungen lässt sich näherungsweise die Grenzfrequenz mit folgender Formel ermitteln:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (33)$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 15,8 \Omega \cdot 5,32 \cdot 10^{-9} F} = 1,89 MHz$$

Anders gesagt, ab der Frequenz, wo die Leitungsdämpfung den Wert $-3dB$ annimmt, ist die Grenzfrequenz erreicht. Nun besteht die Aufgabe darin dieses messtechnisch zu erfassen, sprich es soll die Frequenzabhängigkeit und der Dämpfungskoeffizient α „gemessen“ werden.

3.4.2 Schaltungsentwicklung

Für diesen Versuch wird erneut eine sinusförmige Eingangsspannung mit einem Spitzenwert von $1V$ gewählt. Die Frequenz wird mittels dem Frequenzgenerators FG1 im Bereich von $10\text{ Hz} < f < 2\text{ MHz}$ verändert. Falls ein Generator mit höherer maximal Frequenz zur Verfügung steht sollt bis etwa 10 MHz gemessen werden.

Die dazugehörige Schaltung hat folgende Form:

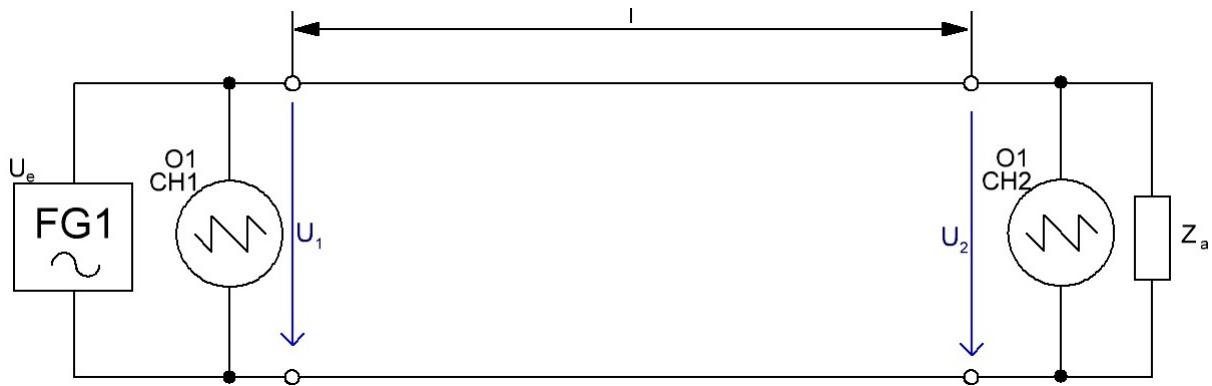


Abbildung 16: Messschaltung zur Ermittlung der Frequenzabhängigkeit einer Koaxialleitung

Die Leitungsende ist erneut mit einem schon im Koaxial Bord integrierten 50Ω Widerstand abschließen und die Leitungslänge beträgt wieder $50m$.

Einmal noch die Darstellung im hps-Skriptum zur Realisierung:

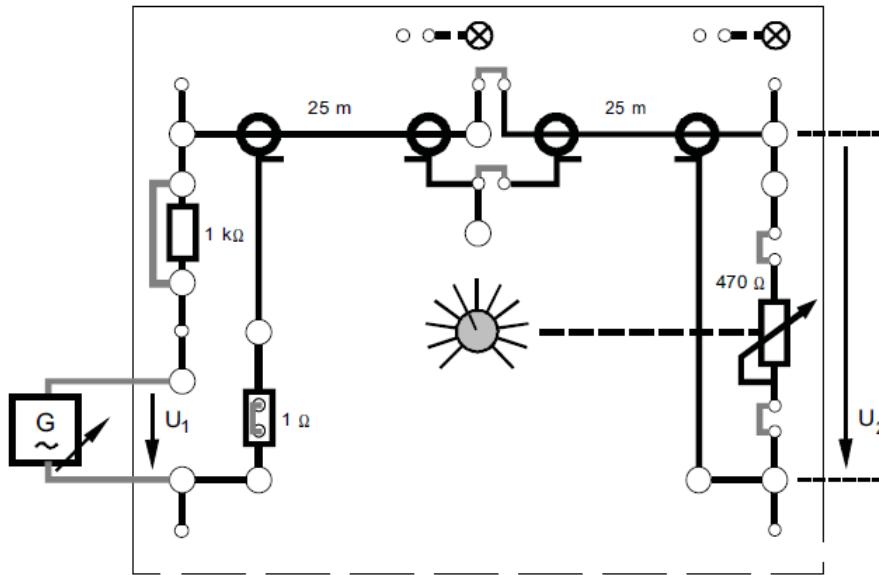


Abbildung 17: Realisierung der Frequenzabhängigkeit bestimmt mittels dem KB1

Es ist hier, streng genommen, ersichtlich, dass der Abschlusswiderstand eigentlich ein Potentiometer ist, welches auf 50Ω einzustellen ist.

3.4.3 Messvorgang & Auswertung

Nun kann im Prinzip mit dem Messen begonnen werden, indem die Frequenz schrittweise im Messbereich erhöht wird und mittels dem Oszi konnte folgendes dokumentiert werden:

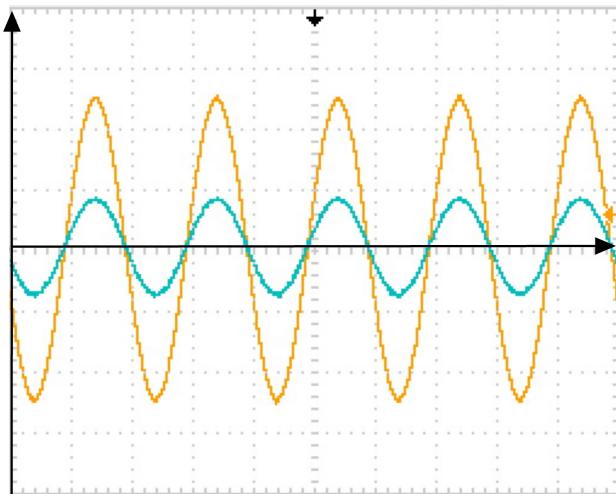


Abbildung 18: Oszilloskopeaufnahme der Frequenzabhängigkeit eines Koaxialleiters bei $f = 10\text{Hz}$

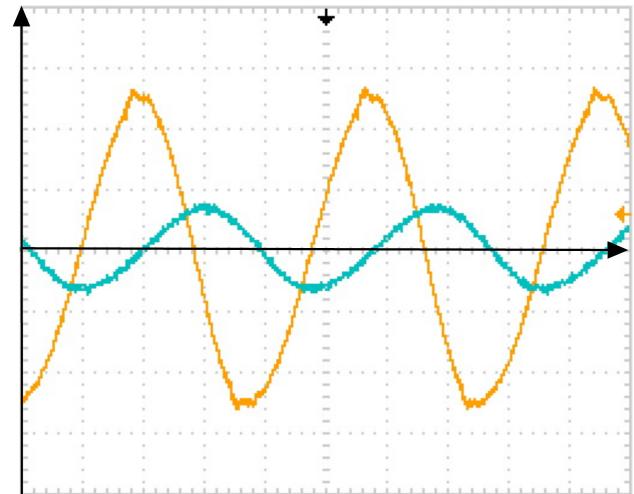


Abbildung 19: Oszilloskopeaufnahme der Frequenzabhängigkeit eines Koaxialleiters bei $f = 1\text{MHz}$

Bei den Aufnahmen gilt:

$y - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	$U(t) / I(t)$
$x - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	t
$U_1 \dots\dots [200\text{ mV/Div.}]$	(gelb) CH1
$U_2 \dots\dots [500\text{ mV/Div.}]$	(blau) CH2
$M \dots\dots [5\text{ ms/Div.}]$	horiz. Skalenteilung

$y - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	$U(t) / I(t)$
$x - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	t
$U_1 \dots\dots [200\text{ mV/Div.}]$	(gelb) CH1
$U_2 \dots\dots [500\text{ mV/Div.}]$	(blau) CH2
$M \dots\dots [250\text{ ns/Div.}]$	horiz. Skalenteilung

Es ist nur sehr schwer ersichtlich, dass die Ausgangsspannung absinkt, was aber durch die nachfolgenden Messungen mit dem Oszilloskop bei den verschiedenen Frequenzen hervorgeht. Bei der Betrachtung der Aufnahmen ist auf die x-Achsenskalierung Acht zu geben!

Die Messungen ergeben nun mit der Formel 9:

f [kHz]	$U_{2,ss}$ [V]	a_{50m} [dB]	α [dB/100m]
0,01	0,820	1,724	3,447
0,1	0,820	1,724	3,447
1	0,800	1,938	3,876
10	0,800	1,938	3,876
100	0,780	2,158	4,316
1000	0,740	2,615	5,231
2000	0,680	3,350	6,700

Tabelle 8: Messwerte der Frequenzabhängigkeitsmessung

Mittels Diagrammen wird es wesentlich besser ersichtlich wie der Verlauf der Ausgangsspannung bzw. Dämpfung aussieht, bzw. aussehen muss, jedoch lässt sich schon erkennen, dass die Grenzfrequenz überschritten worden sein muss, bei $\approx 1,5 \text{ MHz}$.

Nun das Diagramm von $U_2(f)$, sowie dem Dämpfungsmaß & -koeffizienten (auf 100m bezogen) in Abhängigkeit der Frequenz:

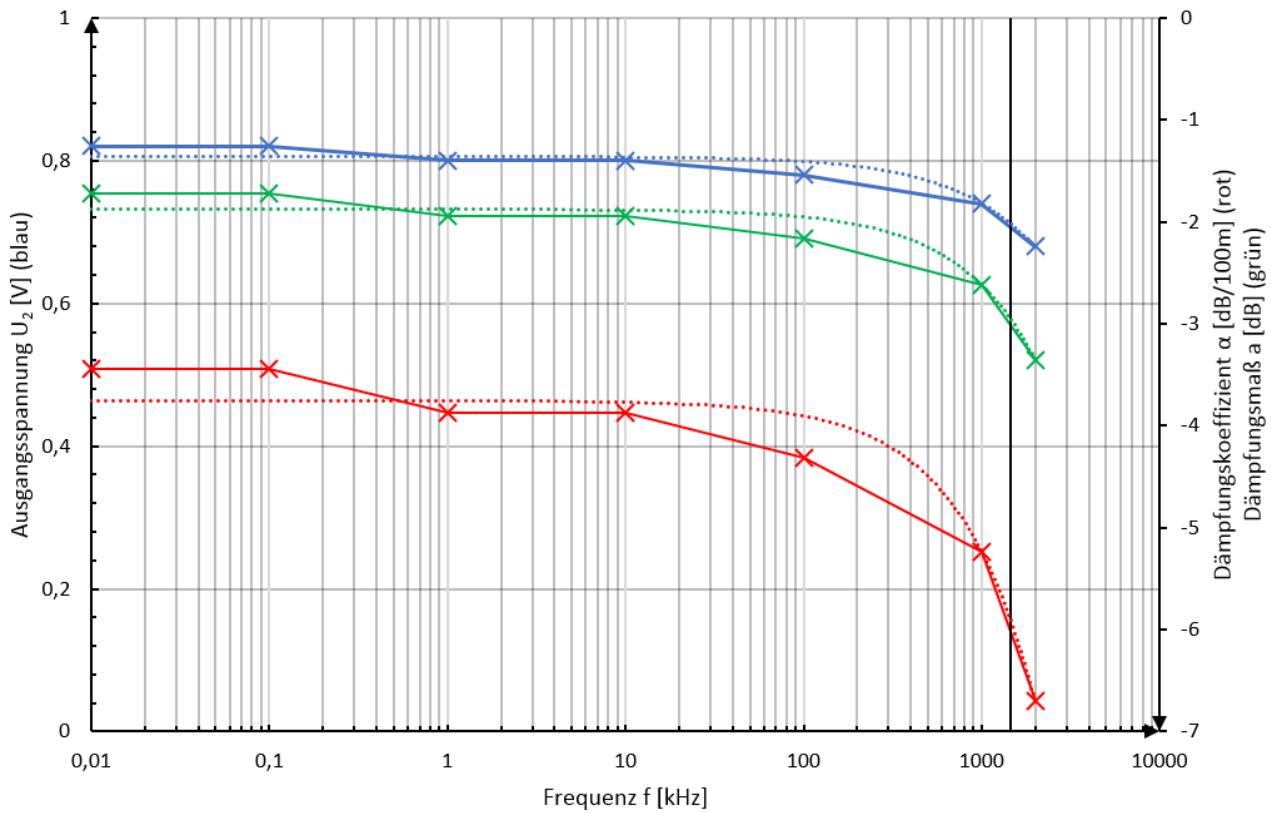


Abbildung 20: Frequenzabhängigkeiterscheinung einer Koaxialleitung

3.4.4 Messbericht

Es lässt sich mit dieser Teilübung also feststellen, dass ab einer gewissen Frequenz von hier $\approx 1,6 \text{ MHz}$ die Dämpfung stark zunimmt.

Ein wirklicher Vergleich mit dem Datenblatt ist nur schwer möglich, da dessen Messungen erst ab 10 MHz ($\alpha = 12,8 \text{ dB}/100\text{m}$) beginnen, wo die Grenzfrequenz schon weit unterschritten ist, jedoch ist ein Verlauf in dessen Richtung in der Abb.20 deutlich erkennbar.

3.5 Eingangswiderstandsmessung

3.5.1 Aufgabenstellungen

In diesem Teilprojekt soll getestet werden in welchem Zusammenhang der Abschlusswiderstand einer Koaxialleitung mit dem Eingangswiderstand steht. Bekannterweise hängt der Eingangswiderstand ja von den Leitungskennwerten, sprich von dem Widerstandsbelag, Ableitungsbelag, Induktivitätsbelag und Kapazitätsbelag, sowie von der angelassenen Frequenz der Eingangsspannung ab.

Es ist somit der Einfluss des Abschlusswiderstandes zu ermitteln, indem bei den 3 speziellen Betriebsfällen: Leerlauf, Kurzschluss und Anpassung, Messungen zur Ermittlung vom Eingangswiderstand durchgeführt werden.

Diese Messungen sind im Anschluss darauf graphisch in einem Diagramm gegenüberzustellen und auszuwerten.

3.5.2 Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Anpassung

3.5.2.1 Schaltungsentwicklung

Um den Eingangswiderstand bei Anpassung berechnen zu können wurde folgende Messschaltung entwickelt:

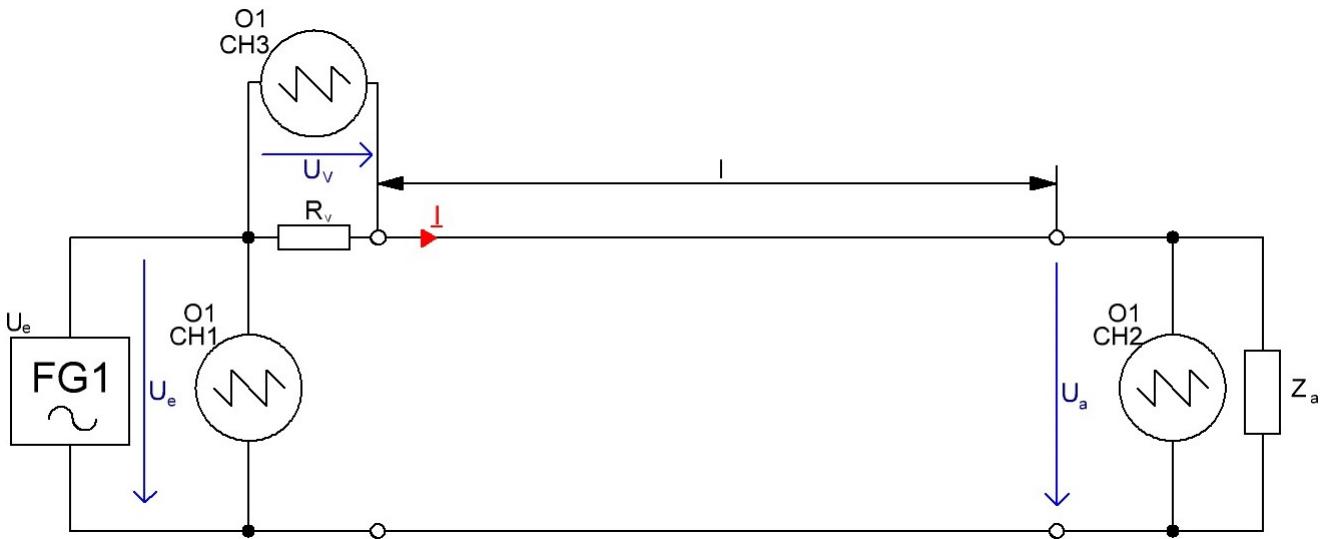


Abbildung 21: Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Anpassung

Dabei wurde ein Vorwiderstand welcher sehr klein sein sollte, von $R_V = 1 \Omega$ gewählt und die Spannung an diesem kann gemessen werden und somit kann der Eingangswiderstand mit der nachfolgenden Formel ermittelt werden:

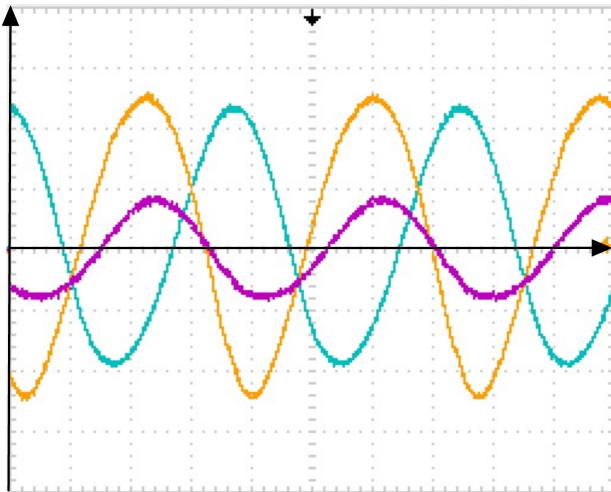
$$|Z_E| = \frac{U_e}{I} = \frac{U_e}{U_V} \cdot R_V \quad (34)$$

Die sinusförmige Eingangsspannung betrug $U_{e,ss} = 5V$ und der Frequenzbereich lag erneut im Bereich von $10\text{ Hz} < f < 2\text{ MHz}$. Zusätzlich wurde noch die Ausgangsspannung am Oszilloscope sichtbar gemacht, da diese vor allem im Resonanzbereich sehr interessant wird (bei Leerlauf).

Die Länge des Koaxialkabels betrug erneut $l = 50\text{ m}$, jedoch wurde nun einmal mit dem selbst berechneten Wellenwiderstand von $Z_W \approx 64,35\Omega$ die Leitung am Ende abgeschlossen, sprich $Z_2 = Z_W$.

3.5.2.2 Messvorgang & Auswertung

Es konnte nach der Inbetriebnahme folgendes am Oszilloskope dargestellt werden:



Dabei gilt folgendes:

$y - \text{Achse} \dots \dots \dots$	$U(t)$
$x - \text{Achse} \dots \dots \dots$	t
$U_e \dots \dots \quad [1 \text{ V}/\text{Div.}]$	(gelb) CH1
$U_a \dots \dots \quad [1 \text{ V}/\text{Div.}]$	(blau) CH2
$UV \dots \dots \quad [50 \text{ mV}/\text{Div.}]$	(lila) CH3
$M \dots \dots \quad [250 \text{ ns}/\text{Div.}]$	horiz. Skalenteilung

Abbildung 22: Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Anpassung bei $f = 1 \text{ MHz}$

Bei den weiteren Frequenzen konnte folgendes gemessen und daraus mit der Formel 34 der dazugehörige Eingangswiderstand ermittelt werden.

f [kHz]	$U_{V,ss}$ [mV]	Z_E [Ω]
0,01	76	65,8
0,1	76	65,8
1	78	64,1
10	78	64,1
100	80	62,5
1000	82	61,0
2000	86	58,1

Tabelle 9: Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Anpassung

3.5.2.3 Messbericht

Wir konnten also durch diesen Versuch feststellen, dass das Abschließen mit dem Wellenwiderstand dazu führt, dass sich die induktiven & kapazitiven Blindleistungsbedarfe aufheben und nur Wirkleistung in die Leitung eingespeist werden muss.

3.5.3 Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Leerlauf

3.5.3.1 Schaltungsentwicklung

Die Messschaltung für diesen Versuch hat folgende Form:

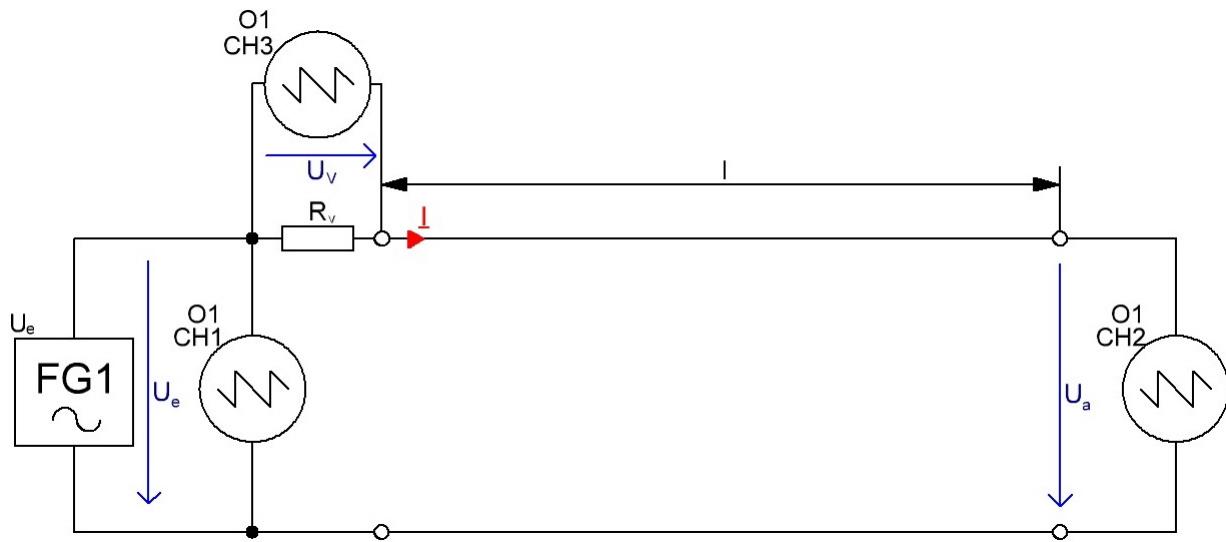
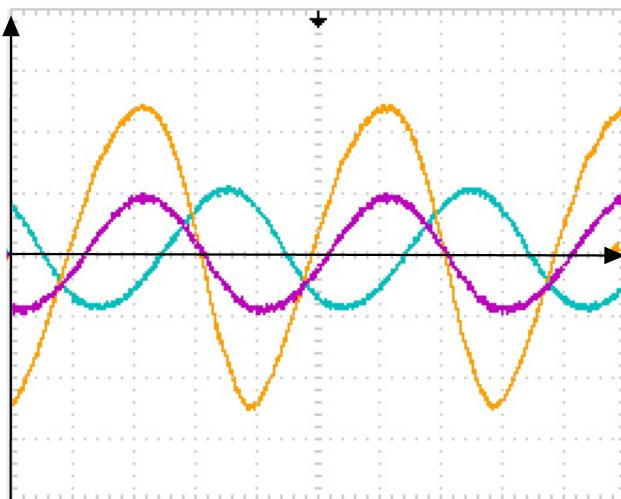


Abbildung 23: Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Leerlauf

Der Vorwiderstand betrug wieder $R_V = 1 \Omega$ und die sinusförmige Eingangsspannung weist einen Spitzenspitzen-Wert von 5 V auf. Nun kann mit den Messungen des Eingangswiderstandes des 50 m langen Koaxialkabels bei Leerlauf begonnen werden.

3.5.3.2 Messvorgang & Auswertung

Das Oszi O1 lieferte folgende Aufnahme bei $f = 1 \text{ MHz}$:



Dabei gilt folgendes:

$y - Achse$	$U(t)$
$x - Achse$	t
U_e	[1 V/Div.]
U_a	[5 V/Div.]
UV	[200 mV/Div.]
M	[250 ns/Div.]

Abbildung 24: Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Leerlauf bei $f = 1MHz$

Es wurde natürlich erneut bei den verschiedenen Frequenzen Messungen durchgeführt und es kann somit jeweils der Eingangswiderstand nach der Formel 34 berechnet werden:

f	$U_{\text{V,ss}}$	Z_E
[kHz]	[mV]	[\Omega]
0,01	200	25,0
0,1	200	25,0
1	160	31,3
10	80	62,5
100	150	33,3
1000	220	22,7
2000	128	39,1

Tabelle 10: Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Leerlauf

3.5.3.3 Messbericht

Wir konnten in diesem Versuch feststellen, dass in der Nähe der Resonanz die Eingangsspannung im Prinzip im Gesamten reflektiert wird, was bei der Oszilloskopeaufnahme durch $U_{e,ss} = 5\text{ V}$ und $U_{a,ss} = 10\text{ V}$ ersichtlich ist.

Der Eingangswiderstand steigt im Prinzip mit der Frequenz bei Leerlauf an, jedoch im Resonanzbereich sinkt er kurzfristig, was vereinfacht gesagt auf die Serienresonanz zurückzuführen ist.

3.5.4 Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Kurzschluss

3.5.4.1 Schaltungsentwicklung

Der 3. Betriebssonderfall ist der Kurzschluss. Die Aufgabe besteht hier, den Eingangswiderstand Z_E bei $U_{e,ss} = 5V$ mit f im Bereich von $10\text{ Hz} < f < 2\text{ MHz}$ bei kurzgeschlossenem Ende zu erfassen. Dabei wurde erneut ein Vorwiderstand R_V von 1Ω zur „Messung“ des Stromes verwendet. Die Schaltung weist nun folgende Form auf:

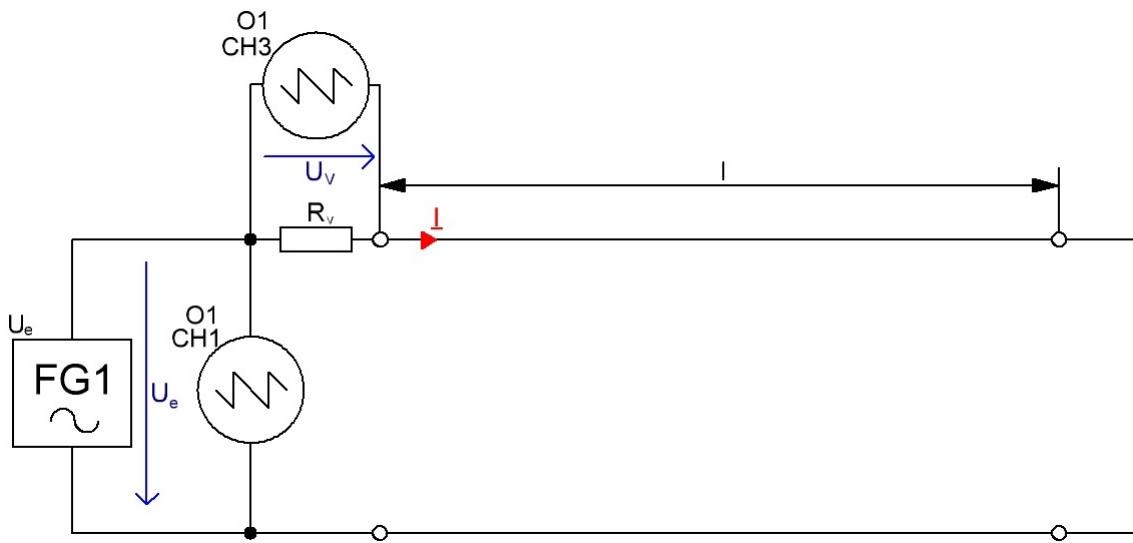
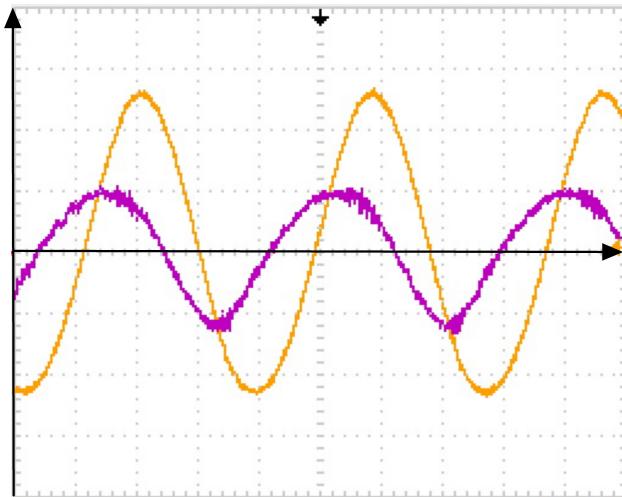


Abbildung 25: Messschaltung zur Ermittlung des Eingangswiderstandes bei Kurzschluss

Die Länge des Koaxialkabels betrug natürlich erneut $l = 50\text{ m}$ und die Frequenz wurde schrittweise, um den Faktor 10 (dekadisch) erhöht, bis zu den Grenzen des Funktionsgenerators bei 2 MHz .

3.5.4.2 Messvorgang & Auswertung



Dabei gilt folgendes:

$y - \text{Achse} \dots \dots \dots$	$U(t)$	
$x - \text{Achse} \dots \dots \dots$	t	
$U_e \dots \dots [1 \text{ V/Div.}]$	(gelb) CH1	
$U_V \dots \dots [20 \text{ mV/Div.}]$	(lila) CH3	
$M \dots \dots [250 \text{ ns/Div.}]$	horiz. Skalenteilung	

Abbildung 26: Oszilloskopeaufnahme zur Eingangswiderstandsbestimmung Kurzschluss bei $f = 1 \text{ MHz}$

Die Messungen bei den verschiedenen Frequenzen ergab folgendes:

f [kHz]	$U_{V,ss}$ [mV]	Z_E [Ω]
0,01	24	208,3
0,1	28	178,6
1	40	125,0
10	136	36,8
100	198	25,3
1000	48,8	102,5
2000	176	28,4

Tabelle 11: Messwerte der Eingangswiderstandsbestimmung bei Kurzschluss

3.5.4.3 Messbericht

Es lässt sich erkennen, dass bei steigender Frequenz der Eingangswiderstand abnimmt, jedoch kurz im Resonanzbereich wieder ansteigt. Nachfolgend werden alle 3 Betriebsfälle zur Übersichtlichkeit noch einmal gegenübergestellt.

3.5.5 Verläufe des Eingangswiderstandes

Nun werden als Zusammenfassung die Verläufe der Eingangswiderstände bei den speziellen Betriebsfällen graphisch gegenübergestellt:

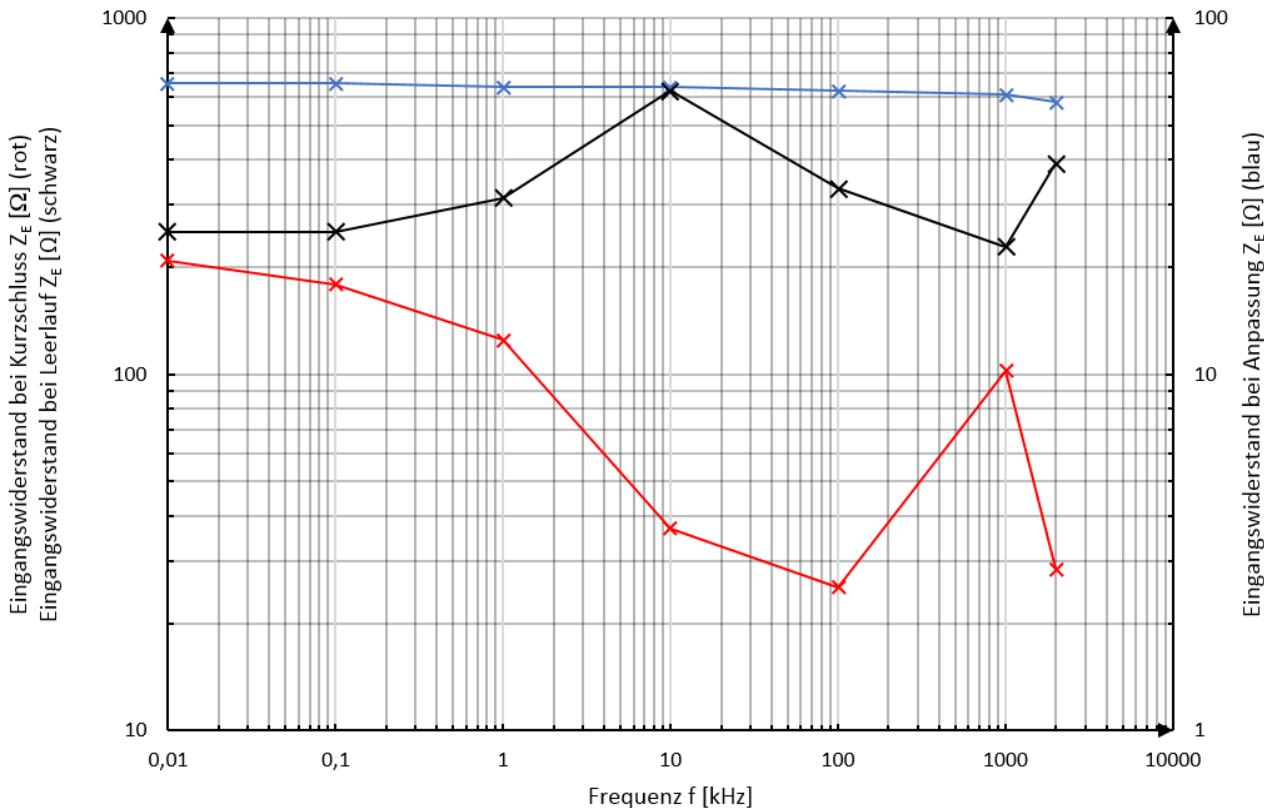


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Eingangswiderstandsverläufe

Für genauere Aussagen über dessen Verlauf müsste man noch bei höheren Frequenzen messen, was aber mit unserem Frequenzgenerator nicht möglich war.

Es ist aber ersichtlich, dass, wenn man mit dem Wellenwiderstand abschließt, der Verlauf von Z_E (genauer $|Z_E|$) annähernd konstant ist, hingegen er im Falle eines Kurzschlusses mit der Frequenz steigt und bei Leerlauf absinkt, mit Aufnahme in der Resonanzgegend wo es zu kurzen Abfällen bzw. Überhöhungen kommt.

3.6 Stehende Welle

3.6.1 Aufgabenstellungen

Das letzte Projekt befasst sich mit den stehenden Wellen entlang einer Koaxialleitung. Die erste Übung besteht darin die stehenden Wellen mittels zwei LEDs bei $x = 25 \text{ m}$ & $x = 50 \text{ m}$ sichtbar zu machen. Bei diesem Versuch ist im Prinzip nur jeweils eine LED anzuschließen und die Eingangsfrequenz zu verändern. Es ist festzustellen bei welchen Frequenzen und welchen Betriebsfällen die LEDs leuchten bzw. nicht. Auf Grund dessen, dass dies nicht sehr relevant, aber trotzdem informativ ist, wurde auf die Protokollierung verzichtet.

Die anschließende Aufgabenstellung besteht darin, bei unterschiedlichen Betriebsfällen und Frequenzen mittels dem Oszilloskope die Spannungen sichtbar zu machen und somit die graphische Darstellung von den stehenden Wellen zu ermöglichen.

3.6.2 Ermittlung der stehenden Welle

3.6.2.1 Schaltungsentwicklung

Die Aufgabe besteht ja nun darin die stehenden Wellen sichtbar zu machen. Dafür ist folgende Messschaltung entwickelt worden:

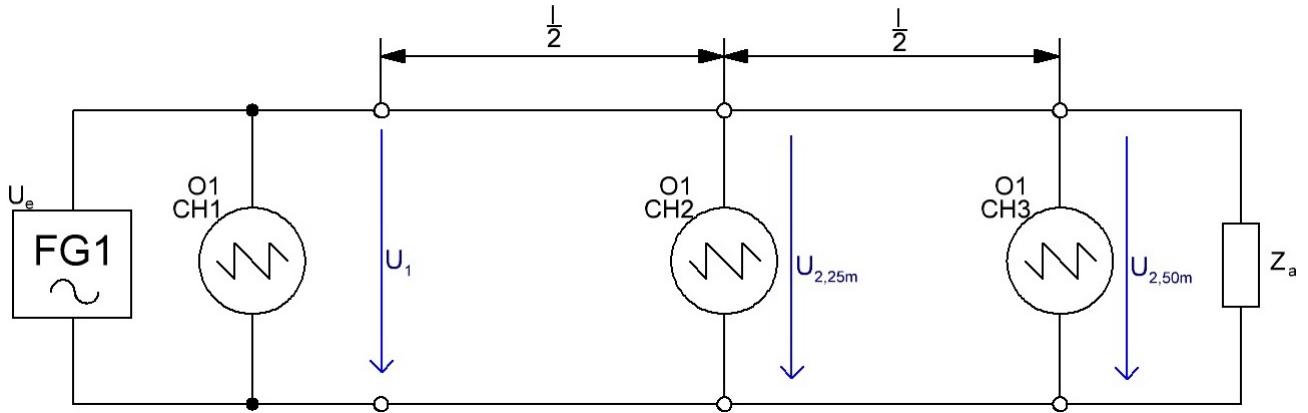


Abbildung 28: Messschaltung zur Ermittlung der Wellen einer Koaxialleitung

Es sind im Anschluss die drei speziellen Betriebsfälle zu überprüfen, sprich das Leitungsende ist einmal offen zu lassen (Leerlauf), einmal mit dem Wellenwiderstand abzuschließen, wie es in der Messschaltung schon ersichtlich ist, (Anpassung (mit $Z_2 = Z_W \approx 64,35 \Omega$)) und schließlich noch einmal kurzzuschließen (Kurzschluss).

Nun soll jeweils bei den Frequenzen $f = 0,45 \text{ MHz}$, $f = 0,9 \text{ MHz}$ & $F = 1,8 \text{ MHz}$ die Spannung der insgesamt $l = 50 \text{ m}$ ($2 \cdot 25 \text{ m}$) langen Koaxialleitung bei $x = 25 \text{ m}$ und $x = 50 \text{ m}$ gemessen werden. (Aus zeitlichen Gründen konnten nicht alle Oszilloskopeaufnahmen gemacht werden.)

Die sinusförmige Eingangsspannung soll erneut einen Spitzen-Spitzen-Wert von 5 V aufweisen.

3.6.2.2 Messvorgang & Auswertung

Anpassung:

Am Beginn wurde mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen und es konnte folgendes am Oszilloskope zur Anzeige gebracht werden:

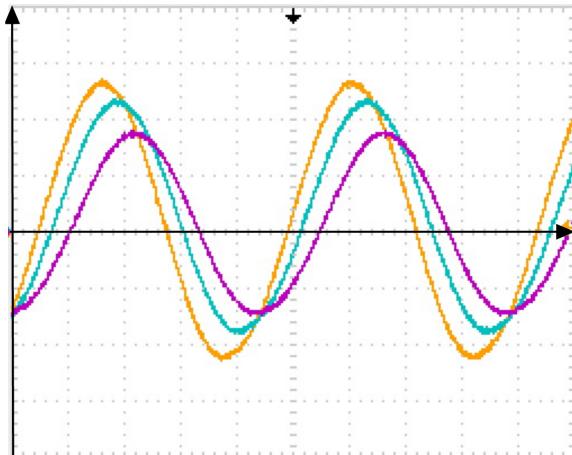


Abbildung 29: Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 0,45 \text{ MHz}$

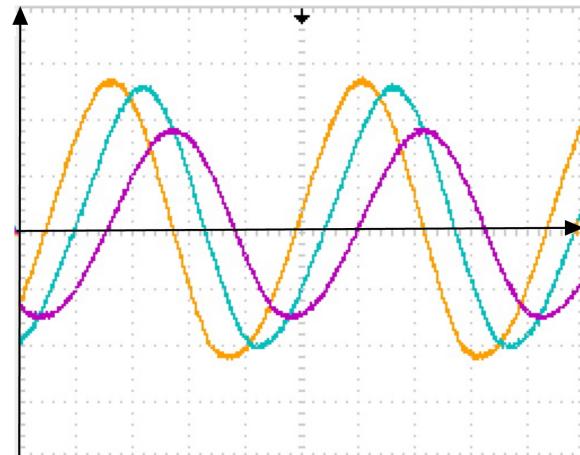


Abbildung 30: Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 0,9 \text{ MHz}$

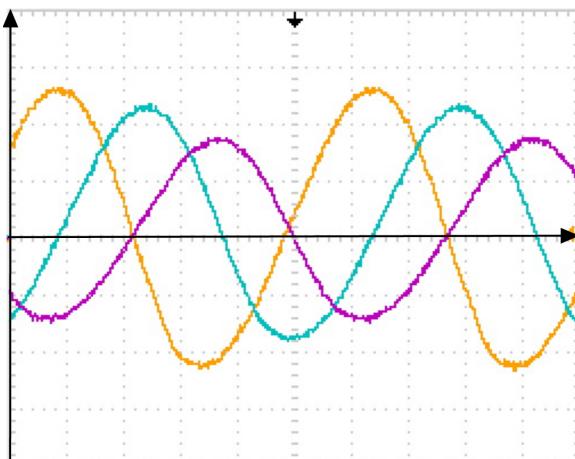


Abbildung 31: Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Anpassung $f = 1,8 \text{ MHz}$

In diesen Abbildungen lässt sich gut erkennen, dass in der Koaxialleitung nicht nur eine Dämpfung auftritt, welche im Kapitel 3.3 mit $f = 50 \text{ kHz}$ festgestellt wurde, sondern auch eine stark Frequenz-abhängige Phasenverschiebung. Sprich je höher die Frequenz, desto größer ist die Phasenverschiebung, was auch prinzipiell in der Formel 23 wiederspiegelt.

In der Abb. 30 ist ersichtlich, dass am Ende der Leitung schon eine Phasenverschiebung von $\approx 90^\circ$, hingegen bei der doppelten Frequenz von $f = 1,8 \text{ MHz}$ schon eine Verschiebung von mehr als $\approx 180^\circ$, wie in der Abb. 31 ersichtlich, vorliegt.

Dabei gilt jeweils folgendes:

$y - Achse$	$U(t)$	
$x - Achse$	t	
U_e	[1 V/Div.]	(gelb) CH1
$U_{a,25m}$..	[1 V/Div.]	(blau) CH2
$U_{a,50m}$..	[1 V/Div.]	(lila) CH3
M	[500 ns/Div.]	bei $f = 0,45 MHz$
M	[250 ns/Div.]	bei $f = 0,9 MHz$
M	[100 ns/Div.]	bei $f = 1,8 MHz$

Leerlauf:

Nun wird das Leitungsende offen gelassen und am Oszi O1 konnte folgendes abgelesen werden:

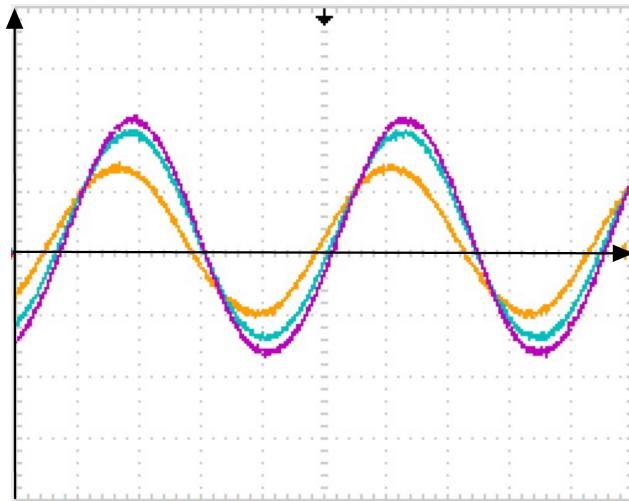


Abbildung 32: Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Leerlauf $f = 0,45 \text{ MHz}$

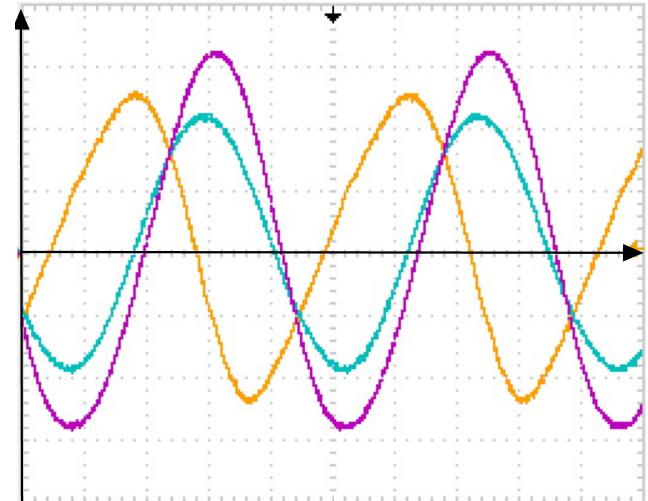


Abbildung 33: Oszilloskopeaufnahme der stehenden Wellen bei Leerlauf $f = 0,9 \text{ MHz}$

Bei den Aufnahmen gilt:

$y - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	$U(t)$
$x - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	t
$U_e \dots\dots\dots\dots\dots [2 \text{ V/Div.}]$	(gelb) CH1
$U_{a,25m} \dots\dots\dots\dots\dots [2 \text{ V/Div.}]$	(blau) CH2
$U_{a,50m} \dots\dots\dots\dots\dots [2 \text{ V/Div.}]$	(lila) CH3
$M \dots\dots\dots\dots\dots [500 \text{ ns/Div.}]$	

$y - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	$U(t)$
$x - \text{Achse} \dots\dots\dots\dots\dots$	t
$U_e \dots\dots\dots\dots\dots [1 \text{ V/Div.}]$	(gelb) CH1
$U_{a,25m} \dots\dots\dots\dots\dots [2 \text{ V/Div.}]$	(blau) CH2
$U_{a,50m} \dots\dots\dots\dots\dots [2 \text{ V/Div.}]$	(lila) CH3
$M \dots\dots\dots\dots\dots [250 \text{ ns/Div.}]$	

Wie schon in den Messungen im Kapitel 3.5.3.2 festgestellt, ist auch in den beiden Abbildungen klar zu erkennen, dass die Ausgangsspannung höher als die Eingangsspannung ist. Ebenfalls ist eine Phasenverschiebung vorhanden, welche wiederrum frequenzabhängig ist und im Leerlauf somit auch mit der Leitungslänge zusammenhängt.

4 Resümee

Am Ende aller Übungen lässt sich sagen, dass man Koaxialkabeln nicht wirklich verlustlos betrachten kann, sondern sich die Dämpfung, wie in den einzelnen Messungen ersichtlich, stark bemerkbar macht.

Zusammenfassend stellten wir durch diese einzelnen Übungen fest, dass bei einem offenen Ende der Leitung das reflektierende Signal im Prinzip gleich dem einfallenden Signal ist und sich somit die Beiden einzelnen Signale einfach addieren, was schließlich dazu führt, dass am Ende der Leitung die Spannung doppelt so groß wie am Anfang ist.

Das Pendant dazu bildet der Kurzschluss, da hier das reflektierende Signal vom Betrag gleich ist, jedoch mit dem anderen Vorzeichen, was somit eine Gesamtspannung am Leitungsende von Null, wie sowieso erwartet, ergibt.

Der dritte Fall den wir untersuchten war das Abschließen mit dem Wellenwiderstand, was dazu führte das im Prinzip keine (praktisch: fast) Reflexion auftritt.

Wir erkannten auch (nicht nur durch Mathematik), dass die Dämpfung von einigen Faktoren, wie zum Beispiel der Frequenz und der Leitungslänge, sowie dessen Leitungsbelägen abhängig ist.

Auch die Phasenverschiebung (mathematisch durch den Phasenkoeffizient ausgedrückt) ist von der Leitungslänge sowie dessen Parametern deutlich abhängig.

5 Kennwert und Tabellen von Leitungen

Folgende Datenblattausschnitte bezüglich des Koaxialkabels (Koaxial-Board) sind relevant für dieses Projekt:

Auszug aus dem Datenblatt der verwendeten Leitung RG 174		
Typ / Type		RG 174
Aufbau / Structure		
Innenleiter / Center conductor	Ø (mm)	StCub 7 x 0,16
Isolation / Isolation	Ø (mm)	LP-PE 1,52
Außenleiter / Outer conductor		CuGvz
Mantel / Jacket	Ø (mm)	PVC 2,80
Elektrische Eigenschaften / Electrical properties		
Wellenwiderstand / Characteristic impedance	(Ω)	50 ± 2
Dämpfung (Nennwert) bei 20 °C / Attenuation (Rating) at 20°C	10 MHz (dB / 100 m) 30 MHz (dB / 100 m) 100 MHz (dB / 100 m) 300 MHz (dB / 100 m) 500 MHz (dB / 100 m) 800 MHz (dB / 100 m)	12,8 18,0 30,0 49,0 73,0 93,0
Verkürzungsfaktor / Velocity ratio		0,66
Kapazität ca. / Capacitance approx.	(pF / m)	101
Induktivität / Inductance	(μH / m)	0,25
Betriebsspannung (Effektivwert) / Operating voltage	(V)	1,1
Max. Schleifenwiderstand / Max. loop resistance	(Ω / km)	360
Mechanische Eigenschaften / Mechanical properties		
Min. Biegeradius / Min. bending radius	Ø (mm)	15
Gewicht ca. / Weight approx.	(kg / km)	11

Ein weiters Datenblatt der RG 174 Koaxialleitung, welches genauere Eigenschaften auflistet bezüglich der Dicken der einzelnen Bestandteile:

Verwendung

Koaxialkabel für Funk- und Computersysteme sowie für den gesamten Bereich der Hochfrequenztechnik und Elektronik bei Signalübertragungen über kürzere Entferungen und, mit den kleinen Außendurchmesser, in räumlich begrenzten Verhältnissen. Aufbau und elektrische Eigenschaften von RG 174 A/U nach **MIL-C 17 F**. Bezeichnung nach MIL-C 17 F : M17/119-RG 174.

Das Kabel ist für feste und flexible Verlegung in trockenen und feuchten Räumen sowie im Freien bei fester Verlegung geeignet.

Aufbau

Innenleiter	Stakulite blank, 0,14 mm ² (7 x 0,16), 0,48 ± 0,025 mmØ
Dielektrikum	Voll-PE mit 0,5 mm Wanddicke, 1,52 ± 0,08 mmØ
Außenleiter	Kupferdrahtgeflecht verzinkt, opt. Bedeckung nom. 85,6 %
Außenmantel	PVC, ca.0,45 mm Wanddicke, schwarz, UV-beständig, flammwidrig Außendurchmesser 2,8 ± 0,13 mmØ

Elektrische Eigenschaften bei 20 °C

Leiterwiderstand Innenleiter	1 kHz	max. Ω/km	317	
Kapazität bei		max. pF/m	105	
Ausbreitungsgeschwindigkeit		%	66	
Wellenwiderstand		Ω	50 ± 2	
nach MIL 17/119				
Wellendämpfung bei	1 MHz	dB/100m	nom. 3,7	
	5 MHz	dB/100m	nom. 8,5	
	10 MHz	dB/100m	nom. 12	
	20 MHz	dB/100m	nom. 15	
	50 MHz	dB/100m	nom. 19	max. 21
	100 MHz	dB/100m	nom. 30	max. 33
	200 MHz	dB/100m	nom. 45	max. 52,5
	400 MHz	dB/100m	nom. 59	max. 82
	800 MHz	dB/100m	nom. 84	max. 128
	1 GHz	dB/100m	nom. 92	max. 180,44
HF-Spitzenspannung		max. kV ss	nom. 1,0	
Betriebsspannung	50 Hz	U _{eff} kV	nom. 1,5	
Prüfspannung		U _{eff} kV	nom. 2,0	

Mechanische und thermische Eigenschaften

Kabelgewicht	ca. kg/km	12	
mind. Biegeradius bei einmaligem Biegen	mm	15	
bei mehrmaligem Biegen	mm	28	
Temperaturbereich festverlegt	°C	- 40 bis + 80	
bewegt	°C	- 10 bis + 80	
Brandlast	kWh/m	0,04	
Brennverhalten	flammwidrig nach IEC 60332-1-2		

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Franz Deimel, Andreas Hasenzahl: Grundlagen der Elektrotechnik 1, © VERITAS-Verlag, Linz 2010, 14.Auflage
- [2] Franz Deimel, Andreas Hasenzahl: Grundlagen der Elektrotechnik 2, © VERITAS-Verlag, Linz 2011, 11.Auflage
- [3] Klaus Tkotz, Kronach: Fachkunde Elektrotechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten 2009, 26.Auflage