

Nachweis der Reziprozität von Antennen mittels Messungen und Simulationen unter Zuhilfenahme des Spiegelungsprinzips

Prof. Dr.-Ing. Harm-Friedrich Harms, Hochschule Emden-Leer Deutschland
Abdulrhman Al Masalma, Hochschule Emden-Leer

1 Einleitung

An der Hochschule Emden-Leer können Studierende im Rahmen des Studiums der Elektrotechnik, aber auch in anderen Studiengängen, ein Wahlpflichtmodul „Antennen und Wellenausbreitung“ belegen. Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde das Reziprozitätstheorem aus dem Bereich der Antennentechnik vorgestellt.

Dieses Theorem besagt folgendes: Im Rahmen einer Funkübertragungsstrecke zwischen zwei Antennen steht das Empfangssignal in einem bestimmten Verhältnis zum Sendesignal. Kehrt man nun die Senderichtung um, so ergibt sich auch hier das gleiche Verhältnis zwischen Empfangssignal und Sendesignal.

Es ergab sich eine Diskussion was dies genau bedeutet: Um welche elektrischen Größen geht es? Gilt dies vielleicht nur für identische Antennen? Gilt es allgemein für leitfähige Strukturen in einem elektromagnetischen Feld? Macht es einen Unterschied ob sich die Antennen im Nah- oder Fernfeld befinden?

Im Rahmen einer Studentischen Projektarbeit sollten diese Fragen von den Studierenden selbst beantwortet werden. Durch Literaturrecherche (Taschenbuch der Hochfrequenztechnik N2 [1], et al.) erkannten die Studierenden schnell, dass gemäß dem Reziprozitätstheorem die Streuparameter S_{12} und S_{21} , also die Transmissionsfaktoren, gleich sein sollen.

Das Reziprozitätsprinzip gilt allgemein für alle passiven Antennen. Integrierte Sende- oder Empfangsverstärker müssen aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Zudem gilt das Reziprozitätstheorem genau genommen für Antennen die sich in einem isotropen linearen Medium befinden. In dem Bereich in dem sich die Antennen befinden dürfen sich keine anisotropen, nichtlinearen Materialien befinden.

Die studentische Projektarbeit sollte für unterschiedliche Antennenstrukturen die Streuparameter sowohl messtechnisch, als auch durch Simulation untersuchen.

1.1 Messungen



Abbildung 1: EMV-Kabine mit Messtisch

Es wird üblicherweise von Antennen im freien Raum ausgegangen. Um vereinfacht Messungen durchführen zu können, wird im Folgenden vom Spiegelungsprinzip Gebrauch gemacht. Anstelle von Dipolen werden also Messungen an Monopolen durchgeführt. Durch die Nutzung des Spiegelungsprinzips ergibt sich eine gewisse Einschränkung. Es können nur noch Betrachtungen an spiegelsymmetrischen Antennenstrukturen vorgenommen werden. Diese Einschränkung ist hinzunehmen. Die Messungen werden in einer EMV-Kabine auf einem mit Kupferblech belegten Holztisch durchgeführt (Abb. 1). Der Tisch weist Abmessungen von 2 m x 1,42 m x 0,8 m auf. Die Messtechnik und die messende Person befinden sich unter dem Tisch, so dass keine Streuung der elektromagnetischen Felder durch sie stattfinden kann.



Abbildung 2: Anordnung zweier linearer Monopole. Simulationsmodell, Distanz 350 mm.

Ein linearer Monopol in der Mitte des Tisches wird als Referenzantenne genutzt (Abb. 2). Damit die Fläche des Tisches groß gegenüber der Wellenlänge und der Antennenstruktur ist, wurde für diesen Monopol eine Länge von 110 mm gewählt. Er weist einen Durchmesser von 1 mm auf. Unter Vernachlässigung des Verkürzungsfaktors sollte ein solcher linearer Monopol bei einer Frequenz von etwa 680 MHz seine $\lambda/4$ -Resonanz aufweisen. Für die Untersuchungen wurde ein Frequenzbereich gewählt, der in etwa von der halben bis zur doppelten Resonanzfrequenz reicht: 350 MHz bis 1500 MHz.

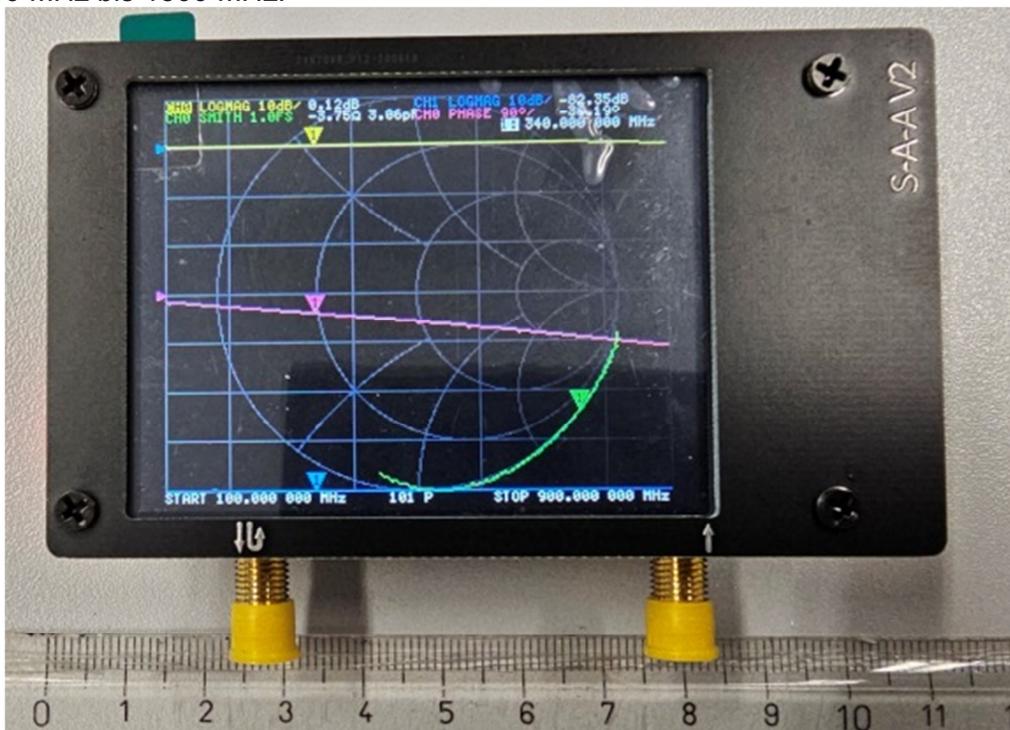


Abbildung 3: NanoVNA zur Messung der Streuparameter.

Gemäß dem Spiegelungsprinzip müsste die Spiegelfläche eigentlich unendlich groß sein. Dies ist technisch natürlich nicht umsetzbar. Damit die begrenzte Größe des Tisches nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messungen hat wurde eine Distanz von nur 350 mm zwischen den Antennen gewählt.

Die Messungen von Streuparametern lassen sich recht elegant mit einem „NanoVNA“ durchführen (Abb. 3) [2]. Hierbei handelt es sich um einen „Vector Network Analyzer“ mit Abmessungen von ca. 110 mm x 55 mm x 25 mm. Die Unsicherheit dieses Gerätes ist für Lehrzwecke ausreichend. Diese kleinen Geräte können preiswert erworben werden, so dass alle Gruppen von Studierenden für ein Semester dauerhaft damit ausgestattet werden können. Über eine USB- Schnittstelle können Einstellungen vorgenommen und Messergebnisse ausgelesen werden. Die Daten stehen somit für eine weitere Verarbeitung zur Verfügung. Zudem wird der Akku des Gerätes über USB aufgeladen, so dass es auch „stand-alone“ verwendet werden kann.

1.2 Simulation

Als Hilfsmittel für die Simulation elektromagnetischer Felder steht das Programm CONCEPT II [3] der Technischen Universität Hamburg-Harburg zur Verfügung. Das Programm beruht auf der Momentenmethode. Es berechnet elektromagnetische Felder im Frequenzbereich. Da die Messungen aufgrund der Nutzung des Spiegelungsprinzips an Monopolen erfolgen, werden die Simulation ebenfalls für Monopolstrukturen über Spiegelebene durchgeführt. In CONCEPT II kann dazu eine unendlich große, ideal leitfähige xy-Ebene aktiviert werden. Für vergleichende Betrachtungen zwischen Messung und Simulation weisen die Monopole jeweils einen Abstand von 350 mm zueinander auf (siehe Messung).

2 Untersuchung der Reziprozität durch Messung und Simulation

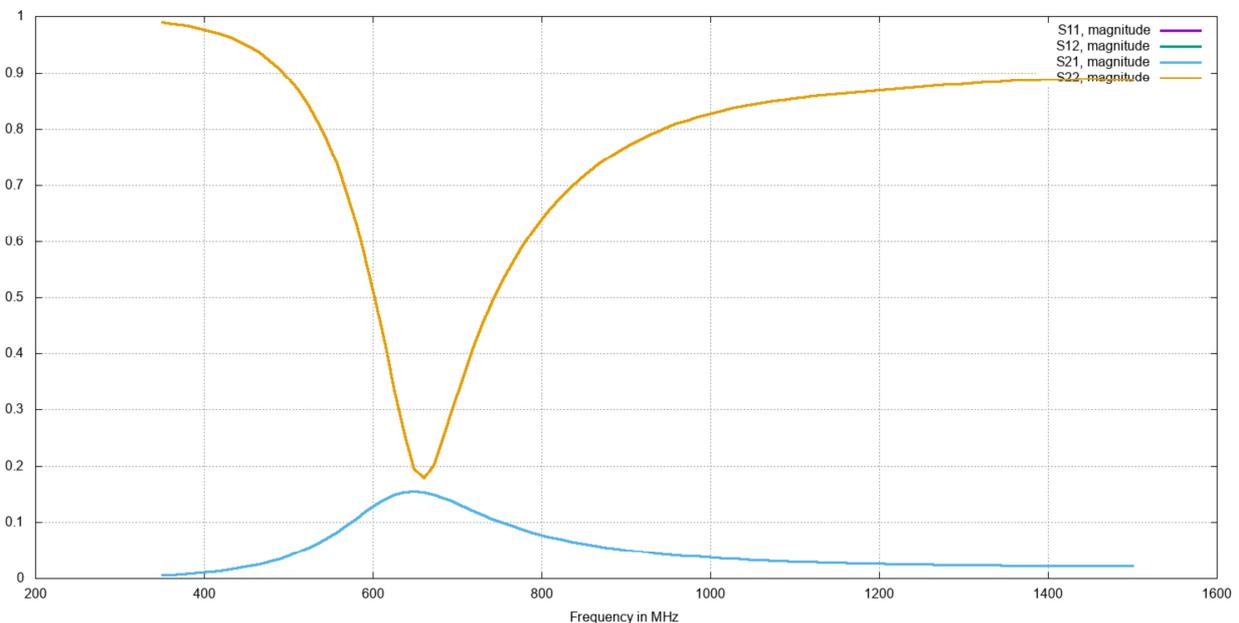


Abbildung 4: Simulationsergebnis der linearen Monopole.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Simulation zweier identischer linearer Monopole. Wie zu erwarten war, sind sowohl die S-Parameter S_{11} und S_{22} , also die Reflexionsfaktoren, als auch S_{12} und S_{21} , also die Transmissionsfaktoren, identisch.

Im Weiteren werden auch andere Strukturen als lineare Monopole untersucht. Wie in Abbildung 5 dargestellt werden z.B. Schmetterlingsantennen (als Monopol) in Kombination mit linearen Monopolen untersucht.

Die Diagramme in Abbildung 6 zeigen jeweils, dass die Messergebnisse für die beiden Reflexionsfaktoren S_{11} (Schmetterlingsmonopol) und S_{22} (linearer Monopol), die mittels NanoVNA gewonnen werden recht gut mit den Simulationsergebnissen des Programms CONCEPT überein stimmen. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Reflexionsfaktoren beider Antennen aufgrund ihrer unterschiedlichen Antennenstruktur verschieden sind.



Abbildung 5: Monopol-Schmetterlingsantenne in Kombination mit linearem Monopol. Distanz: 350 mm.

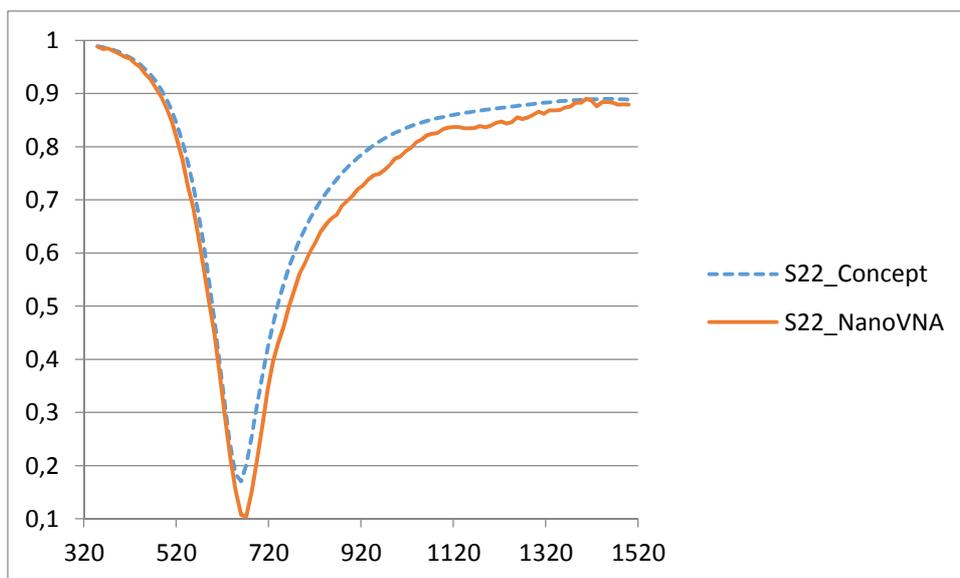
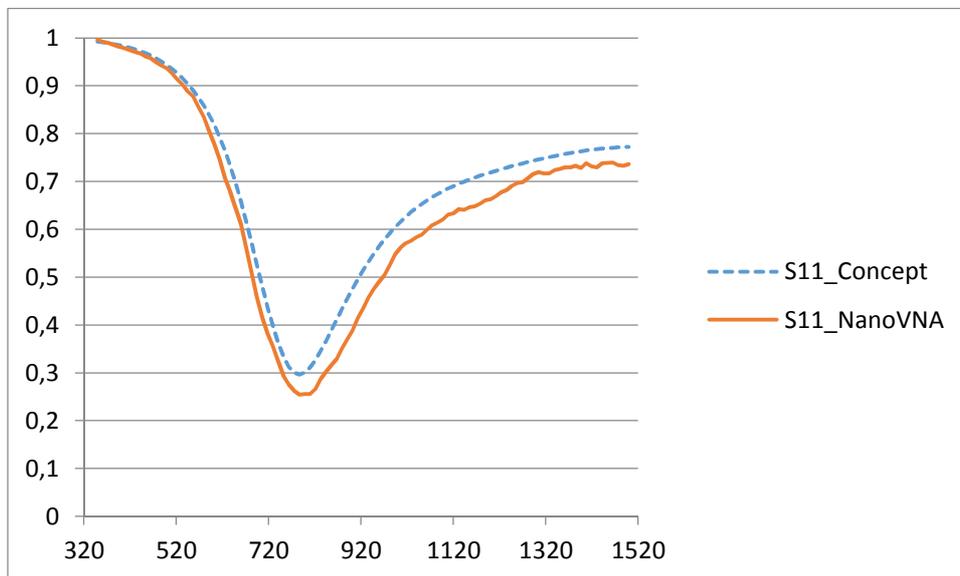


Abbildung 6: Reflexionsfaktor S_{11} der Monopol-Schmetterlingsantenne und Reflexionsfaktor S_{22} des linearen Monopols. Abstand 350 mm.

Da die Reflexionsfaktoren S_{11} und S_{22} für unterschiedliche Antennentypen verschieden sind, werden sie im Weiteren nicht mehr betrachtet. Ziel der Untersuchungen sind wie dargestellt die Transmissionsfaktoren S_{12} und S_{21} .

In Diagramm 7 ist zu sehen, dass die Transmissionsfaktoren S_{12} und S_{21} bei der Kombination des linearen Monopols mit dem Schmetterlings-Monopol identisch sind. Dies galt es zu belegen.

Nun stehen die beiden Monopole, den Messungen geschuldet, recht eng beisammen. Antennen weisen häufig wesentlich größere Distanzen zueinander auf. Daher wurde die gleiche Anordnung nochmals für eine Distanz von 35 km zwischen den Monopolen simuliert. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis. Auch hier wird das Reziprozitätstheorem eingehalten. Der Abstandsfaktor 10.000 findet sich in der Skalierung der y-Achse der Diagramme 7 und 8 wieder.

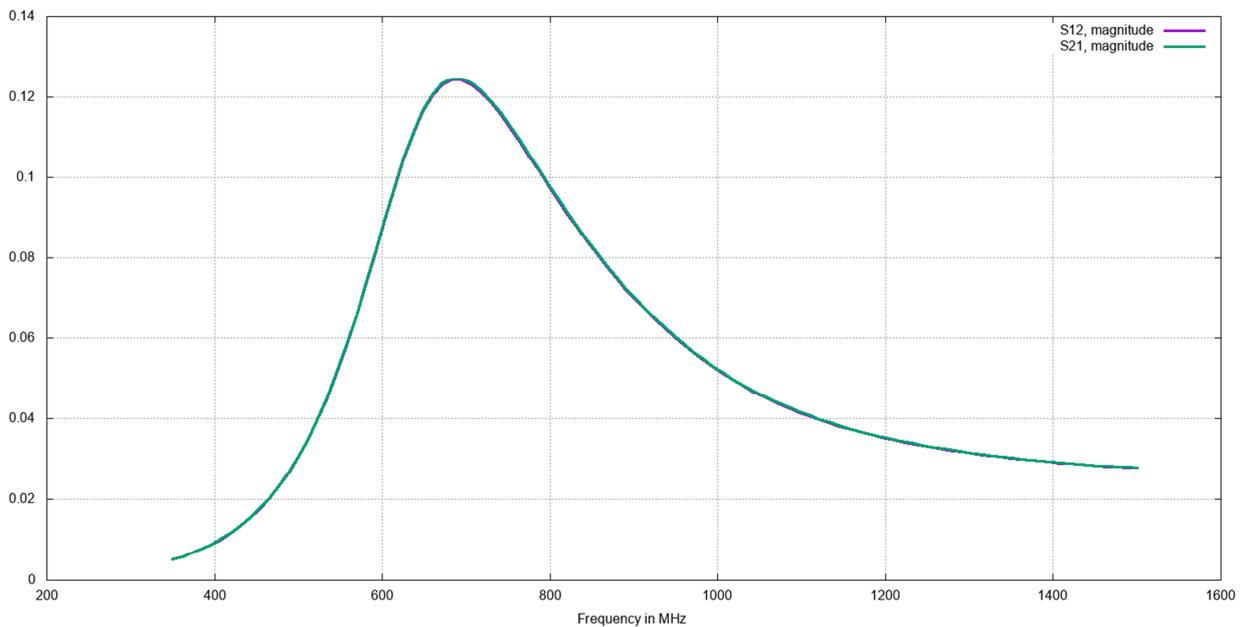


Abbildung 7: Vergleich der Transmissionsfaktoren Monopol-Schmetterlingsantenne S_{12} und linearer Monopol S_{21} . Simulation, Distanz 350 mm.

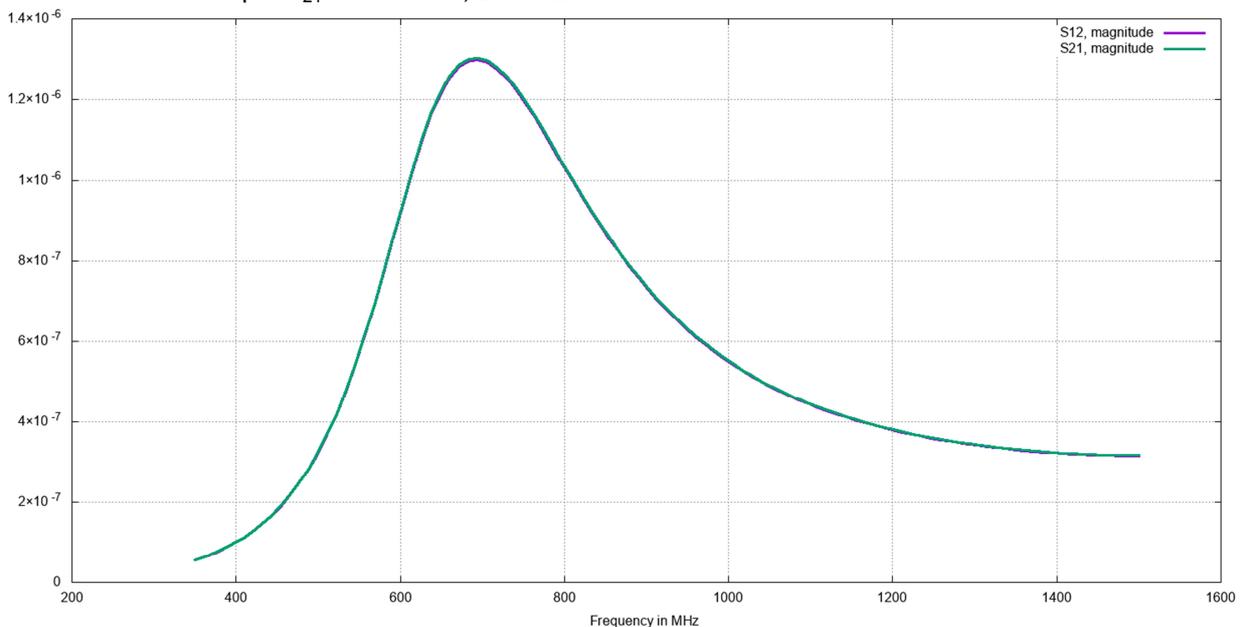


Abbildung 8: Vergleich der Transmissionsfaktoren Monopol-Schmetterlingsantenne S_{12} und linearer Monopol S_{21} . Simulation, Distanz 35 km.

Gilt das Reziprozitätstheorem nun aber auch für sehr geringe Distanzen? Das Ergebnis zeigt das Diagramm in Abbildung 9. Aufgrund des geringen Abstands müsste die Diskretisierung nochmals verfeinert werden. Dann würden die Kurven wieder deckungsgleich sein. Da die Antennen sich im Nahfeld befinden, kann der Abstandsfaktor von 10 zwischen den Ergebnissen gemäß Diagramm 7 und 9 auf die y-Achse hier nicht angewandt werden.

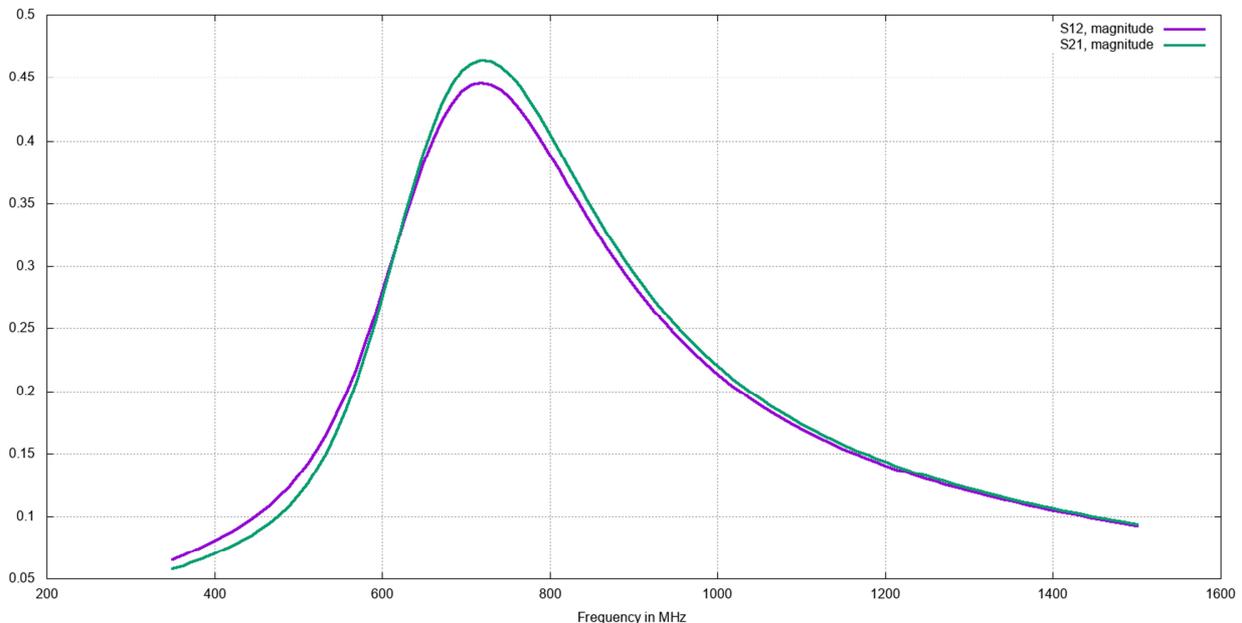


Abbildung 9: Vergleich der Transmissionsfaktoren Monopol-Schmetterlingsantenne S_{12} und linearer Monopol S_{21} . Simulation, Distanz 3,5 mm.

3 Ergebnisse

Im Rahmen einer studentischen Arbeit konnte durch Simulation und Messung belegt werden, dass das Reziprozitätstheorem für Antennen gilt. Dieses besagt, dass die Streuparameter S_{12} und S_{21} (Transmissionsfaktoren) gleich sind, auch wenn die Streuparameter S_{11} und S_{22} (Reflexionsfaktoren) unterschiedlich sind.

Die Messungen konnten nur bei geringer Distanz (350 mm) durchgeführt werden. Der Vergleich von Messung und Simulation hatte aber gezeigt, dass die Simulation die Realität korrekt abbildet. In der üblichen Anwendung von Antennen befinden sich diese jeweils im Fernfeld der anderen Antenne. Simulationen in unterschiedlicher Distanz haben belegt, dass das Reziprozitätstheorem sowohl im Nahfeld, wie auch im Fernfeld von Antennen gilt. Es gilt auch, wenn Antennen verwendet werden, die für unterschiedliche Frequenzbereiche konzipiert sind. Ja, es gilt sogar, wenn eine Struktur eigentlich gar nicht als Antenne vorgesehen ist.

Literatur

- [1] Meinke, Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, N2, 5. Auflage 1992
- [2] <https://nanorfe.com/de/nanovna-v2.html> (zugegriffen 28.09.2023)
- [3] <https://www.tet.tuhh.de/concept/> (zugegriffen 28.09.2023)