



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorarbeit

**Niklas Neujahr**

**Untersuchung einer Hochfrequenzsoftware im Hinblick auf die  
Berechnung von Feldproblemen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Studiendepartment Elektro- und  
Informationstechnik*

*Faculty of Technology and computer science  
Department of Electrical engineering and infor-  
mation technology*

Niklas Neujahr

**Untersuchung einer Hochfrequenzsoftware im Hinblick auf die  
Berechnung von Feldproblemen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik  
am Department Elektro- und Informationstechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. -Ing. Wendel  
Zweitgutachter: Prof. Dr. -Ing. Vollmer

Eingereicht am: 11.04.2024

**Niklas Neujahr**

**Thema der Arbeit**

Untersuchung einer Hochfrequenzsoftware im Hinblick auf die Berechnung von Feldproblemen

**Stichworte**

Simulationssoftware, AWR Microwave Office, Patchantenne, elektromagnetische Felder

**Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit untersucht die Hochfrequenzsoftware AWR Microwave Office in Bezug auf ihre Eignung zur Lösung elektromagnetischer Feldprobleme. Das Hauptziel der Arbeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Software für die Feldproblemlösung aufzuzeigen. Hierzu werden verschiedene Einstellmöglichkeiten der Software detailliert betrachtet und auf wichtige Parameter und ihre Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse eingegangen. Zentraler Bestandteil der Arbeit ist der Design- und Simulationsprozess einer Patchantenne, der als Fallbeispiel dient, um typische Vorgehensweisen und Herausforderungen bei der Nutzung dieser Software zu veranschaulichen. Darüber hinaus werden die Simulationsergebnisse mit einem physischen Nachbau der Antenne verglichen, um die Genauigkeit der Software zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass AWR Microwave Office hohe Genauigkeit bei der Lösung elektromagnetischer Feldprobleme erreichen kann, allerdings mit Herausforderungen bezüglich der Meshkonfiguration und der Rechenzeit konfrontiert ist. Es wird festgestellt, dass auch scheinbar unbedeutende Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit und Effizienz der Simulation haben können.

**Niklas Neujahr**

**Title of the paper**

Investigation of high-frequency software with regard to the calculation of field problems

**Keywords**

Simulationsoftware, AWR Microwave Office, Patchantenna, electromagnetic fields

**Abstract**

This bachelor thesis examines the high-frequency software AWR Microwave Office in terms of its suitability for solving electromagnetic field problems. The main goal of the work is to highlight the capabilities and limitations of the software for field problem solving. To this end, various software configuration options are examined in detail, and key parameters and their effects on the simulation results are discussed. A central part of the work is the design and simulation process of a patch antenna, which serves as a case study to illustrate typical procedures and challenges in using this software. Additionally, the simulation results are compared with a physical replica of the antenna to assess the accuracy of the software. The results show that AWR Microwave Office can achieve high accuracy in solving electromagnetic field problems but faces challenges regarding mesh configuration and computation time. It is observed that even seemingly insignificant parameters can have a significant impact on the accuracy and efficiency of the simulation.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Definitionen . . . . .	1
1.2 Einleitung in das Thema . . . . .	2
1.3 Ziele und Fragestellung der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>5</b>
2.1 Berechnung von Feldproblemen in Software . . . . .	5
2.2 Finite-Elemente-Methode . . . . .	5
2.3 Vorstellung der Simulationssoftware AWR . . . . .	7
<b>3 Simulationssoftware-Einstellungen</b>	<b>15</b>
3.1 Materialien . . . . .	15
3.2 Ports . . . . .	17
3.3 Boundaries . . . . .	22
3.4 Meshing und Konvergenz . . . . .	25
3.4.1 Konvergenzkriterien . . . . .	27
3.4.2 Advanced Mesh Refinement . . . . .	30
3.4.3 Meshingfrequenz . . . . .	32
3.5 Solver . . . . .	34
3.6 Post-processing und Annotationen . . . . .	39
<b>4 Technische Umsetzung und Simulation</b>	<b>44</b>
<b>5 Bewertung</b>	<b>59</b>
5.1 Unterschied Sweepmethoden . . . . .	59
5.2 Unterschiede Basis Funktionen . . . . .	60
5.3 Vergleich der Patchantenne mit physischem Nachbau . . . . .	64
<b>6 Schlussfolgerung mit Ausblick</b>	<b>68</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>Anhang</b>	<b>71</b>

# Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der Simulatoren in AWR Microwave Office. . . . .	8
3.1	Übersicht über Porttypen in AWR Microwave Office. . . . .	21
3.2	Übersicht der Grenzbedingungstypen in elektromagnetischen Simulationen. Adaptiert aus [1]. . . . .	24
3.3	Übersicht der Mesh-Einstellungen in AWR Microwave Office. . . . .	27
3.4	Übersicht der Konvergenzeinstellungen in AWR Microwave Office. . . . .	30
3.5	Übersicht der weiteren Simulationseinstellungen in AWR Microwave Office. . .	36
3.6	Eigenschaften verschiedener Basis-Sets in Analyst. . . . .	38
3.7	Übersicht der verfügbaren Annotationen in AWR Microwave Office. . . . .	40
5.1	Vergleich von GAWE und diskreter Sweepmethode . . . . .	60
5.2	Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Basis Sets . . . . .	62
5.3	Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene adaptive Basis Sets . . .	62

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht über das Standartinterface mit Hervorhebung wichtiger Bestandteile.	9
2.2	Arbeitsflussdiagramm zur Darstellung der nötigen Schritte bis zur ersten Simulation. . . . .	11
2.3	Menü zur Einstellung der Lagen mit 10 mm Luft ober- und unterhalb der Leiterbahndicke und der Substrathöhe mittig. . . . .	12
2.4	Links wurde der Schicht ein Material zugewiesen. Es erstreckt sich bis zu der Simulationsgrenze. Rechts wurde eine Struktur auf einer Lage erstellt, einem Material zugewiesen und es erstreckt sich nicht bis zur Simulationsgrenze . .	13
2.5	Shape Properties, nachdem das gezeichnete Substrat dem Material "Diel" zugeordnet wurde. . . . .	13
2.6	CAD Umgebung des 3D-Editors. . . . .	14
3.1	Einstellungsfenster für die Definition von Materialien in AWR Microwave Office.	16
3.2	Einstellungsfenster für das Anlegen von Materialien, um diese in der Simulationsumgebung zur Verfügung zu stellen. . . . .	17
3.3	Darstellung von Edge und Point Port an einem Leiterstreifen. . . . .	18
3.4	Aufbau eines impliziten Edge Ports. Adaptiert aus [1]. . . . .	19
3.5	Menüfenster für die Portkonfiguration. . . . .	19
3.6	Edge Port mit de-embedding-Bereich. . . . .	20
3.7	Differentialport-Konfiguration mit einer Wechselspannungsquelle und differenziellen Anschlüssen für die Signalanalyse. Adaptiert aus [1]. . . . .	20
3.8	Die Simulationsgrenze ist rot dargestellt. Ebenfalls ist das Gitternetz sichtbar, welches lediglich bis zu dieser Grenze gezogen wird. . . . .	22
3.9	Eine Grenzbedingung wird für die seitliche Grenze ausgewählt. . . . .	23
3.10	Entwicklung der Elementanzahl und des Peak Memorys während des Meshing-Prozesses. . . . .	26
3.11	Entwicklung des Konvergenzverlaufs und der Elementanzahl während des Prozesses . . . . .	29
3.12	Ablauf des Mesh Refinement Prozesses. . . . .	32
3.13	Frequenzgang des Bandpassfilters bei verschiedenen Meshingfrequenzen. . . .	33
3.14	Vergleich der Gitternetze bei unterschiedlichen Meshingfrequenzen. . . . .	33
3.15	Einstellungen für den Solver Analyst. . . . .	34
3.16	S11-Parameter einer Patchantenne für 2,45 GHz. . . . .	41
3.17	Darstellung der Feldvektoren einer Patchantenne in AWR Microwave Office. .	42
3.18	Darstellung der Strahlungscharakteristik der Patchantenne in AWR Microwave Office. . . . .	43

4.1	Technische Zeichnung für die Patchantenne. . . . .	44
4.2	Einstellungen der Enclosure in Rot markiert. Mit dem Menü zur Anpassung verfügbarer Materialien. . . . .	46
4.3	Positionierung des Materials mit einer negativen Dicke. Das Material verläuft unter der zugewiesenen Schicht. . . . .	47
4.4	Fenster zur Eingabe der Koordinaten für eine erstellte Struktur nach Verwendung der Tabulatortaste. . . . .	48
4.5	Eingebettetes Tool "TXLine" zur Berechnung von Streifenleitungen. . . . .	48
4.6	Erstellung des in TXLine berechneten Streifenleiter mit Hilfe der Größenangabe im Koordinatenfenster. . . . .	49
4.7	Erstellung der Aussparung für das Patchelement der Antenne mit Hilfe der Größenangabe im Koordinatenfenster. . . . .	50
4.8	Fertiges Patchelement in angewählter Ansicht. Blaue Punkte dienen als Griffpunkte zum manuellen Verstellen der Kanten. . . . .	51
4.9	Fertige Patchantenne jedoch ohne Dielektrikum und Groundplane. . . . .	51
4.10	Propertie eines Elements. Schicht und Material sind neben der Auswahl als Via oder Conductor auswählbar. . . . .	52
4.11	Fertige Patchantenne mit Groundplane ohne Dielektrikum. . . . .	52
4.12	Eigenschaften des Dielektrikums. Es liegt auf Schicht 3 und ist als Conductor angelegt. . . . .	53
4.13	Arbeitsoberfläche in AWR Microwave Office während der Erstellung einer Simulationsgrenze. Der gelbe Kasten ist ausgewählt und wird in dem Menü "Draw" als Boundary festgelegt. . . . .	53
4.14	Port angelegt an den unteren Teil des Streifenleiters. . . . .	54
4.15	Für den Port wurde "Lumped Down" ausgewählt. Er ist nach unten zu Ground verbunden. . . . .	54
4.16	Fertige Patchantenne mit Groundplane, Dielektrikum und Port in der 3D-Ansicht. . . . .	55
4.17	Erstellung eines neuen Graphen über einen Rechtsklick auf den Ordner "Graphs". . . . .	56
4.18	Anlegen einer neuen Messung über einen Rechtsklick in das Koordinatensystem. . . . .	56
4.19	Darstellung der S11-Parameter der Patchantenne in dB. Die Optik aus AWR Microwave Office wurde hierbei beibehalten, um einen Eindruck zu verschaffen. . . . .	57
4.20	Polargraph, welcher die Strahlungscharakteristik der Patchantenne darstellt. . . . .	57
4.21	Darstellung der Feldvektoren nach Simulation mit der Annotation "EM-FIELD-VEC". . . . .	58
5.1	Frequenzgang des Bandpassfilters mit Sweepmethode GAWE und Auto. Es ist kein Unterschied erkennbar. . . . .	60
5.2	S11 Parameter (dB) eines Bandpassfilters für verschiedene Basisfunktionen . . . . .	61
5.3	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Verwendung der Basisfunktion, welche die höchste Interpolationsstufe bieten. . . . .	63
5.4	Darstellung des Deltas zwischen den Werten der adaptiven Basisfunktion c4.5 und der feststehenden Basisfunktion h4.5. . . . .	64
5.5	Vor- und Rückseite der gefertigten Patchantenne . . . . .	65

5.6	Graphen der simulierten und nachgebauten Patchantenne. . . . .	65
5.7	Strahlungscharakteristik der Patchantenne bei 2.45 GHz in der Simulations- umgebung. . . . .	66
5.8	Strahlungscharakteristik des Nachbaus der Patchantenne bei 2.45 GHz in der Antennenmesskammer bei vertikaler Polarisierung. . . . .	67

# 1 Einführung

## 1.1 Definitionen

### **Mesh**

Ein **Mesh** in dem Kontext der Simulation bezieht sich auf ein Gitternetz, das über ein Simulationsgebiet gelegt wird, um dieses zu diskretisieren. Dieses Netz dient dazu, Strukturen in kleinere, handhabbare Elemente zu zerlegen.

### **Solver**

Ein **Solver** ist ein algorithmisches Werkzeug oder eine Softwarekomponente, die zur Lösung von mathematischen Problemen eingesetzt wird. In dem Kontext der Simulation, insbesondere in der elektromagnetischen Feldsimulation, bezieht sich der Begriff auf die Algorithmen und Methoden, die verwendet werden, um die Gleichungen zu lösen, die das physikalische Verhalten des simulierten Systems beschreiben.

### **EM Struktur**

In AWR Microwave Office beschreibt die EM Struktur ein volumetrisches Objekt, welches auf seine elektrischen Eigenschaften geprüft wird. Die Simulation wird zur Lösung des Feldproblems auf eine solche Struktur angewandt.

### **CAD**

CAD (Computer-Aided Design) bezeichnet den computergestützten Prozess des technischen Entwerfens von Komponenten und bietet eine Umgebung, um diese zu zeichnen und zu modellieren.

## 1.2 Einleitung in das Thema

Mit neuen Anwendungen im Bereich der Hochfrequenztechnik, insbesondere für Antennen und Mikrowellenkomponenten, steigt das Interesse der Industrie elektromagnetische Felder zu simulieren, um Aussagen zur Effektivität, Optimierungsmöglichkeiten und Funktionalität treffen zu können. Auch regulative wie beispielsweise einschlägige Normen aus dem Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit müssen von der Industrie eingehalten werden und sind ein Anwendungsgebiet für Simulationen [2].

Mit einer Simulation können verschiedene Faktoren wie Strahlungscharakteristik, Oberflächenströme und Streuparameter ermittelt werden. Hierfür gibt es verschiedene Simulationssoftware wie CST oder HFSS, welche bereits diese Möglichkeiten bieten. Die Funktion elektromagnetische Feldprobleme lösen zu können, gewinnt stark an Relevanz, sodass diese Möglichkeiten auch in bestehende Software eingearbeitet werden [3]. Ebenfalls interessant ist die Software AWR Microwave Office aus dem Bereich der Hochfrequenztechnik, welche dem Benutzer erst seit späteren Versionen die Möglichkeit bietet, elektromagnetische Feldprobleme zu lösen.

AWR Microwave Office zeichnet sich durch seine Vielseitigkeit aus, da es nicht nur ein Tool für die Berechnung von Feldproblemen bietet, sondern auch die Simulation von Schaltungen und Mikrowellenkomponenten ermöglicht [1]. Die Notwendigkeit mehrere spezialisierte Softwaretools für individuelle Simulationsanforderungen zu nutzen entfällt und kann von AWR Microwave Office breitflächig abgedeckt werden.

Je nach vorhandenen Möglichkeiten erfolgt die Implementierung der Designumgebung auf unterschiedliche Weise. Die Hochfrequenzsoftware CST bietet eine Umgebung, die typisch für das rechnergestützte Konstruieren, bekannt als CAD (Computer-Aided Design), ist [4]. AWR Microwave Office ermöglicht den Aufbau auf verschiedenen vom Nutzer definierten Lagen, einem sogenannten Stackup und verfügt zudem über eine Zeichenumgebung für 3D-Strukturen, die eine CAD-Umgebung bietet [1]. Dies ist nur ein Beispiel für die Unterschiede moderner Simulationssoftware.

Die Software AWR Microwave Office bietet diverse Möglichkeiten für die Simulation von ganzen Platinenlayouts bis zu einzelnen Komponenten im Hochfrequenzbereich, mit Hilfe verschiedener Solver, welche Lösungsverfahren für die zu berechnenden Feldprobleme darstellen [1]. Diese können teilweise auch als Solver für zweidimensionale Feldprobleme verwendet werden, scheitern jedoch, wenn es um die Darstellung von Feldvektoren oder Wellenausbreitung im Fernfeld geht [1]. Bei dem Solver "Analyst" handelt es sich um den von Cadence ausgewiesene 3D Finite-Elemente-Solver, welcher für dreidimensionale Feldprobleme entwickelt wurde und in dieser Arbeit mitunter untersucht wird [1].

Diese Arbeit untersucht, wie die Feldberechnung mit der Simulationssoftware AWR Microwave Office funktioniert und basiert hauptsächlich auf einer explorativen Analyse. Um diese Frage beantworten zu können, koordiniert diese Arbeit durch verfügbare Einstellung, die Modellierung einer elektromagnetischen Struktur und Möglichkeiten in Bezug auf Rechenzeit. Felddarstellungen sind hierbei nur ein Teil zur Beantwortung dieser Frage. Es sind Optionen für das Anlegen von Materialien, die Behandlung von Simulationsgrenzen und das Meshing zu beachten, um eine Aussage über die Möglichkeiten zu treffen, welche diese Software bietet.

Neben der Untersuchung verfügbarer Einstellungen und ihrer Auswirkungen auf die Simulationsperformance, wird ein direkter Vergleich gezogen, indem eine Patchantenne für 2.45 GHz simuliert und die Simulationsergebnisse mit dem physischen Nachbau verglichen werden. Die Patchantenne wird dazu in einer Antennenmesskabine vermessen.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die Ergebnisse und Einstellmöglichkeiten diskutiert, welches helfen soll, die Möglichkeiten von AWR Microwave Office zu verstehen. Es werden Auswertungen zugrunde der Simulationszeit, Rechenressourcen und Genauigkeit der Simulationsergebnisse vorgenommen. Hierbei muss auch die Benutzerfreundlichkeit betrachtet werden, da die Dauer des Designprozesses unmittelbar mit dieser zusammenhängt.

### 1.3 Ziele und Fragestellung der Arbeit

Mit neuen Funktionen von Simulationssoftware im Bereich der Elektrotechnik werden steigende Qualitätsansprüche von Kunden an diese gestellt. Auch wenn es sich hierbei um Software handelt, welche sich an professionelle Anwender richtet, sind gute Bedienbarkeit und vielfältige Einstellungsmöglichkeiten gefordert, um Analysemethoden an das zu simulierende Problem anzupassen. Die Hochfrequenzsoftware AWR Microwave Office stellt sich in ihren Anwendungsfeldern breit auf und bietet verschiedene Lösungsalgorithmen zum Simulieren von elektromagnetischen Feldern. Neben der Simulation von planaren Strukturen sind Solver zum Lösen volumetrischer Strukturen implementiert. Neben dem Standardeditor bietet AWR Microwave Office eine 3D-Zeichenumgebung, welche die Bedienoberfläche einer typischen CAD-Umgebung aufweist. In dieser Arbeit wird die Hochfrequenzsoftware AWR Microwave Office auf Einstellmöglichkeiten und das Arbeiten mit dieser Umgebung untersucht. Hierzu sollen die in der Software bestehenden Möglichkeiten zu der Materialeinbindung, den Aufbau von EM Strukturen und den Porteeinstellungen aufgezeigt werden. Ebenfalls untersucht werden Einstellungen, welche sich kritisch auf die Simulationsergebnisse auswirken. Hierbei wird auf Grenzbedingungen, Einstellungen des Solvers und die Diskretisierung des Raumes mit Hilfe eines Gitternetzes eingegangen. Ein weiterer wichtiger Faktor hierbei ist ein Verständnis

für das Konvergenzkriterium. Nach Umsetzung einer Simulation anhand einer Patchantenne werden kritische Einstellungen diskutiert. Diese wirken sich auf Genauigkeit, Rechenressourcen und Simulationsdauer aus, sind also für eine genaue Berechnung des Feldproblems unter dem Aspekt der Effizienz wichtig. Diese Arbeit wird die genannten Optionen, welche AWR Microwave Office dem Anwender überlässt, erläutern und die Auswirkung dieser auf die Simulationserfahrung darstellen. Ziel ist es, dem Leser einen Eindruck auf die bestehenden Möglichkeiten unter Verwendung des Solvers Analyst zu bieten, wodurch sich dieser einen Überblick über die Handhabung der Software AWR Microwave Office schaffen kann.

Neben der Erklärung bestehender Funktionen und Einstellmöglichkeiten konzentriert sich diese Arbeit auf die Fragen, die es ermöglichen, tiefere Einblicke in die Funktionalität von Solvern für volumetrische Feldprobleme, wie Analyst, zu gewähren. Zentrale Fragestellungen dieser Arbeit lauten:

1. Wie funktioniert die Simulation elektromagnetischer Felder in AWR Microwave Office und welche Rolle spielen dabei die Solver und ihre spezifischen Einstellungen?
2. Welche Möglichkeiten bietet die Software in Bezug auf die Anpassung von Materialien, Grenzbedingungen und Gitternetzen und wie beeinflussen diese Einstellungen das Simulationsergebnis?
3. Inwiefern tragen spezifische Einstellungen, wie das Konvergenzkriterium und die Auswahl des Meshing-Verfahrens, zur Genauigkeit und Effizienz der Simulation bei?

Durch die Beantwortung dieser Fragen erläutert die Arbeit die komplexen Interaktionen zwischen den verschiedenen Einstellungen und ihren Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Es soll ein umfassendes Verständnis der Simulationsprozesse in AWR Microwave Office geschaffen werden und praxisnahe Empfehlungen für die Nutzung der Software sollen geboten werden.

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Berechnung von Feldproblemen in Software

Die Aufgabe elektromagnetischer Felder in Simulationssoftware zu berechnen und das Feldproblem darstellbar zu machen, kann in mehrere Schritte unterteilt werden. Hierbei bilden Diskretisierung mit Hilfe eines Gitternetzes, die Charakterisierung der Ports und die Lösung der Streumatrix Arbeitsblöcke, welche in einer Simulation abgearbeitet werden.

Der Ablauf hierbei kann entsprechend durch Änderungen am Lösungsalgorithmus abweichen. Hierbei wird zunächst der Port diskretisiert und dieser Vorgang nach Erreichen einer Konvergenz des Wellenwiderstands beendet. Eine Diskretisierung des Raumvolumens findet statt und ist ebenfalls fertiggestellt, nachdem das Konvergenzkriterium für die Streuparameter erreicht ist. Diese Abläufe zur Diskretisierung werden durch den Algorithmus des „Advanced Mesh Refinement“ bestimmt. Auswirkung auf die Genauigkeit hierbei hat die Meshingfrequenz, für welche die entsprechenden Streuparameter und Wellenwiderstand ermittelt werden. Nachdem die Diskretisierung abgeschlossen ist, wird das Feldproblem mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode gelöst.

### 2.2 Finite-Elemente-Methode

Als erster Schritt in dieser Berechnungsmethode wird das Raumvolumen unterteilt, um das Feldproblem in Teilprobleme zu überführen. Hierzu sind Algorithmen wie „Advanced Mesh Refinement“ implementiert, um eine für das Konvergenzkriterium hinreichende Aufteilung in Finite-Elemente vorzunehmen. Nachdem der Raum auf das Konvergenzkriterium passend diskretisiert wurde, werden die Maxwell-Gleichungen für jede Zelle definiert. Die Formulierungen berücksichtigen die zeitliche Änderung der Felder und werden in Form von partiellen Differentialgleichungen für jedes Element ausgedrückt. Hierbei werden diese für die Berücksichtigung von Materialparametern und Randbedingungen modifiziert [5].

Die Maxwell-Gleichungen in Differentialform lauten:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

wobei  $\mathbf{E}$  die elektrische Feldstärke,  $\mathbf{B}$  die magnetische Flussdichte,  $\mathbf{H}$  die magnetische Feldstärke,  $\mathbf{J}$  die Stromdichte,  $\mathbf{D}$  die elektrische Flussdichte und  $\rho$  die elektrische Ladungsdichte darstellen.

Um das Problem für jedes Element approximieren zu können, werden Shape Funktionen verwendet, welche Interpolationspolynome sind [5]. Die Aufgabe dieser liegt darin, das Verhalten des Feldes für jedes Element anhand der bekannten Knotenpunkte zu nähern, um aus einer diskreten Lösung eine kontinuierlich darstellbare zu machen [5]. Außerhalb des Meshelements sind diese Funktionen null.

Beispielsweise wird das elektrische Feld  $\mathbf{E}$  in einem Element durch eine Linearkombination dieser Funktionen dargestellt:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \mathbf{E}_i \quad (2.5)$$

wobei  $N_i$  die Shape Funktionen und  $\mathbf{E}_i$  die Knotenwerte des elektrischen Feldes sind. Anschließend wird ein Gesamtsystem von Gleichungen für die gesamte Struktur erstellt.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.6)$$

Hierbei ist  $\mathbf{A}$  die Systemmatrix, welche durch Koeffizienten die Feldgrößen an Kanten oder Knoten beschreibt,  $\mathbf{x}$  der Lösungsvektor, der die unbekanntes Feldwerte enthält, die berechnet werden sollen, und  $\mathbf{b}$  der Quelltermvektor, der Werte aus Quellen wie elektrische Ladungen, Ströme oder vorgegebene Feldstärken enthält und somit die Anregung des Systems repräsentiert.

Das Gleichungssystem wird numerisch gelöst. Die Lösung liefert die Werte der elektromagnetischen Felder der finiten Elemente.

### 2.3 Vorstellung der Simulationssoftware AWR

AWR Microwave Office von Cadence Design Systems ist eine umfassende Softwarelösung, die in der Elektrotechnik für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt wird. Sie findet in der Industrie Anwendung für die Simulation und Analyse von Mikrowellenkomponenten, Schaltkreisen und Feldberechnungen. Mit der Implementierung von Analysetools für thermische Prozesse wurde die Software auch für andere Fachbereiche erweitert und versucht ein breites Feld von Kunden abzudecken. In dieser Software können Nutzer komplexe Fragestellungen der Elektrotechnik angehen. Dies umfasst die Simulation von Schaltkreisen, die Optimierung von Komponentenparameter, wie etwa für Filterschaltungen und das Design ganzer Platinenlayouts. Hierbei hervorzuheben ist die Fähigkeit der Software, Modellierung in einer zweidimensionalen Umgebung auf Basis verschiedener Lagen zu ermöglichen, doch auch die Modellierung von volumetrische Strukturen im 3D-Editor zu ermöglichen.

Neben bestehender Designmöglichkeiten bietet die Software Analysetools, welche nach der Simulation Datensätze für das Post-Processing bereitstellt. Hierbei bilden Streumatrizen, Strahlungscharakteristiken und Felddarstellungen nur wenige Möglichkeiten, welche zu einer Aussage der Funktionalität beitragen.

AWR Microwave Office bietet eine einheitliche Bedienoberfläche für alle zu untersuchenden Probleme. Vor dem Modellierungsprozess einer EM-Struktur wird eines der Lösungsverfahren ausgewählt, wobei diese unterschiedlichen Schwerpunkte für verschiedene Simulationen bieten. Die asynchrone Eigenschaft der Simulatoren bedeutet hierbei, dass die Simulation nicht in der Hauptsoftware stattfindet und eine Simulation die Arbeit des Nutzers nicht beeinträchtigt [1]. Eine Auflistung der Simulatoren befindet sich in anstehender Tabelle 2.1.

<b>Simulator</b>	<b>Beschreibung</b>
Axiem	Asynchroner Method of Moments Simulator. Entwickelt für die Analyse planarer Strukturen
Analyst	Asynchroner 3D FEM Simulator. Geeignet für die umfassende Analyse dreidimensionaler Strukturen.
Clarity 3D Solver	Elektromagnetischer Solver, asynchron. Für detaillierte 3D elektromagnetische Feldanalysen.
EMX Planar 3D Solver	Asynchroner elektromagnetischer Solver. Fokussiert auf die Simulation von planaren 3D-Strukturen.
Celsius Thermal Solver	Thermischer Solver, asynchron. Zur Analyse und Simulation thermischer Effekte.
ACE Automated Circuit Extractor	Simulation mehrlagiger Leiterbahnen und Schaltkreise.
EMSight Simulator	Ermöglicht die elektromagnetische Simulation von 2.5D-Strukturen. Besonders geeignet für planare und leicht dreidimensionale Strukturen.

Tabelle 2.1: Übersicht der Simulatoren in AWR Microwave Office.

Das Benutzerinterface der Hauptsoftware ist hierbei, intuitiv und übersichtlich gestaltet.

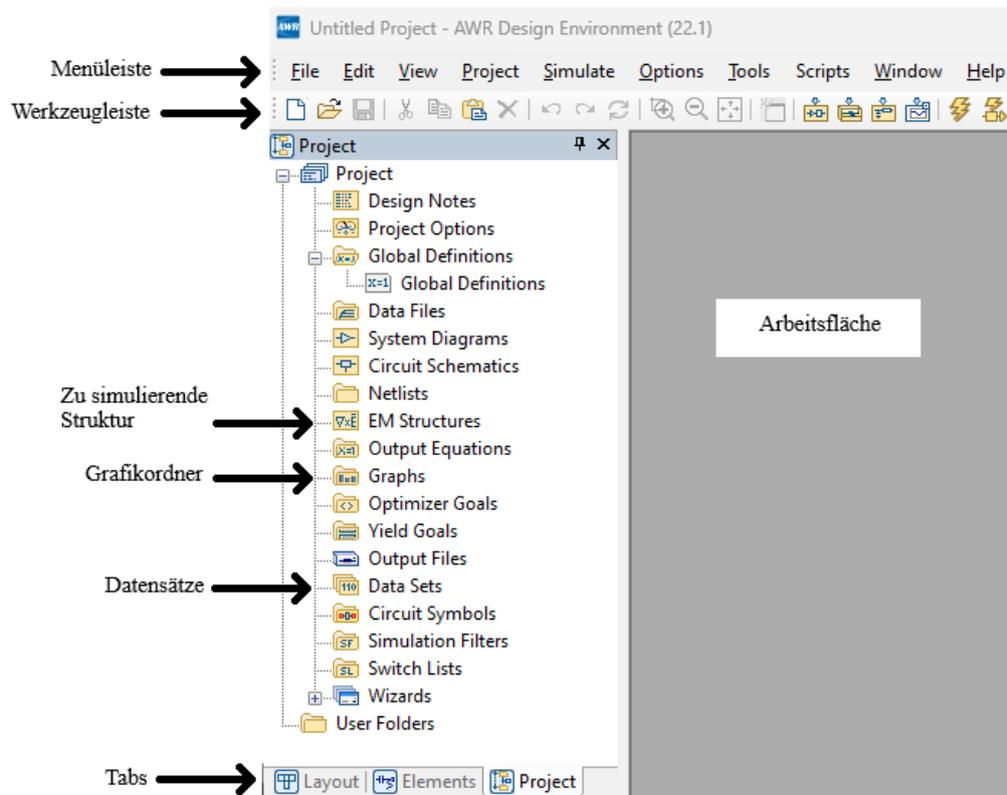


Abbildung 2.1: Übersicht über das Standardinterface mit Hervorhebung wichtiger Bestandteile.

Wie in der Abbildung 2.1 sichtbar, befinden sich standardmäßig die Menüleiste und Werkzeugleiste im oberen Abschnitt des Fensters. In der Werkzeugleiste befinden sich Optionen zum Einfügen von Schaltkreisen, doch auch der Start der Simulation findet hier Platz. Wenn in den unteren Tabs der Projektreiter ausgewählt ist, sind Ordner wie "Project Options", "Datensätze" und Grafiken sichtbar. Die Strukturen bzw. Objekte für die Feldberechnung befinden sich in dem Ordner "EM Structures". Nach erfolgreicher Simulation werden die Datensätze zur eventuellen Weiterverarbeitung in den "Data Sets" Ordner zur Verfügung gestellt. In den "Grafikordner" können beliebige Grafiken wie Smithcharts, Rectangular, Antenna Plots, polare Grafiken als auch 3D Plots erstellt werden. Mit dem Reiter "Layout" können verschiedene Lagen im Designprozess ein- und ausgeblendet werden. In dem Reiter "Elements" stehen verschiedene Bauteile zur Verfügung, wobei aufgrund der von AWR gepflegten Libraries viele weitverbreitete Bauteile von verschiedenen Herstellern zur Verfügung stehen. Bauteile können von dort aus in die Arbeitsfläche gezogen werden. Die unteren Tabs sind während des Designprozesses frei anwählbar, um eine flexible Arbeitsweise zu gewährleisten.

## *2 Theoretischer Hintergrund*

---

Das anstehende Arbeitsflussdiagramm soll helfen, die standardmäßigen Schritte zur Erstellung einer Struktur bis zur ersten Simulation zu verstehen.

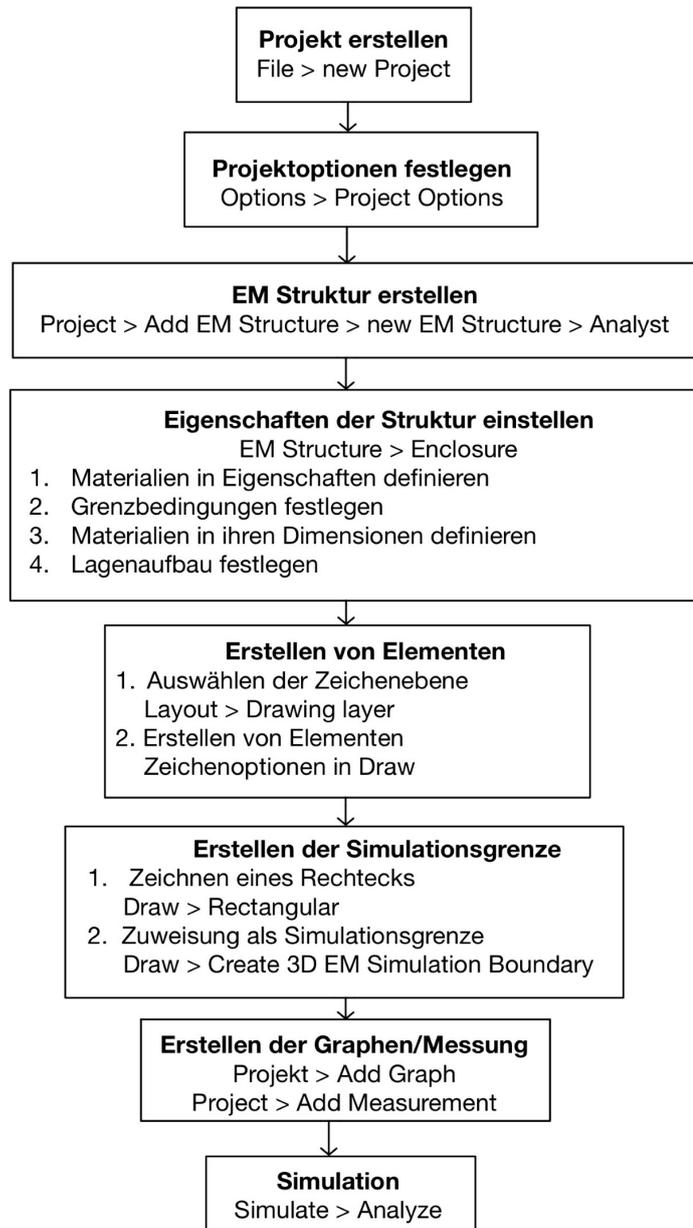
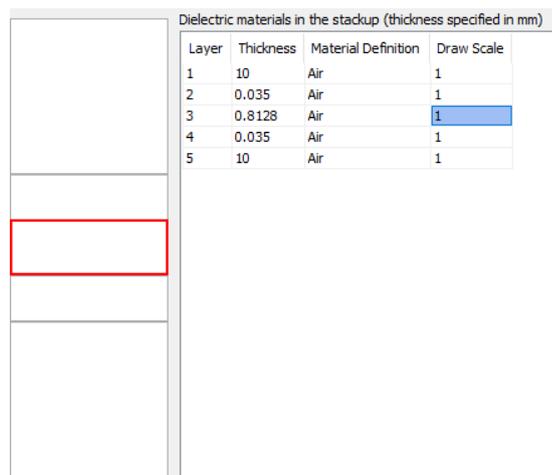


Abbildung 2.2: Arbeitsflussdiagramm zur Darstellung der nötigen Schritte bis zur ersten Simulation.

In AWR Microwave Office wird mit Hilfe vom Benutzer festgelegter Lagen die Struktur erstellt, welche später simuliert werden soll. So werden in den Materialdefinitionen lediglich elektrische Eigenschaften definiert. Unter Materials werden diese dann in ihrer Dicke beschrieben. Ein einfaches Beispiel für den Lagenaufbau einer einfachen Platine mit einer Substrathöhe und einer Leiterbahndicke, wobei die Groundplane ebenfalls dieser Leiterbahndicke entspricht, ist in folgender Abbildung gegeben. Hierbei ist die Platine von beiden Seiten mit 10 mm Luft umgeben.



Layer	Thickness	Material Definition	Draw Scale
1	10	Air	1
2	0.035	Air	1
3	0.8128	Air	1
4	0.035	Air	1
5	10	Air	1

Abbildung 2.3: Menü zur Einstellung der Lagen mit 10 mm Luft ober- und unterhalb der Leiterbahndicke und der Substrathöhe mittig.

Es werden in diesem Beispiel alle Lagen als Luft angegeben, da sich gewählte Materialien sonst automatisch bis zu der Simulationsgrenze ausbreiten und in ihrer Dimension nicht mehr regulierbar sind. Über Auswählen der Zeichenebene, kann zwischen den verschiedenen Lagen gewechselt werden. Wenn in dem gezeigten Beispiel das Substrat eingefügt werden soll, geschieht dies, indem die Zeichenebene 4 ausgewählt und ein Rechteck gezogen wird, welches der Breite und Länge des Substrates entspricht. Es wird die Zeichenebene 4 ausgewählt, da in der Lagenansicht das Substrat auf diese Ebene aufgelegt wird. Die Höhe dieses Rechtecks entspricht dem zugewiesenen Material, ist also durch die Angaben in den "Materials" bedingt, da dort die Höhe angegeben wird. Eine Materialzuweisung kann über die Option Shape Properties erfolgen, welche über einen Rechtsklick auf die Struktur erscheint.

Der erzielte Effekt, wenn eine Lage eine Materialzuweisung erhält oder dieses als Struktur mit zugewiesenen Materialeigenschaften gezeichnet wird, ist in der nachstehenden Abbildung sichtbar.

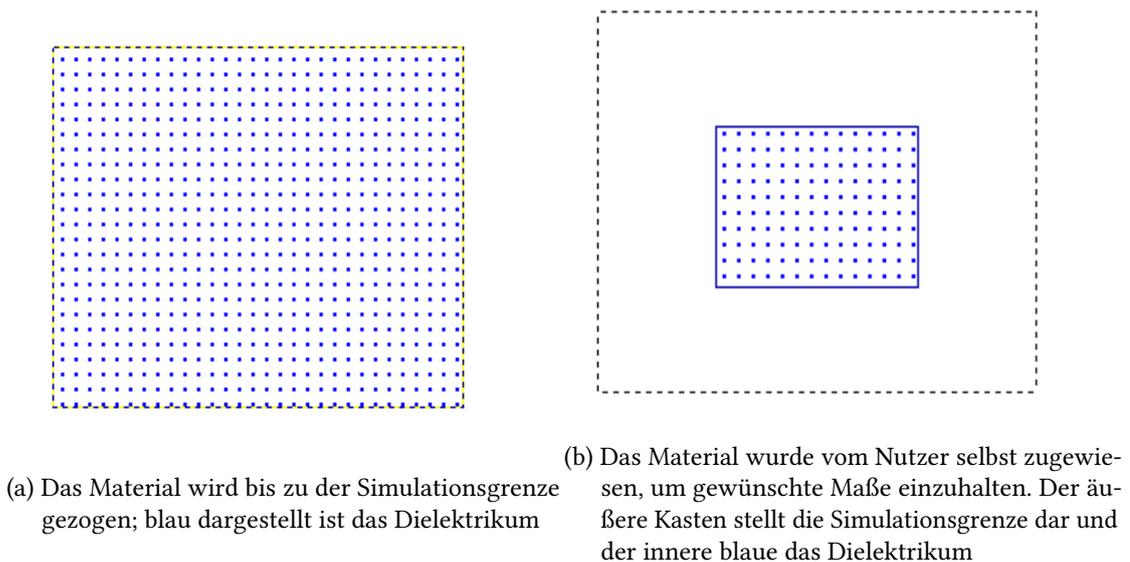


Abbildung 2.4: Links wurde der Schicht ein Material zugewiesen. Es erstreckt sich bis zu der Simulationsgrenze. Rechts wurde eine Struktur auf einer Lage erstellt, einem Material zugewiesen und es erstreckt sich nicht bis zur Simulationsgrenze

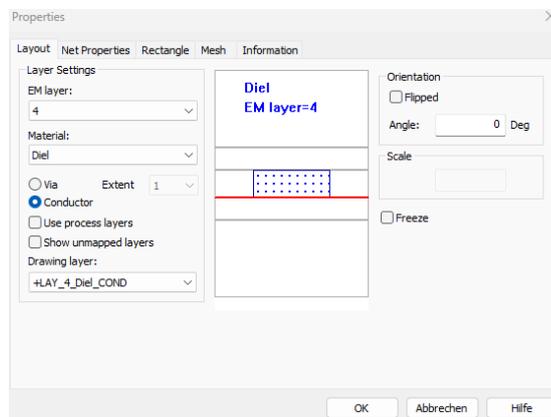


Abbildung 2.5: Shape Properties, nachdem das gezeichnete Substrat dem Material “Diel“ zugeordnet wurde.

Um volumetrische Objekte zu modellieren, kann nach Erstellen einer neuen Struktur über **Rechtsklick > Open in 3D-Editor** eine CAD-Umgebung geöffnet werden. In dieser Umgebung stehen Materialien zur Verfügung, welche zuvor in AWR Microwave Office unter der **Enclosure** angelegt wurden [1].

## 2 Theoretischer Hintergrund

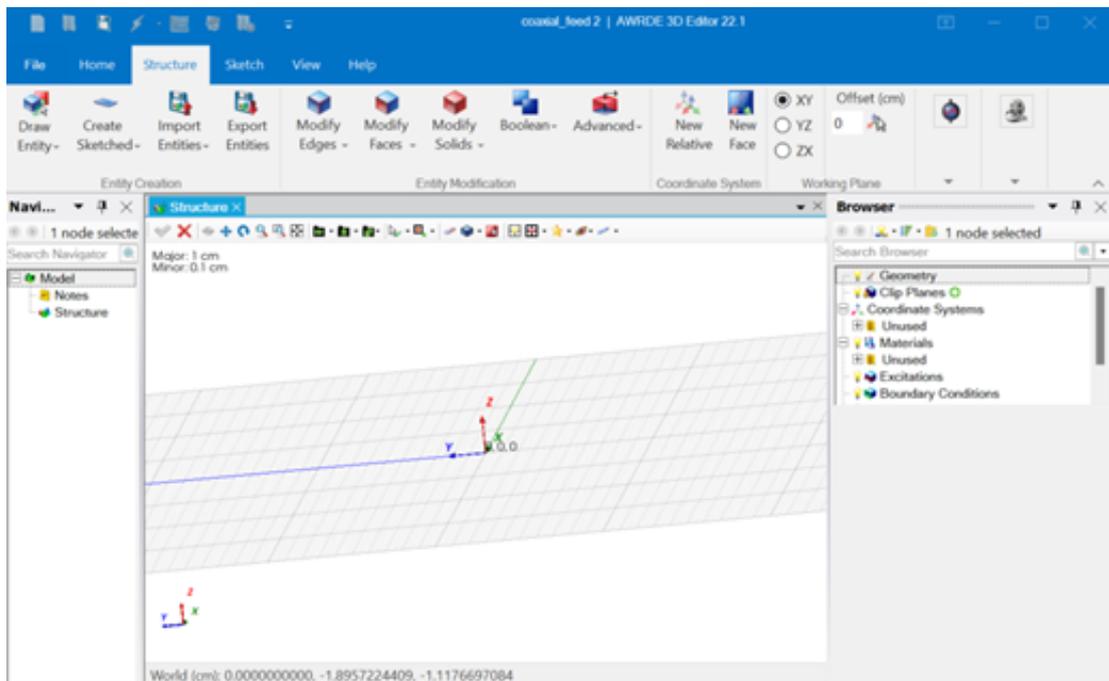


Abbildung 2.6: CAD Umgebung des 3D-Editors.

Hierbei sind über oben angelegte Reiter, Funktionen zum Modifizieren der Formen verfügbar. Neben geometrischen Formen, welche der Erstellung von Elementen dienen, können Elemente über boolesche Funktionen bearbeitet werden.

Über **Draw > Add Subcircuit** kann eine in dem 3D-Editor erstellte Struktur in die Standardarbeitsfläche hinzugefügt werden. So können über den standard Editor die planaren Strukturen, wie Platinschichten, modelliert werden und über den 3D-Editor Bauteile, wie Koaxialstecker, eingefügt werden. Beide Editoren vereint bilden hierbei die Möglichkeiten komplexe Strukturen zu modellieren und sie für eine Simulation vorzubereiten.

## 3 Simulationssoftware-Einstellungen

Neben dem Solver AXIEM steht in AWR Microwave Office der Analyst Solver zur Verfügung. Dieser bietet im direkten Vergleich einige Vorteile und wird auch von Cadence als Solver für volumetrische Feldprobleme angegeben. Axiem hingegen ist für planare Feldprobleme geeignet [1].

Analyst bietet als Solver Vorteile, wie die Verfügbarkeit von Waveports, welche für die Simulation von Antennen von Interesse sind. Ebenfalls ist Analyst für dreidimensionale Strukturen geeignet, da das Gesamtvolumen bis zur Grenzbedingung diskretisiert wird. Auch Leiterstreifen und komplexere Strukturen können in ihrem Volumen feiner diskretisiert werden, um beispielsweise den Skin-Effekt genauer zu berücksichtigen.

In den folgenden Kapiteln wird auf verschiedene Aspekte eingegangen die AWR Microwave Office bietet und die einen Einfluss auf die Lösung des Feldproblems haben. Hierzu werden nicht nur Möglichkeiten bezüglich Materialien aufgezeigt, sondern auch Einstellungen für Grenzbedingungen, Solver und Ports beschrieben. Die Diskretisierung des Volumens mit Hilfe eines Gitternetzes und Konvergenzbedingungen bilden eine wichtige Komponente, wenn es auf die Genauigkeit der Simulation ankommt und werden ebenfalls erläutert.

### 3.1 Materialien

In AWR Microwave Office werden Nutzern vielfältige Möglichkeiten geboten eigene Materialien zu integrieren. Nachdem eine EM Struktur angelegt wurde, sind zunächst grundsätzliche Einstellungen dieser vorzunehmen. Unter anderem werden hierbei gewünschte Materialien definiert und im Anschluss in ihrer Dimension beschrieben.

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, können über die nebenstehenden Schaltflächen Materialien in der Kategorie Dielektrikum, Leiter oder Impedanzen angelegt oder gelöscht werden. Auch eine erweiterte Einstellmöglichkeit ist vorhanden, welche die Materialien in ihren dreidimensionalen Eigenschaften beschreibt. Dabei erfolgt die Angabe von Dielektrizitätskonstante, Permeabilität oder Bulk Conductivity in verschiedene Raumrichtungen. Es wird zum Hinzufügen eines neuen Dielektrikums zunächst nach der relativen Permeabilität, Name und den Verlusten  $\tan(\delta)$  gefragt. Über die Schaltfläche „Advanced“ können noch magnetische Eigenschaften

konfiguriert werden. Für das Hinzufügen eines neuen Leitermaterials muss lediglich Name und Leitwert angegeben werden. Ein Widerstandsmaterial kann mit Hilfe des Widerstands im niederfrequenten Bereich, dem Verlustkoeffizienten im hochfrequenten Bereich und der Oberflächenreaktanz, beschrieben werden.

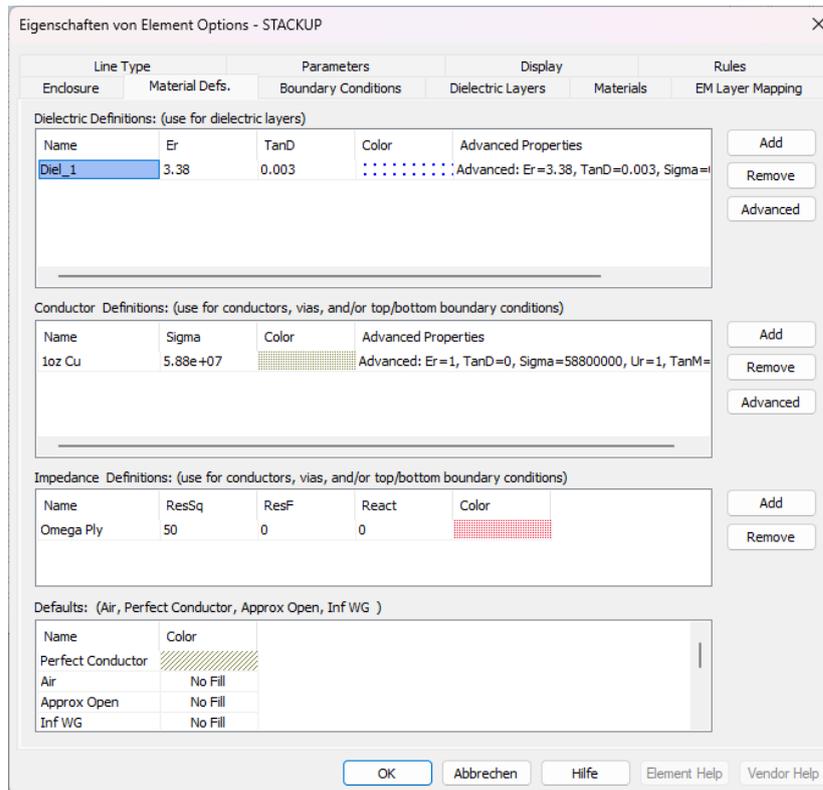


Abbildung 3.1: Einstellungsfenster für die Definition von Materialien in AWR Microwave Office.

Nach der Materialdefinition erfolgt die Spezifikation der Dimensionen im Fenster "Materials". Das Hinzufügen oder Löschen von Materialien geschieht erneut über die nebenstehenden Schaltflächen. Durch das Auswählen einer Zelle können die darin enthaltenen Werte verändert werden. Die Dicke eines Materials wird hierbei mit Übereinstimmung der globalen Einheiten angegeben. Nachdem ein Name und die Dicke des Materials angegeben ist, erfolgt die Materialzuweisung. Der Wert in der Zelle "Roughness" entspricht der effektiven Oberflächenrauheit und stellt eine wichtige Information für absichtlich angeraute Oberflächen dar, da diese bei Berechnung im Hochfrequenzbereich aufgrund des Skin-Effektes zu berücksichtigen ist. Die Option "Solve Inside" ermöglicht ebenfalls ein feineres Gitternetz innerhalb des Materials, um die Genauigkeit bezüglich des Skin-Effektes zu erhöhen.

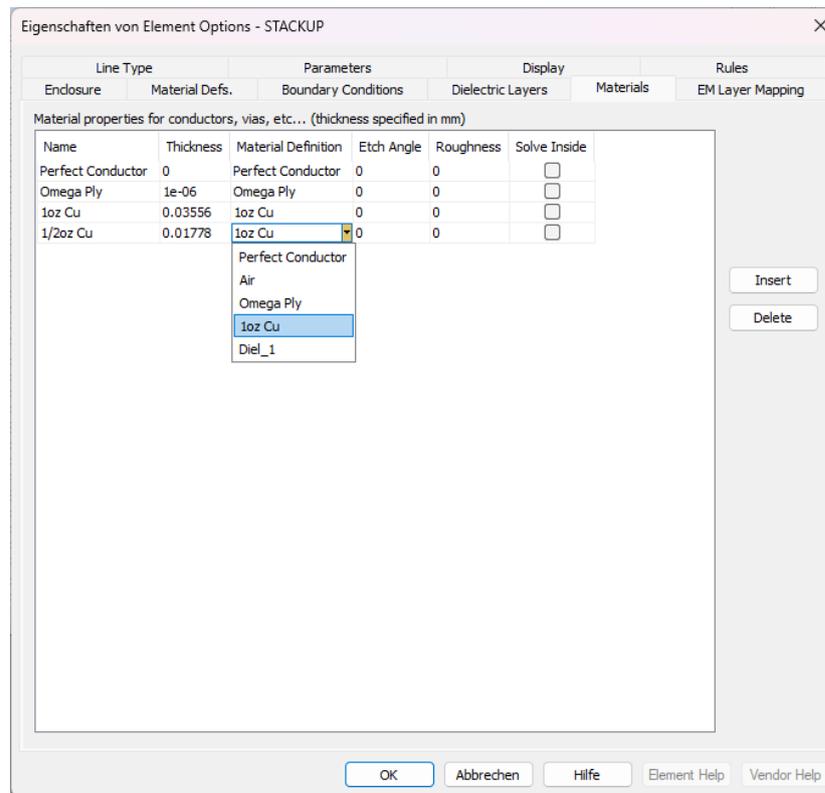


Abbildung 3.2: Einstellungsfenster für das Anlegen von Materialien, um diese in der Simulationsumgebung zur Verfügung zu stellen.

Nur wenn ein Material in dem Reiter Materials hinzugefügt worden ist, wird dieses in der Modelationsumgebung zur Verfügung stehen. Die Angabe der Dicke stützt sich auf der Vorgehensweise, das System in einer zweidimensionalen Draufsicht zu zeichnen, während andere Simulationstools wie CST Studio Suite einen CAD-Modellierungsansatz verfolgen, in welchem ohnehin die Dimensionen in jede Richtung angegeben werden müssen [4].

## 3.2 Ports

Um die modellierten Systeme anzuregen, werden Ports an diese angelegt, welche als Schnittstelle für Input und Output dienen. AWR Microwave Office bietet in der Simulationsumgebung eine Auswahlmöglichkeit an Ports, welche an die Struktur angelegt werden können. Hierbei gibt es Möglichkeiten, die Platzierung der Ports zu steuern und durch Funktionen wie de-embedding, Edge Ports und Point Ports die Genauigkeit und Relevanz der Simulation zu erhöhen.

Über die Werkzeugleiste oder über das Zeichenmenü können Ports ausgewählt und an die Struk-

tur gelegt werden. Hierbei muss zunächst zwischen Edge Ports und Point Ports unterschieden werden.



(a) Leiterstreifen mit einem Edge Port.

(b) Leiterstreifen mit einem Point Port.

Abbildung 3.3: Darstellung von Edge und Point Port an einem Leiterstreifen.

**Point Ports** werden in das Zentrum einer leitenden Struktur gelegt. Sie stellen punktförmige Anschlüsse in kleinen Bereichen der Schaltung dar. Dies ist vergleichbar mit Anschlusspunkten von diskreten Bauelementen.

**Edge Ports** werden an Ränder von Übertragungsleitungen oder an Kanten von flachen Strukturen wie Streifenleiter gelegt. Diese eignen sich für Simulation von Leitungseigenschaften und Interaktion mit anderen naheliegenden Leitungen. Implizite Edge Ports haben hierbei keinen direkten Bezug zu einer Massefläche und definieren sich in Bezug auf Spannung und Strom. Die Spannung wird dabei vom Rand, an dem der Port platziert ist, bis zu einer unendlich ausgedehnten Masseebene definiert. Dies funktioniert insbesondere bei niedrigen Frequenzen, da diese Definition unabhängig vom Pfad ist. Um dispersive Effekte zu berücksichtigen, gibt es die Möglichkeit, den Port mittels Leiterstreifen mit naheliegenden Masseflächen zu verbinden. Da eine solche Verbindung eine Diskontinuität verursachen kann, sollte de-embedding in Betracht gezogen werden [1].

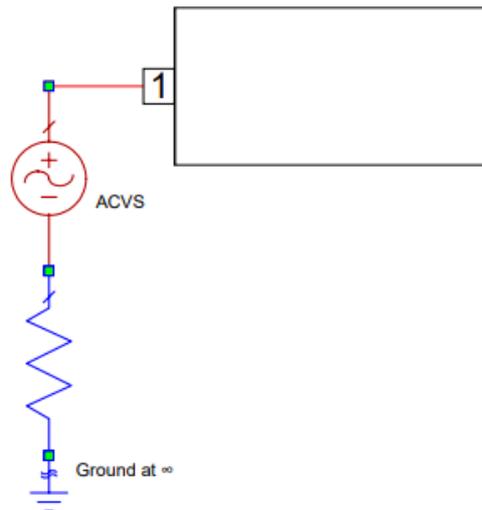


Abbildung 3.4: Aufbau eines impliziten Edge Ports. Adaptiert aus [1].

Durch Anwählen eines abgelegten Ports werden die Einstellungen für diesen geöffnet.

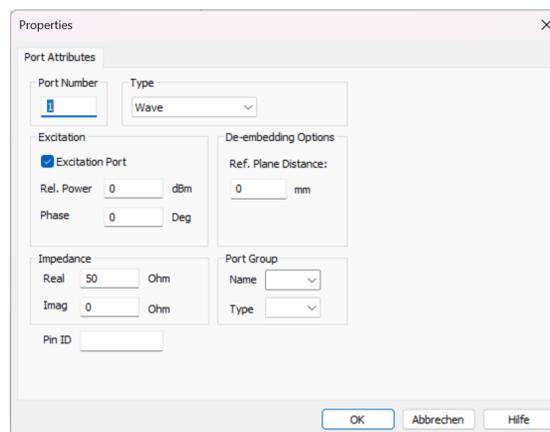


Abbildung 3.5: Menüfenster für die Portkonfiguration.

Das **de-embedding** stellt in der Simulation von Hochfrequenzkomponenten eine wichtige Funktion dar. Es ermöglicht, die Auswirkung anderer Bauteile, welche außerhalb des zu analysierenden Bereichs liegen, herauszurechnen und sich somit auf einen spezifischen Teil der Schaltung zu konzentrieren. Dies ermöglicht eine genauere Charakterisierung von Hochfrequenzkomponenten wie Filtern, Verstärkern und Antennen, da angrenzende Schaltungselemente nicht berücksichtigt werden.

In der folgenden Abbildung sieht man eine Darstellung einer Mikrostreifenleitung mit einem

Edge Port, bei dem De-Embedding angewendet wird. Die gestrichelte Linie repräsentiert den Bereich, innerhalb dessen die portbezogenen Effekte von der Simulation entkoppelt werden, um die reinen Leitungseigenschaften zu analysieren.

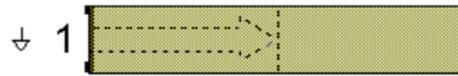


Abbildung 3.6: Edge Port mit de-embedding-Bereich.

Eine weitere Möglichkeit der Portvergabe sind die **differentiellen Ports**. Diese dienen der Simulation von differentiellen Signalwegen, wie sie bei der differentiellen Datenübertragung zum Einsatz kommen. Um diese Ports zu konfigurieren, werden zwei Edge Ports verwendet, bei welchen einer als positiver Anschluss und der andere als negativer Anschluss fungiert. Dies spiegelt sich in der Portnummer wider, da der negative Anschluss ein Minuszeichen vorangestellt bekommt. Da das Signal in Bezug auf den anderen Port und nicht auf die Masseebene gemessen wird, ist es wichtig keine Massereferenz herzustellen.

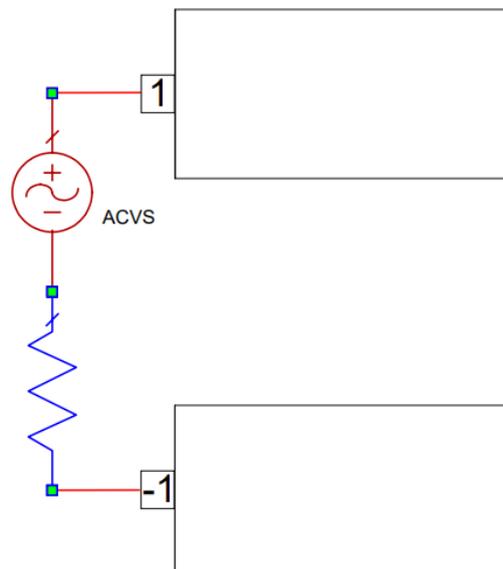


Abbildung 3.7: Differentialport-Konfiguration mit einer Wechselspannungsquelle und differentiellen Anschlüssen für die Signalanalyse. Adaptiert aus [1].

**Waveports** sind ein spezieller Typ von Ports, um Wellenleiter und Streifenleiter anzuregen. Anders als bei Point Ports oder Edge Ports, modelliert ein Waveport die Einkopplung einer elektromagnetischen Welle in eine Struktur. Diese Ports sind für die Hochfrequenztechnik von besonderer Wichtigkeit, da diese zur Berechnung von Antennenparametern, Filtern oder auch Kopplern, über ein- und auslaufende Wellen benötigt werden.

Hierbei wird eine Fläche an den Port gelegt, welche die Struktur anregt. Da ein Waveport mit der Grenzbedingung abschließen oder außerhalb dieser liegen muss, wird bei de-embedding ein Fehler verursacht, welcher die Simulation nicht starten lässt. Bei Waveports wird automatisch die Fläche der Simulationsgrenze angenommen und somit die gesamte Seite angeregt. Dies kann jedoch unterbunden werden, indem "Wave Custom Size" als Port ausgewählt wird. Hierbei muss die Fläche angegeben werden, welche der Waveport an der Grenze annimmt[1].

Die Fläche eines Waveports kann hierbei große Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse, wie beispielsweise auf Verkopplung von Antennen, haben [6]. Daher ist die Angabe geeigneter Maße eines benutzerdefinierten Waveports wichtig, welche jedoch nicht universell beschrieben werden können.

Bei der Berechnung der Waveport-Fläche für einen rechteckigen Wellenleiter, zum Beispiel, sollte die Fläche mindestens so groß wie der Querschnitt des Wellenleiters sein. Dies stellt sicher, dass der Waveport die gesamte Struktur effektiv anregt.

Die nachstehende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die verfügbaren Ports und wie diese mit Ground verbunden sind.

Porttyp	Beschreibung
Lumped Differential	Ports mit differentiellen Signal.
Lumped Down	Ports mit nach unten liegenden Ground verbunden.
Lumped Up	Ports mit nach oben liegenden Ground verbunden.
Lumped Up/Down	Ports mit nach oben und unten liegenden Ground verbunden.
Lumped As In Child	Beschreibung des Einsatzbereichs für Lumped As In Child Ports.
Wave	Waveports simulieren die Anregung durch einen unendlich langen Wellenleiter, wobei eine Welle über die gesamte Fläche einer Seite der Simulationsgrenze eingekoppelt wird. Dies ermöglicht die vollständige Berücksichtigung der Struktur auf dieser Seite für die Wellenausbreitung.
Wave Custom Size	Waveports mit spezifizierter Größe begrenzen die Anregung auf einen definierten Bereich. Diese Ports simulieren einen unendlich langen Wellenleiter, der die Welle nur innerhalb des festgelegten Gebiets eingekoppelt, was für eine gezielte Simulation von Wellenleitereffekten nützlich ist.

Tabelle 3.1: Übersicht über Porttypen in AWR Microwave Office.

### 3.3 Boundaries

In elektromagnetischen Simulationen ist das Festlegen von Grenzbedingungen (Boundaries) nötig, um den Bereich zu definieren, in dem das Feldproblem gelöst wird. Nur innerhalb dieser Grenzbedingung wird das Feldproblem gelöst und im späteren darstellbar gemacht. Um die Grenzbedingung an das Feldproblem anzupassen, können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, welche die Form als auch Grenzbedingungen beinhalten. Dem Nutzer wird viel Freiheit geboten, da es diverse Möglichkeiten gibt, die Grenzbedingungen anzupassen. Eine Besonderheit ist die Möglichkeit, für unterschiedliche Seiten der Grenze verschiedene Optionen festzulegen oder definierte Materialien als Boundary zuzuweisen. Diese Möglichkeit dient der Simulation von Gehäusen, welche aus verschiedenen Materialien bestehen können. [Abbildung 3.8](#) zeigt die festgelegte Simulationsgrenze, welche rot dargestellt ist. Das Gitternetz, sichtbar innerhalb der Grenze, verdeutlicht, dass die Diskretisierung nur bis zu dieser Grenze erfolgt. Außerhalb dieser Grenze findet keine Simulation beziehungsweise Berechnung des Feldproblems statt.

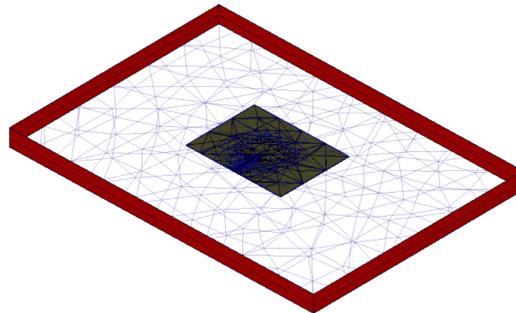


Abbildung 3.8: Die Simulationsgrenze ist rot dargestellt. Ebenfalls ist das Gitternetz sichtbar, welches lediglich bis zu dieser Grenze gezogen wird.

Sofern nicht anders definiert, wird die Grenzbedingung automatisch als “Approx Open“ angenommen, dies bedeutet, dass keine abschließende Grenze angenommen wird und das Material Luft ist. Diese Möglichkeit ist jedoch nur eine von mehreren, um die Grenzbedingung an das jeweilige Feldproblem anzupassen. Für abstrahlende Strukturen wie eine Patch-Antenne ist die “Perfectly Matched Layer“ (PML) vorgesehen, welche einen Wellenwiderstand von  $377 \Omega$  aufweist. Mit der PML-Boundary wird ein Hilfsmesh definiert, welches sich an das FEM-Mesh anknüpft. Dieses Hilfsnetz ist mit einem Medium gefüllt, welches sich an das Hauptmesh impedanzmäßig anpasst. Dadurch durchdringen die Felder die Boundary ohne große Reflexionen.

Abbildung 3.9 zeigt ein Beispiel, in dem die seitliche Grenze als "Perfectly Matched Layer" definiert wird.

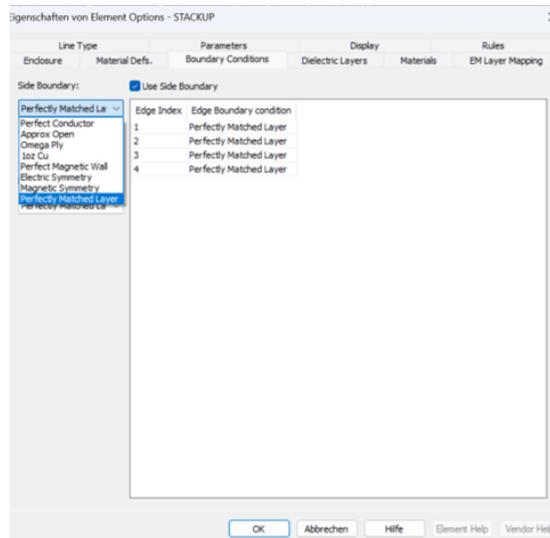


Abbildung 3.9: Eine Grenzbedingung wird für die seitliche Grenze ausgewählt.

Mögliche Einstellungen sind in anliegender Tabelle erläutert. Hierbei können die Effekte auf das elektrische und magnetische Feld mit vertikaler oder horizontaler Polarisation hinzugezogen werden. Für die empfohlene Größe der Boundary bzw. der Abstand zu der modellierten Struktur wurden die Empfehlungen von Cadence aus der AWR Dokumentation hinzugezogen.

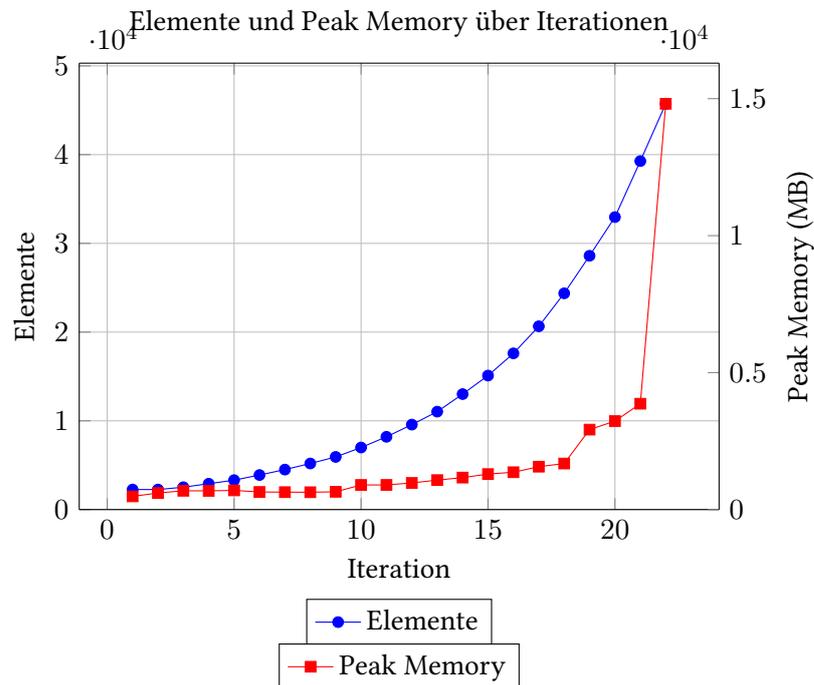
Grenzbedingung	Effekt auf E und H	Größenempfehlung der Boundary	Nutzungshinweis
Perfekter Leiter oder (PEC)	$E_h = 0, H_v = 0$	Typischerweise verwendet, um eine Struktur in einem leitenden Gehäuse zu modellieren, also Größe passend zum tatsächlichen Gerät definieren.	Keine Angabe.
Perfekter magnetischer Leiter	$E_v = 0, H_h = 0$	5-10x Substrathöhe entfernt von Metallformen.	Eine Alternative zu Näherungsweise offen für nicht abstrahlende Strukturen.
Impedanz	$E_h/H_h = Z$	Typischerweise verwendet, um eine Struktur in einem leitenden Gehäuse zu modellieren, also Größe passend zum tatsächlichen Gerät definieren.	Diese Auswahlmöglichkeiten haben Namen, die Materialdefinitionen wie Tantal oder Cap Bottom entsprechen.
Näherungsweise offen (Approximate Open)	$E_h/H_h = 376.7$	5-10x Substrathöhe entfernt von Metallformen.	Verwendet bei nicht abstrahlenden Strukturen, um freien Raum anzunähern, und bei abstrahlenden Strukturen, wenn Geschwindigkeit vorrangig ist.
Perfectly Matched Layer (PML)	Keine Angabe.	Mehr als $\lambda/4$ entfernt von Metallformen.	Bestimmt für den Einsatz in wahrhaft abstrahlenden Strukturen. Rechenintensiv.
Electric Symmetry	$E_v = 0, H_h = 0$	Keine Angabe.	Bei elektrischer Symmetrie der Struktur.
Magnetic Symmetry	$E_h = 0, H_v = 0$	Keine Angabe.	Bei magnetischer Symmetrie der Struktur.

Tabelle 3.2: Übersicht der Grenzbedingungstypen in elektromagnetischen Simulationen. Adaptiert aus [1].

### 3.4 Meshing und Konvergenz

Um eine fundierte Aussage über die Feldstärke und Wellenausbreitung im Raum treffen zu können, ist es notwendig, das Volumen innerhalb der Simulationsgrenzen zu diskretisieren. Ob die durch das gezeichnete Mesh entstandene Diskretisierung ausreichend ist oder ob eine Verfeinerung notwendig wird, hängt von dem in der Software festgelegten Konvergenzkriterium ab. Hierbei wird geprüft, ob Betrag oder Phasenwinkel der Streumatrix eine weitgehend kleine Änderung, zwischen den Iterationen aufweisen und die Gitternetzbildung nach Erreichen der gesetzten Kriterien beendet. Dabei wird das Gitternetz mit jeder Iteration verfeinert und die Streumatrix mit vorhergegangener Iteration verglichen[1]. Trotz dieser Herangehensweise verfügen viele Simulationstools über Einstellungen, welche es ebenfalls zu berücksichtigen gilt, da diese beispielsweise eine Diskretisierung auf einer nicht vorgesehenen Frequenz durchführen, die Konvergenzkriterien zwar eingehalten werden, doch die Gitternetzbildung nicht zu dem Feldproblem passt. Um die Diskretisierung hinreichend zu gestalten, ist es nötig einige Einstellungen zu betrachten und ihre Auswirkung auf den Prozess vor der eigentlichen Feldsimulation zu verstehen. Eine zu grobe Diskretisierung kann hierbei zu ungenauen Ergebnissen führen, während eine hohe Anzahl von sehr kleinen Zellen einen hohen Rechenaufwand bedeuten. Da die Genauigkeit der Simulation auch von dem diskretisierten Raum abhängt, gibt es mehrere Möglichkeiten das Gitternetz zu steuern. Hierbei können diese Einstellungen auf verschiedenen Ebenen angewandt werden. Die Anwendung auf Projektebene wendet die Einstellungen auf alle in dem Projekt befindlichen EM Strukturen an. In den Einstellungen der EM Struktur können Einstellungen getroffen werden, welche nur für die entsprechende Struktur angewandt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, die Gitternetzbildung einzelner Elemente einer Struktur anzupassen[1].

Die Bildung dieses Gitternetzes ist hierbei ein zeitkritischer Prozess und steuert neben der Dauer um ein entsprechendes Konvergenzkriterium zu erreichen, auch die benötigten Rechenressourcen. Dies wird in Abbildung 3.10 deutlich, welche die Anzahl der Elemente mit jeder weiteren Iteration zeigt. Sichtbar ist ebenfalls der benötigte Arbeitsspeicher, welcher mit jeder weiteren Iteration wächst.



<b>Einstellung</b>	<b>Beschreibung</b>
Model As Zero Thickness	Nimmt an, dass die Struktur eine Dicke von 0,0 mm aufweist.
Size Type	Angabe, ob es sich um eine relative oder absolute Größenangabe handelt. Dies kann die Iterationen von AMR verlängern.
Relative Mesh Size	Maximale Kantenlänge einer Meshzelle zwischen Luft und Boundary.
Absolute Mesh Size	Maximale Kantenlänge einer Meshzelle.
Size Propagation Factor	Übergangsrate von groben zu feinen Bereichen. Werte zwischen 0 und 1. Kleinere Werte führen zu schnelleren Übergängen.
Curvature Refinement Type	Angabe, ob die Krümmungsverfeinerung durch relative Elementgröße oder Arbeitslängeneinheit bestimmt wird.
Absolute Curvature Refinement Size	Steuert die Genauigkeit, mit welcher das Netz an gekrümmten Flächen und Kanten dargestellt wird. Darstellung in Arbeitslängen und größer als 0,0.
Relative Curvature Refinement Size	Steuert die Genauigkeit, mit welcher das Netz an gekrümmten Flächen und Kanten dargestellt wird. Zwischen 0,0 und 0,5. Relative Größenangabe.
Anisotropic Curvature Refinement	Durch Aktivierung dieser Funktion beschränkt sich die Krümmungsverfeinerung auf gekrümmte Richtungen. Elemente wie Zylinder erhalten weniger Zellen.
Relative Minimum Curvature Size	Definiert die kleinste Zelle, welche bei einer Krümmung erzeugt wird. Dies ist eine Verfeinerungsstufe und der Wert ist relativ zur maximalen Elementgröße.
Absolute Minimum Curvature Size	Definiert die kleinste Zelle, welche bei einer Krümmung erzeugt wird. Der Wert wird in Arbeitslängen definiert.
Enable Small Feature Suppression	Kleine Details, welche Probleme im Meshingvorgang verursachen können, werden unterdrückt.
Absolute Small Feature Suppression Tolerance	Längenwert, welcher in der Größenordnung von 0,0 liegt. Ein größerer Wert verringert die Fehlerwahrscheinlichkeit beim Meshing, kann jedoch dazu führen, dass die Strukturen ihre genaue Geometrie verlieren.
Enable Local Mesh Controls	Wenn diese Option aktiviert ist, wird die Vernetzung durch die lokale Geometrie gesteuert.

Tabelle 3.3: Übersicht der Mesh-Einstellungen in AWR Microwave Office.

### 3.4.1 Konvergenzkriterien

Ob ein Gitternetz eine hinreichende Auflösung bietet, wird über die Konvergenzkriterien definiert. Diese vergleichen hierbei den Betrag und die Phase der Streuparameter, zwischen zwei verschiedenen Iterationen.

Mathematisch lassen sich diese Unterschiede durch die Differenz der Streuparameter ( $\Delta S$ ) beschreiben:

$$\Delta S_{\text{Magnitude}} = ||S_N| - |S_{N-1}|| \quad (3.1)$$

$$\Delta S_{\text{Phase}} = |\angle S_N - \angle S_{N-1}| \quad (3.2)$$

Dabei ist:

- $|S_N|$  der Betrag der Streuparameter bei der Iteration  $N$ ,
- $|S_{N-1}|$  der Betrag der Streuparameter bei der vorherigen Iteration  $N - 1$ ,
- $\angle S_N$  die Phase der Streuparameter bei der Iteration  $N$ ,
- $\angle S_{N-1}$  die Phase der Streuparameter bei der vorherigen Iteration  $N - 1$ .

Das Konvergenzkriterium ist erfüllt, wenn sowohl  $\Delta S_{\text{Magnitude}}$  als auch  $\Delta S_{\text{Phase}}$  unter festgelegten Schwellenwerten bleiben. Dies stellt sicher, dass sowohl die Amplituden- als auch die Phasenänderungen der Streuparameter zwischen den Iterationen hinreichend gering sind, um ein zuverlässiges Simulationsergebnis zu erhalten. Inwiefern hierbei Phase und Betrag berücksichtigt werden sollen, ist in den Einstellungen zu den Konvergenzkriterien anzupassen. Es kann entsprechend nur der Betrag oder nur die Phase als Konvergenzkriterium berücksichtigt werden, wenn dies gewünscht ist.

Neben einer feststellbaren Mindestanzahl an Iterationen, welche eine hohe Auflösung erzwingt, gibt es die Möglichkeiten, die maximale Anzahl an Iterationen anzugeben, um eine zu hohe Auflösung zu vermeiden. In folgender Abbildung ist das Konvergenzkriterium auf ein  $\Delta S_{\text{Magnitude}}$  von 0,01 gestellt worden, um eine hohe Anzahl an Iterationen zu erzwingen. Mit jeder weiteren Iteration wird die Anzahl der Elemente erhöht und eine feinere Diskretisierung erreicht.

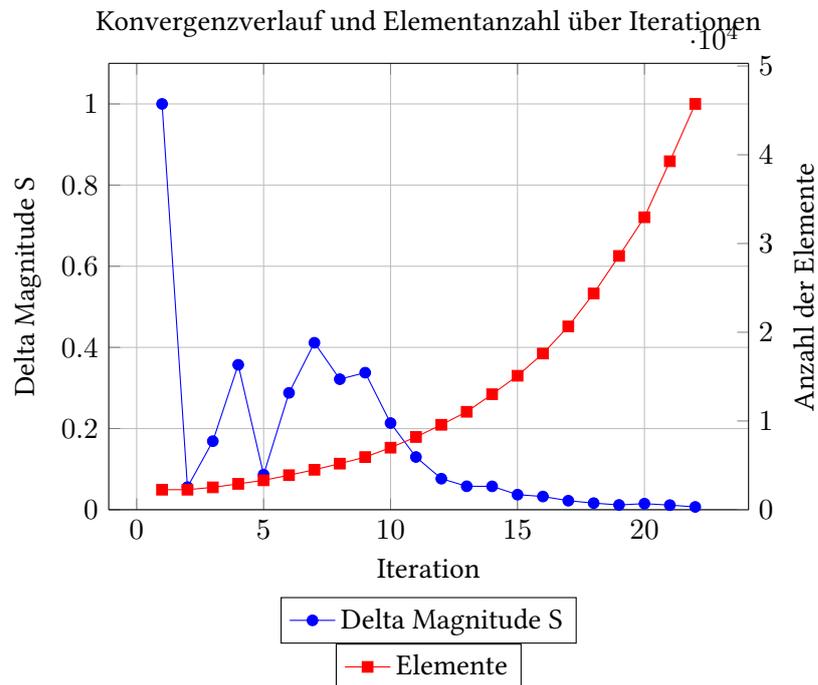


Abbildung 3.11: Entwicklung des Konvergenzverlaufs und der Elementanzahl während des Prozesses

In der folgenden Tabelle 3.4 ist eine Übersicht über verschiedene Einstellungen mit einer Beschreibung dieser gezeigt. Hierbei können nicht nur Einstellungen bezüglich des Konvergenzkriteriums getroffen werden, sondern auch zu Parametern, welche eine Auswirkung auf die Rechenzeit haben. Auf die Bedeutung des “Frequency Modifiers“ wird in dem Abschnitt 3.4.3 eingegangen.

<b>Einstellung</b>	<b>Beschreibung</b>
Maximum Iterations	Bei nicht Erreichen der Konvergenztoleranz wird das Refinement nach dieser Anzahl beendet.
Minimum Iterations	Mindestanzahl an zu durchlaufenden Iterationen, unabhängig des Konvergenzkriteriums.
Minimum Converged Iterations	Anzahl der zu durchlaufenen Iterationen, bei denen der Fehler bereits gut angepasst ist.
Frequency Modifier	Standardmäßig löst der Algorithmus einen einzigen Frequenzpunkt und führt den vollen Sweep in der letzten Iteration durch. Bei 'MID' wird der mittlere Frequenzpunkt gewählt, 'ALL' erfasst alle Frequenzen, 'CUSTOM' ermöglicht eigene Messpunkte.
Result Convergence/Target	Steuert, ob bei Erreichen der Konvergenz bei dem Betrag der S-Parameter oder der Phase und Betrag gestoppt wird.
Result Convergence/Tolerance	Das Stopp-Kriterium für das „Ports only“ Mesh Verfeinerung. Ein Wert von 0,01 bedeutet, dass die Lösung weniger als 1% zur vorherigen Iteration abweicht.
Result Convergence/Maximum Delta Magnitude S	Das Stopp-Kriterium für die Konvergenzänderung des Betrags der S-Parameter. Ein Wert von 0,01 bedeutet, dass der Betrag weniger als 1% zur vorherigen Iteration ändert.
Result Convergence/Maximum Delta Phase S	Das Stopp-Kriterium für die Konvergenzänderung der Phase der S-Parameter. Ein Wert von 5DEG bedeutet, dass die Lösung weniger als 5 Grad zur vorherigen Iteration konvergiert.
Result Convergence/Ignore Phase When Magnitude Less Than	Ab Erreichen einer kleineren Konvergenzänderung ist die Phase der S-Parameter nicht von Belang.
Coarsening Enabled	Kontrolliert, ob Größenänderungen an den Elementen während des AMR vorgenommen werden können.
Target Mesh Growth Fraction	Gibt an, wie schnell das Mesh wachsen darf. Ein Wert von 0,2 gibt 20% Wachstum verglichen zur vorherigen Iteration vor.

Tabelle 3.4: Übersicht der Konvergenzeinstellungen in AWR Microwave Office.

### 3.4.2 Advanced Mesh Refinement

AWR verfügt über eine fortgeschrittene Mesh-Verfeinerungsfunktion (Advanced Mesh Refinement). Diese verfeinert das Mesh, bis das eingestellte Konvergenzkriterium erreicht ist. Um zu verstehen, welche Auswirkung sich dadurch auf das Simulationsergebnis ergibt, bietet es sich an, die verschiedenen Phasen des Advanced-Mesh-Refinements zu erläutern.

Da der Solver Analyst über Waveports verfügt, beinhaltet das Advanced Mesh Refinement

einen zusätzlichen vorgeschalteten Prozess. Dieser Prozess diskretisiert die Ports mit einem Gitternetz. Der Wellenwiderstand dient dabei als Entscheidungskriterium für die Feinheit des Gitternetzes. Bei diskreten Ports erfolgt eine sofortige Konvergenz und die erste Phase des Advanced Mesh Refinements endet nach der ersten Iteration. Falls nach der ersten Iteration keine zufriedenstellende Konvergenz erreicht wurde, erfolgt eine weitere Verfeinerung des Gitternetzes, wobei insbesondere kleine Strukturen detaillierter aufgelöst werden[1].

Nach Erreichen des Konvergenzkriterien für die Portlösung, erfolgt die nächste Phase des Advanced Mesh Refinements. Eine volumetrische Verfeinerung wird vorgenommen, wodurch das Gesamtvolumen innerhalb der Simulationsgrenze in einer Gitternetzstruktur aufgelöst wird. Die Konvergenzkriterien sind hierbei nicht durch Wellenwiderstand gegeben, sondern über die Parameter der Streumatrix. Die S-Parameter werden hierbei nur für die festgelegte Frequenz berechnet, um Zeit und Rechenressourcen zu sparen[1].

Neben der Berechnung der Streumatrix wird der nötige Arbeitsspeicher für die nächste Iteration berechnet. Sobald die Rechenressourcen ausgeschöpft sind, wird die nächste Iteration nicht durchlaufen und eine Berechnung der Streumatrix über alle Frequenzpunkte vorgenommen[1]. Solange die volumetrische Verfeinerung nicht konvergiert ist, kann softwareseitig nicht mit ausreichender Genauigkeit eine volle Lösung angegeben werden. Komplexe Strukturen sind eventuell nicht mit der nötigen Feinheit aufgelöst.

In der letzten Phase des Advanced Mesh Refinements wird die Streumatrix über festgelegten Frequenzbereich ermittelt. Hier kann vom Benutzer angegeben werden, welche Frequenzen und mit welchem Sweeptype diese berechnet werden soll. Per Default wird ein Advanced Frequency Sweep angewandt, welcher nur für gewisse Punkte die Streumatrix berechnet[1]. Die dazwischenliegenden Punkte werden über eine kubische Funktion interpoliert. Dies kann zur Unterdrückung wichtiger Details im Frequenzgang führen, wodurch Ergebnisse stets genau zu bewerten sind.

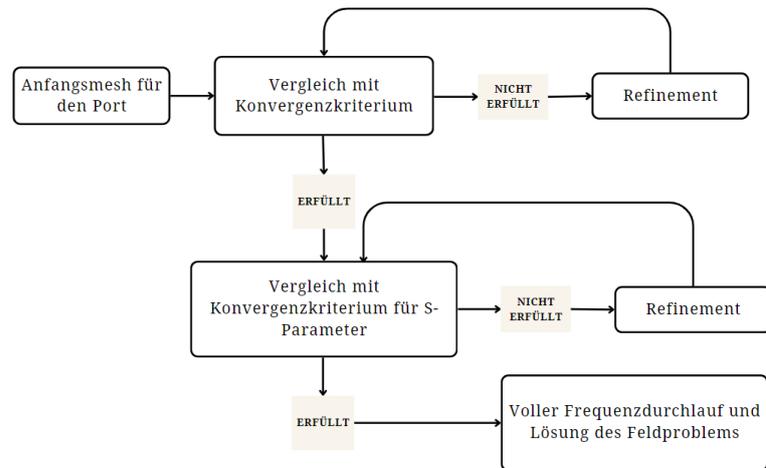


Abbildung 3.12: Ablauf des Mesh Refinement Prozesses.

### 3.4.3 Meshingfrequenz

Die Wahl der Meshingfrequenz spielt eine zentrale Rolle für die Qualität der Simulationsergebnisse. Dieses Beispiel, entnommen aus der AWR-Dokumentation, veranschaulicht die Bedeutung der Meshingfrequenz. Sie definiert die Frequenz, bei der die Streuparameter für das Advanced Mesh Refinement berechnet werden. Ist die Meshingfrequenz nicht optimal gewählt, beispielsweise im Sperrbereich eines Filters, kann dies zu einer vorzeitigen und unzureichenden Konvergenz führen, sodass das Gitternetz nicht angemessen an die strukturellen Details der zu simulierenden Struktur angepasst ist.

In der folgenden Abbildung 3.13 sind die S11-Parameter für einen Bandpassfilter dargestellt. Die darauf folgenden Abbildungen 3.14 veranschaulichen die resultierenden Gitternetze bei unterschiedlichen Meshingfrequenzen.

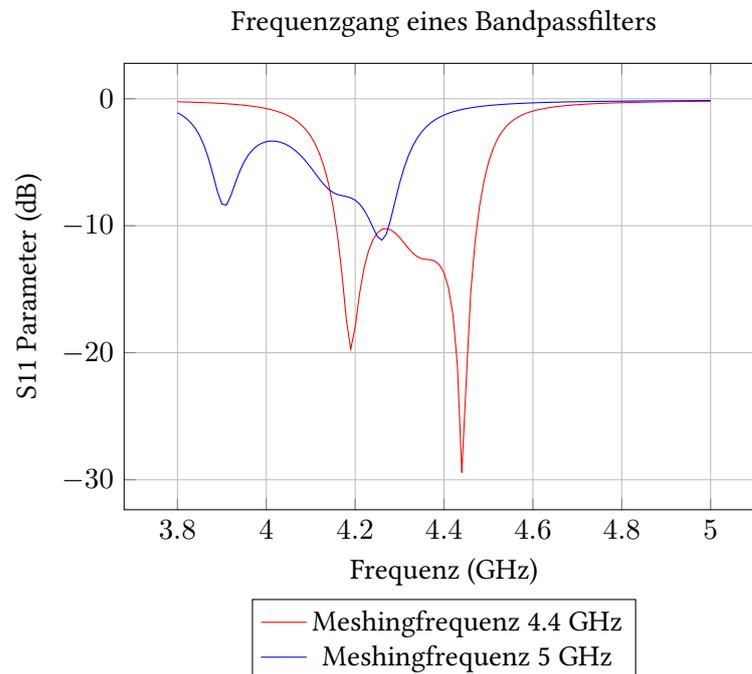
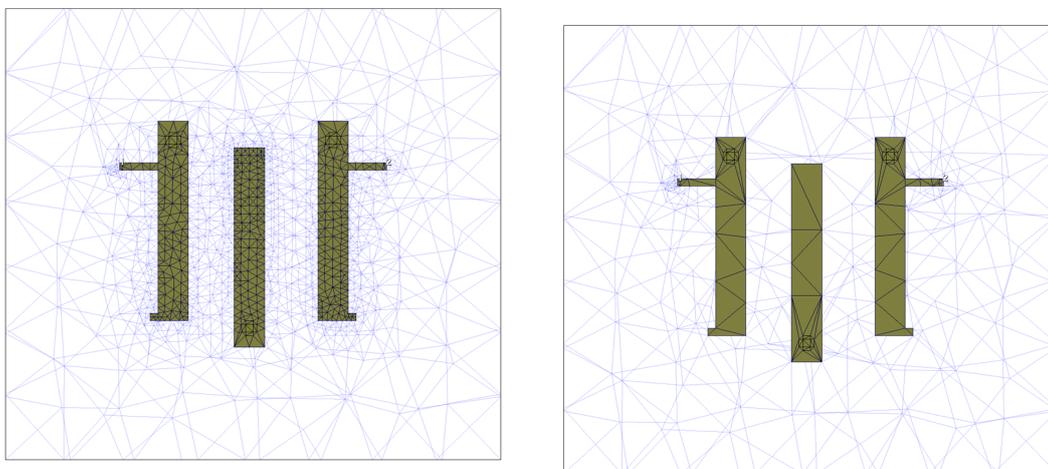


Abbildung 3.13: Frequenzgang des Bandpassfilters bei verschiedenen Meshingfrequenzen.



(a) Angemessenes Gitternetz bei der Meshingfrequenz von 4,4 GHz. Kritische Bereiche sind fein unterteilt. (b) Unzureichendes Gitternetz bei der Meshingfrequenz von 5 GHz.

Abbildung 3.14: Vergleich der Gitternetze bei unterschiedlichen Meshingfrequenzen.

Die Abbildung 3.14a zeigt ein feiner ausgearbeitetes Gitternetz aufgrund mehrerer durchlaufenen Iterationen. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 3.14b ein grobes Gitternetz bei der

Meshingfrequenz von 5 GHz. Die geringere Anzahl an Iterationen resultiert in einer ungenauen Volumendiskretisierung und kann das Simulationsergebnis verfälschen.

## 3.5 Solver

Bei der Simulation mit Analyst wird ein Solver verwendet, welcher das Feldproblem mit der Finite-Elemente-Methode löst. Die Methode der Finiten-Elementen ist eine, mit den Rechenressourcen sparsam umgehender Algorithmus, welcher das Raumvolumen in viele kleine Elemente unterteilt, die Feldstärke für jede Zelle ermittelt und eine Gesamtlösung darstellt [5]. Die Verfeinerung des Gitternetzes ist hierbei eine Methode, um aussagekräftige Simulationsergebnisse zu erhalten. Dies ist in Kapitel 3.4 erläutert.

Um den Solver an das Feldproblem anzupassen, können über die Optionen der EM Struktur unter dem Tab Analyst verschiedene Einstellungen vorgenommen werden.

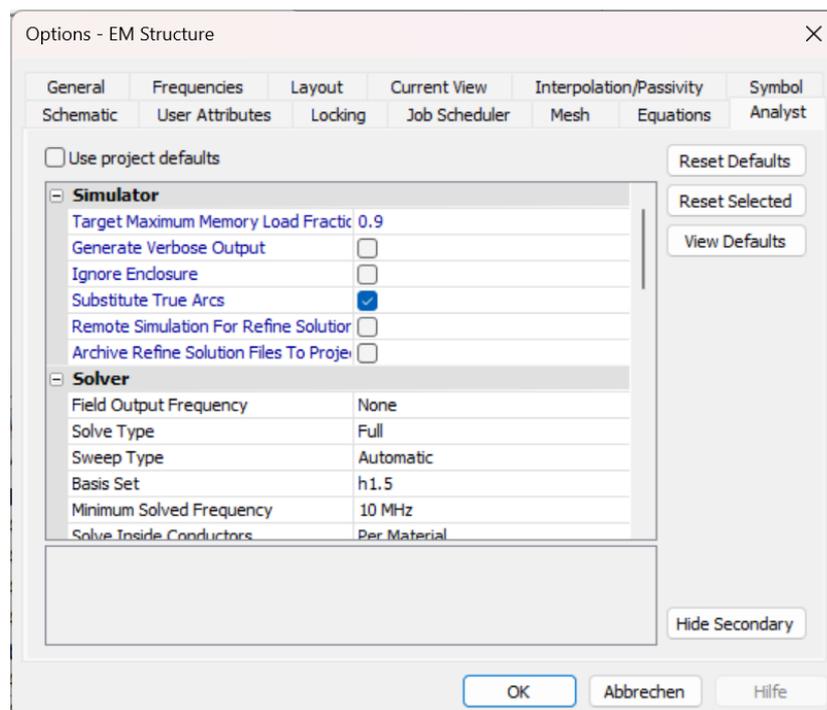


Abbildung 3.15: Einstellungen für den Solver Analyst.

Viele dieser Einstellmöglichkeiten haben einen Einfluss auf die Analysephase, nachdem die Simulation abgeschlossen ist, da der Solver über die Genauigkeit auf Basis seiner Einstellungen

### *3 Simulationssoftware-Einstellungen*

---

variieren kann. Die Eigenschaften der Ports sind ebenfalls von Interesse, daher finden sich separate Einstellmöglichkeiten wieder, welche sich nur auf diese beziehen.

### 3 Simulationssoftware-Einstellungen

<b>Einstellung</b>	<b>Beschreibung</b>
Field Output Frequency	Frequenzen, für welche die Ergebnisse der Simulation gespeichert werden sollen. Wichtige Angabe für Field Annotations, da diese nur, für entsprechende Frequenzen, verfügbare Datensätze darstellbar sind.
Solve Type	FULL kann gewählt werden, um die gesamte Struktur zu simulieren. Mit der PORTS ONLY Auswahl werden nur die Ports charakterisiert. Dies ist nützlich, um Charakteristiken des Ports zu erfassen, jedoch keine zeitintensive volle Lösung zu berechnen.
Sweep Type	Auswahl zwischen Automatic, diskret und GAWE. Bei der Auswahl PORTS ONLY wird immer diskret gesweept. GAWE ist ein schneller Sweep.
Basis Set	Steuert die Shape Funktion zur Interpolation des Feldes in einer Meshzelle.
Minimum Solved Frequency	Die niedrigste Frequenz, welche in Analyst mit der FEM gelöst wird. Darunter hängt das Verhalten des Verfahrens von den Parametern in Extrapolate Toward DC Einstellungen ab.
Solve Inside Conductors	Nützlich, wenn Eindringtiefe bzw. Skin-Effekt eine Rolle spielen. Es wird in dem Leiter ein Mesh gezogen, um solche Effekte in die Gesamtlösung einzurechnen.
Extrapolate Toward DC	Die Einstellung kontrolliert die Lösung des Feldproblems unterhalb der niedrigsten Frequenz. Es wird der letzte Frequenzpunkt für die Extrapolation bis DC verwendet. Bei Cubic Polynomial Fit wird eine kubische Fitfunktion berechnet, um die Punkte zu extrapolieren.
Characteristic Impedance Method	Dieser Menüpunkt steuert die Methode, mit welcher der Wellenwiderstand eines Waveports berechnet wird.
Port Solver > Basis Set	Steuert die Interpolation des Feldes einer Meshzelle am Port.
Port Solver > Eigensolver > Method	Der Eigensolver kann eine direkte oder iterative Methode verwenden. Die direkte Methode sammelt alle Eigenmoden und löst für diese. Die Iterative wählt mehrere Moden und löst für diese.
Linear Solver > Method	FEM benötigt eine Lösung für die Matrixgleichung. Diese Solver sind lineare Lösungsmethoden. Eine Auswahl als direkte Methode verwendet eine LU Faktorisierung der Systemmatrix.
Linear Solver > Direct > Method	Eine der LU Faktorisierungen wird verwendet. MFLU und HMLU. Die automatische Auswahl entscheidet nach verfügbarer Rechenleistung.
Linear Solver > Direct > HMLU > Factor Accuracy Level	Steuert die Genauigkeit der LU-Faktorisierung der Systemmatrix, welche die Anzahl der Iterationen in der Lösung beeinflusst.
Remote Simulation for Refine Solution	Die verfeinerte Lösung kann auf einer anderen Maschine berechnet werden.
Archive Refine Solution Files to Project	Einstellung über die Archivierung der Ergebnisse nach Berechnung auf einer anderen Maschine.

Tabelle 3.5: Übersicht der weiteren Simulationseinstellungen in AWR Microwave Office.

#### **Sweep Type**

Für den Frequenzdurchlauf gibt es in Analyst eine Auswahlmöglichkeit aus einem diskreten Frequenzdurchlauf und dem Durchlaufverfahren GAWE, welches für Galerkin Asymptotic Wave Expansion steht. Sobald der Nutzer hierbei keine der verfügbaren Möglichkeiten durch eine Auswahl erzwingt, wird das für die Rechenzeit vorteilhaftere Verfahren genutzt. Bei der diskreten Methode wird für jede zu bestimmende Frequenz ein Finite-Elemente-Problem gelöst und dargestellt. Bei GAWE werden Frequenzpunkte über eine asymptotische Methode berechnet, weitere Frequenzpunkte, welche nicht explizit berechnet wurden, werden über Expansionstechniken approximiert. GAWE eignet sich hierbei speziell für große Frequenzbereiche, da eine separate Berechnung jedes Punktes zeitintensiv wäre [1].

#### **Basis Set**

In AWR werden die Shape-Functions auch Basis-Set genannt. In den Analyst Einstellungen können diese Basis-Sets angepasst werden, um eine passende Genauigkeit an die Lösung für das Feldproblem zu approximieren. Hierbei gibt es verschiedene Genauigkeiten, welche durch eine spezielle Notation ausgedrückt werden. Die Genauigkeit ausgedrückt durch  $x+1$  ist in Analyst durch  $hx.5$  beschrieben und stellt die grundlegende Genauigkeit in Bezug auf das elektrische und magnetische Feld dar. Hierbei beschreibt  $x$  die Genauigkeit der Interpolation des Magnetfeldes und  $x+1$  die Interpolation des elektrischen Feldes. Die Interpolation 1. Ordnung für das elektrische Feld wird somit durch  $h0.5$  dargestellt, welche eine Interpolation 0. Ordnung für das Magnetfeld vorsieht. Für  $h1.5$  ist die Ordnung der Interpolation des elektrischen Feldes  $x+1$  also 2. Mit jeder Erhöhung der Ordnung erhält das Basis-Set lineare Funktionen zur Anpassung an die tetraedrale Struktur der Meshzelle dazu [1].

Neben einer globalen Einstellung für die Basis-Sets, welche die Felder in einer Meshzelle interpolieren, stehen weitere Optionen zur Verfügung, welche eine Interpolation höherer Ordnung in der Nähe von Metallkanten verursachen und in homogenen Teilen des zu lösenden Volumens eine geringere Auflösung der Felder annehmen. Diese Basis-Sets sind in der Auswahlmöglichkeit mit einem "c" statt "h" dargestellt und verwenden bei einer Auswahl von beispielsweise  $c2.5$  die Basisfunktionen von  $h2.5$  in der Nähe von Metallecken und -kanten. Von den metallischen Strukturen entfernt wird die Basisfunktion  $h1.5$  angewandt und es endet mit der Annahme von  $h0.5$  für den Rest des Volumens [1]. Somit werden bei Simulation die komplexen Strukturen genauer aufgelöst, ohne aufwendigere Berechnungen aufgrund der global festgelegten Basisfunktion vornehmen zu müssen.

In der folgenden Tabelle 3.6 sind die verschiedenen anwendbaren Einstellungen für die Basis-Sets, mit ihrer Ordnung der Interpolation der Felder, dargestellt. Die Anzahl der Funktionen stellt hierbei die Möglichkeiten der Felddarstellung innerhalb einer Meshzelle dar. So kann beispielsweise eine Funktion ein konstantes Feld über die Meshzelle darstellen, eine andere modelliert ein lineares Gefälle in eine bestimmte Richtung. Die Anzahl der Funktionen gibt also die möglichen Feldinterpolationen an.

Notation	Elektrisches Feld (Interpolation)	Magnetisches Feld (Interpolation)	Anzahl der Funktionen
h0.5	1. Ordnung	0. Ordnung	6
h1.5	2. Ordnung	1. Ordnung	20
h2.5	3. Ordnung	2. Ordnung	45
h3.5	4. Ordnung	3. Ordnung	84
h4.5	5. Ordnung	4. Ordnung	145

Tabelle 3.6: Eigenschaften verschiedener Basis-Sets in Analyst.

### Lineare Funktionen der Solver

Die Anwendung der linearen Funktionen findet sich in der Lösung des linearen Gleichungssystems wieder, welches für das Feldproblem gelöst werden muss. In Analyst stehen für den direkten linearen Solver zwei LU-Faktorisierungsmethoden bereit. Multi-Frontal LU-Faktorisierung (MFLU) führt eine exakte Faktorisierung durch, weshalb sie wesentlich genauer als eine hierarchische Matrix LU-Faktorisierung (HMLU) ist, welche diese nur approximiert. MFLU erfordert aufgrund der Genauigkeit mehrere Iterationen und somit mehr Zeit und Rechenressourcen. HMLU hingegen benötigt weniger Rechenoperationen, kann jedoch aufgrund der Näherung zu geringerer Genauigkeit führen.

Bei einer LU-Faktorisierung wird eine Matrix als Produkt zweier Matrizen dargestellt. L für Lower triangular und U für Upper triangular. Bei einem linearen Gleichungssystem wird die Systemmatrix in die Matrizen L und U zerlegt, um aus diesem System zwei Teilprobleme zu brechen [7].

Gegeben sei ein lineares Gleichungssystem der Form:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{3.3}$$

wobei  $\mathbf{A}$  die Systemmatrix,  $\mathbf{x}$  der Vektor der Unbekannten und  $\mathbf{b}$  der Quelltermvektor ist.

Die Matrix  $\mathbf{A}$  wird in die untere und obere Dreiecksmatrizen  $\mathbf{L}$  und  $\mathbf{U}$  zerlegt:

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (3.4)$$

Zunächst wird das untere Dreieckssystem  $\mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{b}$  gelöst, um den Vektor  $\mathbf{y}$  zu finden:

$$\mathbf{y} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{b} \quad (3.5)$$

Anschließend wird das obere Dreieckssystem  $\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{y}$  gelöst, um den Vektor  $\mathbf{x}$  zu finden:

$$\mathbf{x} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{y} \quad (3.6)$$

HMLU und MFLU sind hierbei die numerischen Lösungsverfahren, um das lineare Gleichungssystem zu lösen.

## 3.6 Post-processing und Annotationen

Für die Analyse der Simulationsergebnisse werden von AWR Datensätze angelegt, welche Ergebnisse für Streuparameter und erstellte Annotationen enthalten. Hierbei werden nur für die Analyse voreingestellter Annotationen die Daten berechnet, um die Simulationsdauer niedrig zu halten. Über Draw > Add Annotation erscheint eine Auswahl der möglichen Simulationen. Mögliche Annotationen werden in anliegender Tabelle 3.7 beschrieben.

Messungsart	Messung	Beschreibung
Antenne	Antenna 3D	3D-Antennenmuster
	Antenna CKT 3D	3D-Antennenmuster aus Schaltungserregung
Debug EM	EM Deembed Mesh	Zeichnet das Mesh des ausgewählten Deembedding Standards
	Spec Mesh	Zeichnet die spezifizierten Facetten
EM3D	EM3D Current	Oberflächenströme für 3D EM
	EM3D Surf BC	Oberflächengrenzbedingungen für 3D-Modelle
	EM3D Surf concerns	Grafische Marker für potenzielle geometrische Bedenken bei 3D-Modellen
	EM3D Surf Ids	Oberflächen-IDs für 3D-Modelle
	EM Field Carpet	EM-Feld Teppichdiagramm auf der Schnittebene
	EM Field Cont	EM-Feld Oberflächenkonturen
	EM Field cut	EM-Feld auf der Schnittebene
	Em field vect	EM-Feldvektoren
	Em Ports field	Feldmodi der Ports
	Mesh 3D	Volumetrisches 3D-Mesh
	Mesh 3d con	Volumetrisches 3D-Mesh
	Mesh 3d Surf	Begrenzungsfläche für 3D-Mesh
ERC	Ext CKT3D	Zeichnet Parasitäre in 3D
	Ext comp3D	Zeichnet spezifische Parasitäre in 3D
Planar EM	Diagnose Mesh	Zeichnet Formen, die Meshing-Fehler verursachen
	Em charge	Zeigt die Ladungsdichte des ausgewählten EM-Dokuments
	EM CKT Curr	EM-Strom aus Schaltungserregung berechnet
	Em current	Zeigt die Ströme des ausgewählten EM-Dokuments
	Em Current SW	Zeigt die stehenden Wellenströme des ausgewählten EM-Dokuments
	EM E Field	Zeigt das elektrische Feld an.
	Em mesh	Zeichnet das Mesh des mit einem bestimmten Port verbundenen Netzes
	EM Mesh 2D	Zeichnet das Mesh des ausgewählten EM-Dokuments
	HI Aspect Facets	Zeichnet nur Facetten mit hohem Seitenverhältnis

Tabelle 3.7: Übersicht der verfügbaren Annotationen in AWR Microwave Office.  
40

Für die Annotationen werden zu der Messung passende Einstellungen ermöglicht, indem beispielsweise die Sweep Frequenz, Polarisation oder die logarithmische Darstellung veränderbar sind. Ein Sweep von Standardparametern wie Streuparameter und Wellenwiderstand zur Evaluierung des Gitternetzes findet vor jeder Simulation statt und ist daher ohne Annotation in den Datensätzen verfügbar. Über Project > Add Graph kann ein beliebiger Graph gewählt werden und über Project > Add Measurement eine zum Graphen passende Messung eingefügt werden. Hierbei stehen erneut die bereits angelegten Datensätze zur Verfügung. In folgender Abbildung ist die Darstellung der S11-Parameter einer Patchantenne gezeigt.

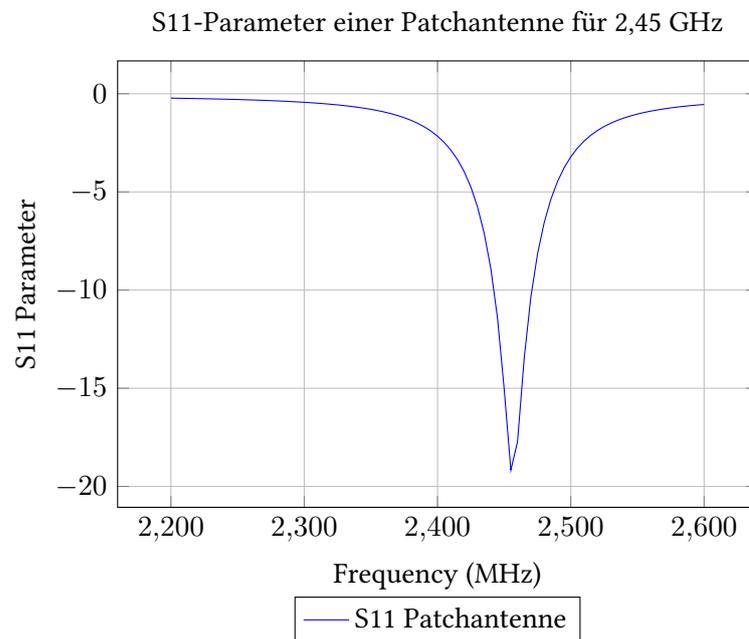


Abbildung 3.16: S11-Parameter einer Patchantenne für 2,45 GHz.

Nach der erstellten Simulation mit Annotationen können Feldvektoren dargestellt werden. Eine Animation der Feldvektoren ist mit dem Playbutton in der Werkzeugleiste möglich.

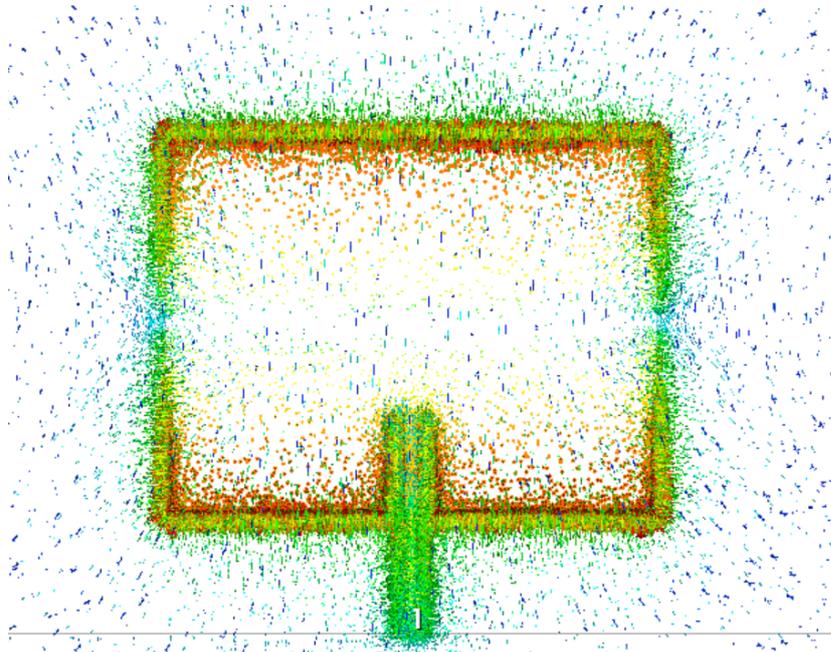


Abbildung 3.17: Darstellung der Feldvektoren einer Patchantenne in AWR Microwave Office.

Insbesondere beim Antennendesign besteht das Interesse, eine Vorabevaluation der Strahlungscharakteristik zu machen, bevor diese gefertigt wird. Für dieses Interesse stehen Antennenplots zur Verfügung, welche die Strahlungscharakteristik in einem Polargraphen aufzeigen. Im folgenden Beispiel ist die Charakteristik der Patchantenne abgebildet, welche über Theta gesweept wurde.

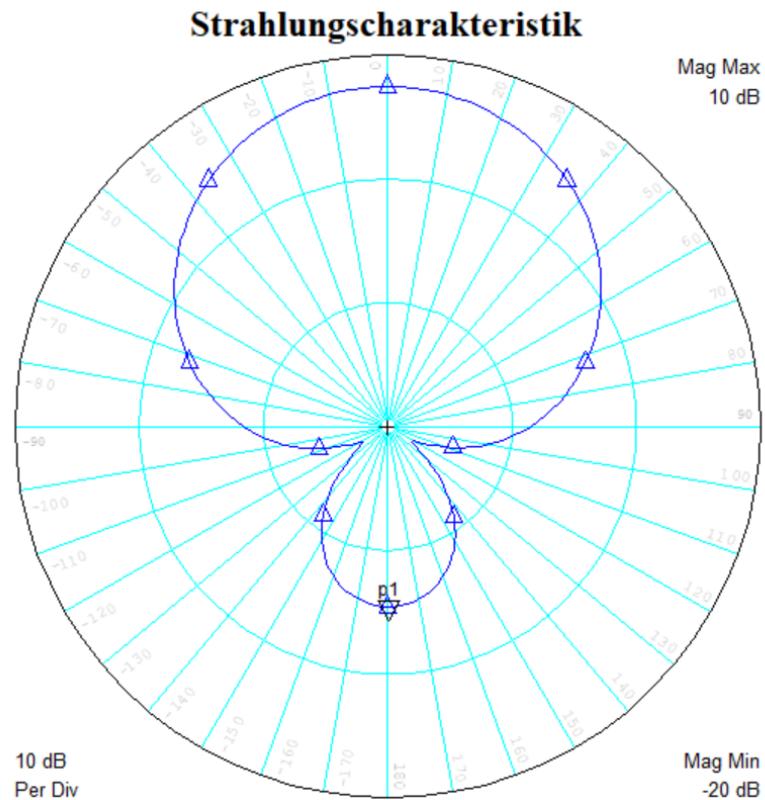


Abbildung 3.18: Darstellung der Strahlungscharakteristik der Patchantenne in AWR Microwave Office.

## 4 Technische Umsetzung und Simulation

In diesem Kapitel wird eine beispielhafte Anwendung von Analyst in der Simulationssoftware AWR Microwave Office gezeigt. Es wird in der Simulationsumgebung die EM Struktur einer Patchantenne erstellt, simuliert und im post-processing ausgewertet. Wobei vorgestellte Möglichkeiten und Einstellungen, welche Analyst bietet, zur Anwendung kommen. Diese können einen praktischen Bezug zu erläuterter Theorie bilden.

### Theoretische Auslegung

Als Beispiel soll eine Patchantenne verwendet werden, welche eine Resonanz bei 2.45 GHz aufweist. Als Substrat wird das Material RO4350B mit einer Dielektrizitätskonstante von 3.47 und einer Dicke von 0.76 mm verwendet. Außerdem ist beidseitig eine Kupferschicht mit einer Dicke von 0.035 mm aufgelegt.

In folgender Abbildung 4.1 ist eine technische Zeichnung der Patchantenne dargestellt.

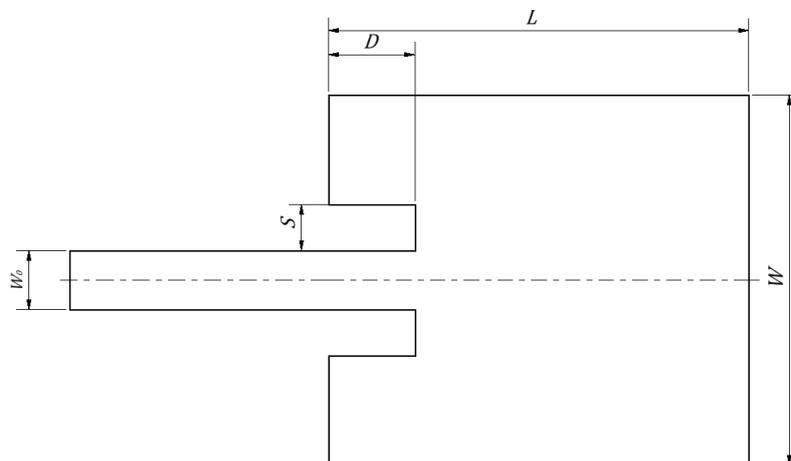


Abbildung 4.1: Technische Zeichnung für die Patchantenne.

Die Parameter der Patchantenne sind abhängig von der Frequenz sowie von der Substratdicke und der Dielektrizitätskonstante. Bei einer Antenne auf einer Platine spielt die effektive Di-

elektrizitätskonstante eine wichtige Rolle, da sie von der Angabe aus Datenblättern abweicht. Diese lässt sich nach der Formel

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/W)}} \right) \quad (4.1)$$

bestimmen, wobei  $\varepsilon_r$  die Dielektrizitätskonstante des Substrats,  $h$  die Höhe und  $W$  die Breite des Substrats sind [8].

Die Breite des Patchelements kann mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  und der effektiven Dielektrizitätskonstanten berechnet werden [8]:

$$W = \frac{v}{2f_0 \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right)}} \quad (4.2)$$

Die Länge des Patchelements hängt von der Breite und der Höhe des Dielektrikums ab [8]:

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} - 0,823h \left( \frac{(\varepsilon_{\text{eff}} + 0,3)(W/h + 0,264)}{(\varepsilon_{\text{eff}} - 0,258)(W/h + 0,8)} \right) \quad (4.3)$$

Die Impedanz der Antenne kann über das Verhältnis von Länge zu Breite bestimmt werden [8]:

$$Z_{\text{in}} = 90 \left( \frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \right) \left( \frac{L}{W} \right)^2 \quad (4.4)$$

Die Bandbreite der Antenne ergibt sich aus [8]:

$$B = 3,77f_0 \left( \frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \right) \left( \frac{Wh}{L\lambda} \right) \quad (4.5)$$

Um die Antenne in ihrer Frequenz impedanzmäßig anzupassen, wird folgende Näherungsformel verwendet [8]:

$$D = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt[4]{\frac{Z_{\text{feed}}}{Z_{\text{Antenna}}}} \right) \quad (4.6)$$

wobei  $D$  die Tiefe darstellt, bis zu welchem Punkt die Zuführung in das Patchelement hineingeht.

Für eine optimale Anpassung sind oft weitere Abstimmungen notwendig.

## Design der Patchantenne in AWR Microwave Office

Der Designprozess startet mit dem Erstellen einer neuen EM Struktur. Dies erfolgt über Rechtsklick auf **EM Structure** > **New EM Structure** in dem Projektfenster. Anschließend öffnet sich ein Fenster, in welchem die Auswahl des Solvers geschieht. Als Solver wird der Finite Elemente Solver Analyst ausgewählt, welcher auch in der Beschreibung für volumetrische Feldprobleme ausgewiesen ist. Der Frequenzbereich für welchen simuliert werden soll, kann in den Projektoptionen über den Pfad **Options** > **Project Options** > **Frequencies** festgelegt werden. Als nächster Schritt werden die Optionen für die EM-Struktur festgelegt. Diese beinhalten Materialien, Boundaries und dielektrische Lagen und können über “Enclosure“ bei der im Projekt erstellten EM-Struktur ausgewählt werden.

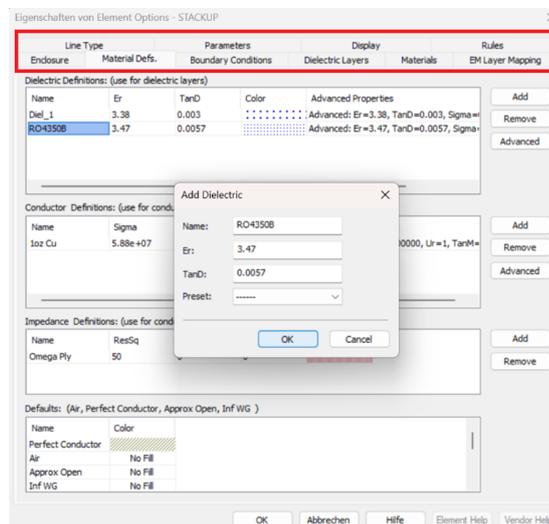


Abbildung 4.2: Einstellungen der Enclosure in Rot markiert. Mit dem Menü zur Anpassung verfügbarer Materialien.

Unter dem Reiter “Material Definitions“ wird das Material RO4350B als Dielektrikum mit einem  $\epsilon_r$  von 3,47 und einem  $\tan \delta$  von 0.0057 erstellt. Dadurch können in der Designumgebung eingefügte Strukturen dieses Material zugewiesen bekommen.

In dem nebenstehenden Reiter “Boundary Conditions“ werden die Eigenschaften der Grenzbedingung festgelegt. Bei dem Aufbau einer Antenne empfiehlt sich die Perfectly Matched Layer, aufgrund ihres Wellenwiderstandes von 377  $\Omega$ . Dies muss für alle Seiten der Simulationsgrenze erfolgen. Eine Grenzbedingung wird also nicht automatisch für alle Seiten angenommen.

Aufgrund des Lagenaufbaus in AWR müssen die verschiedenen Schichten definiert werden. Der Reiter dazu heißt “Dielectric Layers“ und ermöglicht über “Insert“ und “Delete“ ein Zufügen

und Entfernen dieser. In diesem Beispiel sind drei Lagen ausreichend. Die mittig angeordnete Lage hat hierbei die Dicke des Substrats der Platine mit 0,76 mm und die anderen Lagen stellen den Abstand zur oberen und unteren Simulationsgrenze ein, hierbei mit 10 mm Abstand. Alle Lagen bekommen das Material Luft zugewiesen. Eine Zuweisung als Material in diesem Fenster hat zur Folge, dass die gesamte Lage als dieses angenommen wird und somit kein Abstand zur Simulationsgrenze geschaffen wird. Dadurch würde die Antenne verstimmt werden und die Simulationsergebnisse verlieren an Zuverlässigkeit.

In dem Reiter "Materials" können nun die zuvor definierten Materialien in ihrer Dimension beschrieben werden. Nur, wenn hier definiert, werden sie später als Material zur Verfügung stehen. In diesem Fall wurde das Trace 1 mit einer negativen Dimension formuliert, also mit einem Minuszeichen vorstehend, um zu ermöglichen, die Leiterbahn unterhalb der Layer 3 zu führen. Außerdem muss das zuvor definierte Dielektrikum zu den Materialien hinzugefügt werden.

In Abbildung 4.3 ist die Position der Leiterbahn mit einer negativen Dimension erläutert. Bei einer positiven Dicke würde dieses Material auf der Schicht liegen und somit im Dielektrikum sein.

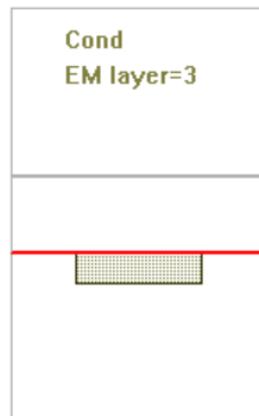


Abbildung 4.3: Positionierung des Materials mit einer negativen Dicke. Das Material verläuft unter der zugewiesenen Schicht.

Automatisch ist nach Anlegen einer neuen Struktur eine Grenzbedingung gesetzt, welche als gestrichelter Kasten in der Arbeitsfläche sichtbar ist. Diese kann zunächst durch Linksklick ausgewählt und gelöscht werden, da dieser, nachdem die Antenne fertig erstellt ist, zugefügt wird.

Zum Zeichnen der Strukturen, benötigt die Software eine Angabe, auf welcher Schicht diese Strukturen platziert werden sollen. Andernfalls wird die Option zum Zeichnen nicht zur

Verfügung stehen. Daher wird von dem Projektfenster, durch Anwählen des Reiters “Layout“, auf dieses gewechselt und eine entsprechende Zeichenschicht gewählt.

Nachdem allgemeinere Einstellungen bezüglich des Projekts festgelegt und gespeichert sind, kann über **Draw > Rectangle** das Patchelement gezeichnet werden. Während das Rechteck gehalten wird, kann mit der Tabulatortaste ein Fenster geöffnet werden, welches eine Eingabe der Maße ermöglicht.

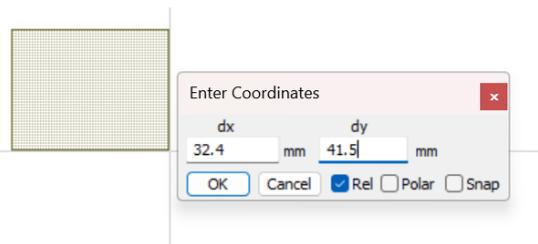


Abbildung 4.4: Fenster zur Eingabe der Koordinaten für eine erstellte Struktur nach Verwendung der Tabulatortaste.

Nachdem das Element gezeichnet wurde, wird es per Default auf die zuvor gewählte Zeichenschicht gelegt. Daher muss eine neu gezeichnete Struktur eventuell über **Rechtsklick auf das Element > Shape Properties** angepasst werden. Auch das entsprechende Material, welches verwendet werden soll, sollte überprüft werden. Für den Microstrip, welcher als Zuleitung dient, kann die Dimension über **Tools > TXLine** bestimmt werden. Dazu muss die passende Frequenz und das entsprechende Material ausgewählt sein. Wenn bei der Impedanz  $50 \Omega$  angegeben ist, wird die Dimensionierung für eine auf die entsprechende Impedanz angepasste Leitung ausgegeben.

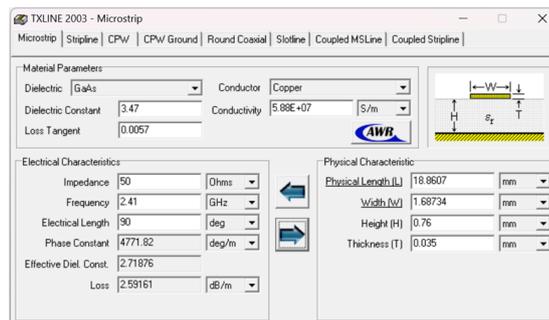


Abbildung 4.5: Eingebettetes Tool “TXLine“ zur Berechnung von Streifenleitungen.

Wie zuvor wird ein Rechteck gemalt, welches über TAB die aus TXLine ermittelten Dimensionen erhält. Da noch Schlitz eingefügt werden müssen, wird hier der Microstrip zunächst nebengelegt.



Abbildung 4.6: Erstellung des in TXLine berechneten Streifenleiter mit Hilfe der Größenangabe im Koordinatenfenster.

Es kann erneut ein Rechteck gemalt werden, welches die Schlitz mit Hilfe der Logikfunktionen einbringt. Dazu eignet sich besonders ein „Exclusiv or“, jedoch reduziert auch „subtract“ um die entsprechende Dimension.

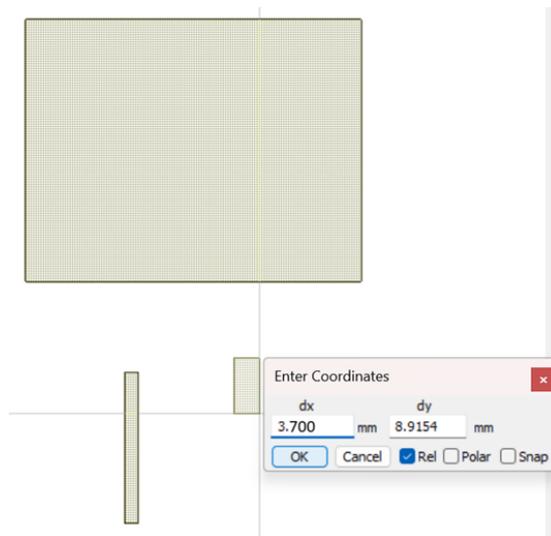


Abbildung 4.7: Erstellung der Aussparung für das Patchelement der Antenne mit Hilfe der Größenangabe im Koordinatenfenster.

Um nun diese Fläche von dem Patchelement abziehen, wird wie folgt vorgegangen:

1. An die richtige Position legen **Linksklick auf das Patchelement > Shift + Linksklick auf das abziehende Element > Draw > Align Shapes > Center** danach erneut **Draw > Align Shapes > Bottom**
2. Abziehen des Elements **Draw > Modify Shapes > Subtract**

Nachdem der Ausschnitt für die dielektrische und leitende Schicht geschehen ist, kann auch der angepasste Microstrip hinzugefügt werden. Über die Tiefe und Breite des Schlitzes wird das Patch Element in der Impedanz eingestellt. Ein Doppelklick auf die Struktur lässt Griffpunkte erscheinen, mit welcher die Breite angepasst werden kann. Dies wird im späteren Verlauf wichtig, um die Struktur im Frequenzgang anzupassen.

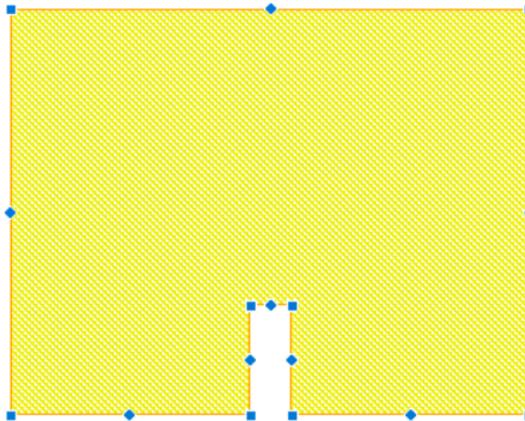


Abbildung 4.8: Fertiges Patchelement in angewählter Ansicht. Blaue Punkte dienen als Griffpunkte zum manuellen Verstellen der Kanten.

Über Linksklick auf das **Patchelement** > **Align Shapes** > **Center** wird der Microstrip mittig ausgerichtet. Er muss manuell in der vertikalen Position verschoben werden, sodass dieser korrekt platziert ist.

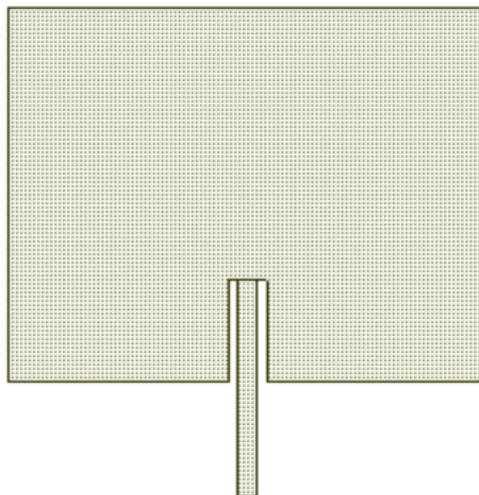


Abbildung 4.9: Fertige Patchantenne jedoch ohne Dielektrikum und Groundplane.

Zum Hinzufügen von Ground muss lediglich ein großes Rechteck gezeichnet werden und dieses auf die korrekte Schicht mit Trace 1 gelegt werden. Hierbei macht sich die negative

Dimensionierung bezahlt. Als Dimension für Ground wird in diesem Beispiel (60 mm x 80 mm) angenommen und es wird auf Schicht 3 gelegt.

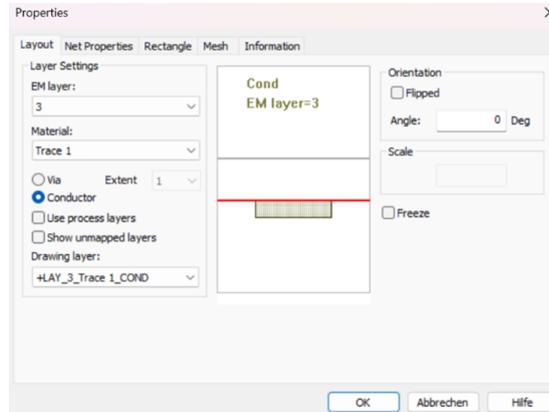


Abbildung 4.10: Propertie eines Elements. Schicht und Material sind neben der Auswahl als Via oder Conductor auswählbar.

Es muss zum Definieren der Ports die Zuführung exakt mit der Ground-Layer übereinander liegen. Dazu sind die Align-Funktionen erneut hilfreich. Eine Zuweisung der Ports erfolgt im späteren. **Linksklick auf den Microstrip > Shift + Linksklick auf die Groundplane > Draw > Align Shapes > Center**, danach erneut auf **Draw > Align Shapes > Bottom**.

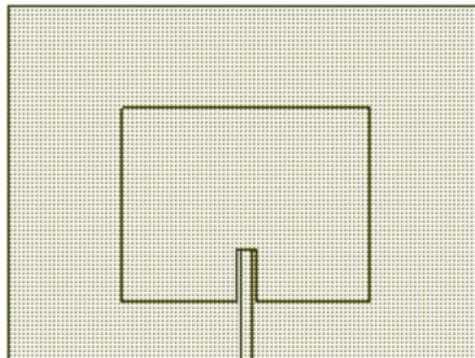


Abbildung 4.11: Fertige Patchantenne mit Groundplane ohne Dielektrikum.

Zuletzt wird das Substrat zugefügt. Da dieses die gleiche Dimensionierung wie Ground haben soll, kann das zuvor erstellte Rechteck mit **Strg+C** und **Strg+V** kopiert werden. Lediglich in den Shape properties müssen Umstellungen erfolgen.

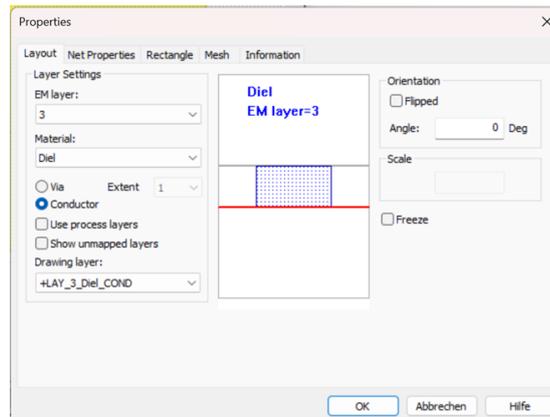


Abbildung 4.12: Eigenschaften des Dielektrikums. Es liegt auf Schicht 3 und ist als Conductor angelegt.

Um nicht in den unendlich großen Raum zu simulieren, muss eine Boundary festgelegt werden. Dazu wird erneut ein Rechteck mit weitem Abstand von der Antenne definiert. Wenn das neu erstellte Rechteck ausgewählt ist, wird über **Draw > Create 3D EM Simulation Boundary** dieses als die Grenzbedingung für die Simulation festgelegt.

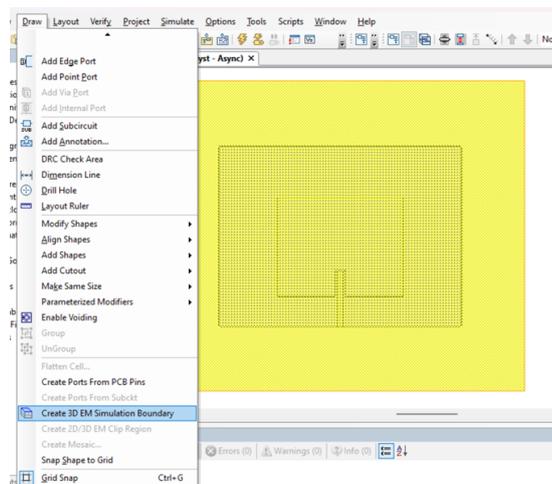


Abbildung 4.13: Arbeitsoberfläche in AWR Microwave Office während der Erstellung einer Simulationsgrenze. Der gelben Kasten ist ausgewählt und wird in dem Menü "Draw" als Boundary festgelegt.

Über **Draw > Add Edge Port** wird ein Port angewählt und muss an die Zuführung gelegt werden.

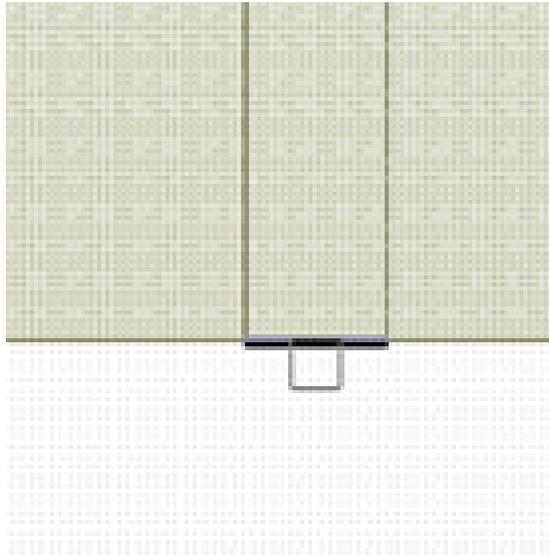


Abbildung 4.14: Port angelegt an den unteren Teil des Streifenleiters.

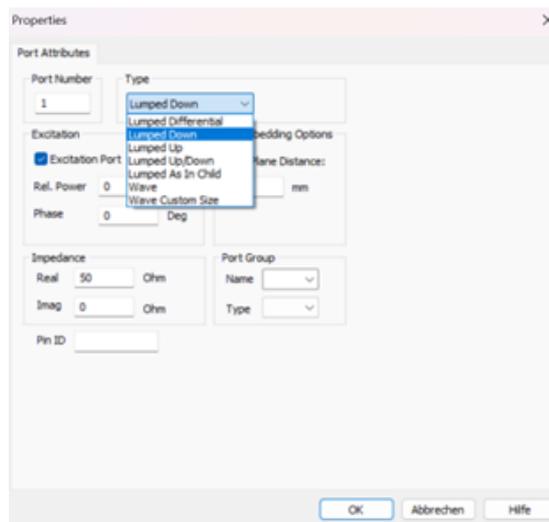


Abbildung 4.15: Für den Port wurde “Lumped Down“ ausgewählt. Er ist nach unten zu Ground verbunden.

Das 3D-Modell lässt sich ebenfalls betrachten. Eine Kontrolle ist hilfreich, um zu beobachten, ob ein Layer falsch definiert wurde oder ein Material falsch zugewiesen ist.

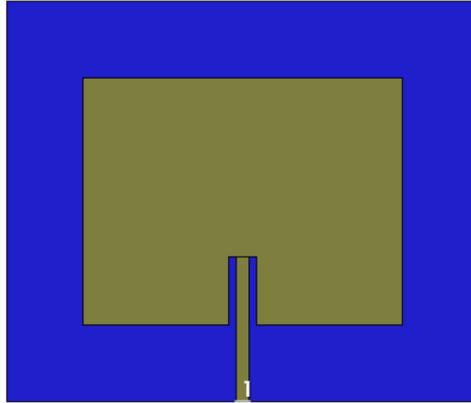


Abbildung 4.16: Fertige Patchantenne mit Groundplane, Dielektrikum und Port in der 3D-Ansicht.

### **Post-processing**

Rechtsklick auf **Graph** > **New Graph** öffnet viele Möglichkeiten wie Rectangel oder Smith. Nachdem eines davon ausgewählt wurde, kann über einen erneuten Rechtsklick in den Graphen eine neue Messung hinzugefügt werden. Interessant um zu schauen, ob die Antenne angepasst ist, sind die S11-Parameter.

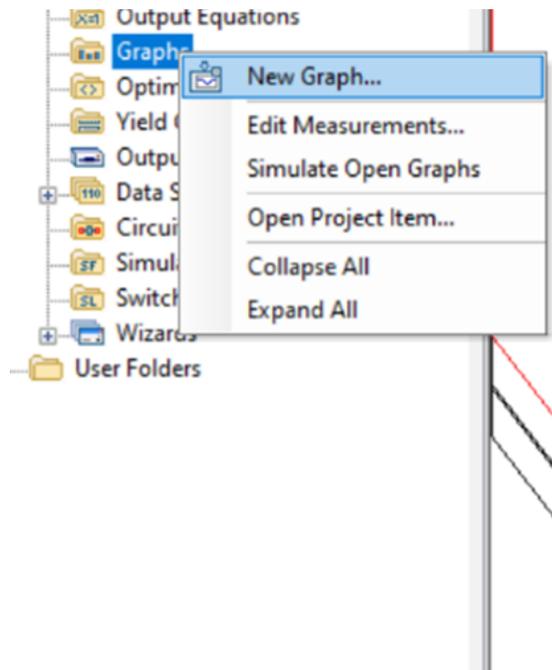


Abbildung 4.17: Erstellung eines neuen Graphen über einen Rechtsklick auf den Ordner “Graphs”.

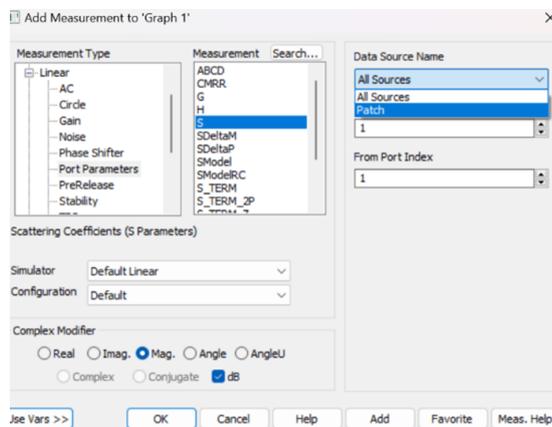


Abbildung 4.18: Anlegen einer neuen Messung über einen Rechtsklick in das Koordinatensystem.

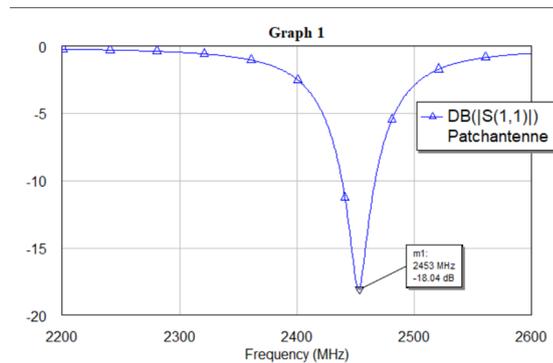


Abbildung 4.19: Darstellung der S11-Parameter der Patchantenne in dB. Die Optik aus AWR Microwave Office wurde hierbei beibehalten, um einen Eindruck zu verschaffen.

Auch die Strahlungscharakteristik kann mit Hilfe eines "Antennaplots" dargestellt werden. Hierzu gilt es zu beachten, dass die Struktur erst simuliert werden muss und anschließend der Graph unter Berücksichtigung des Sweeps "FSAMP" als Measurement beigefügt werden kann. **Rechtsklick Graphs > New Graph > Antenna Plot > New Measurement > PPC-TPwr**

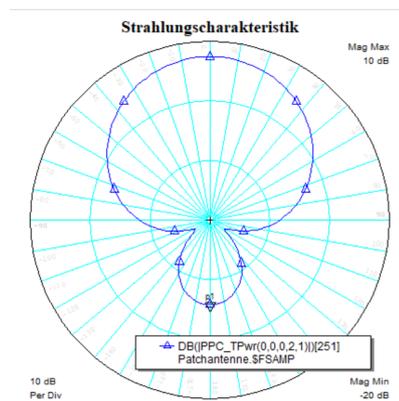


Abbildung 4.20: Polargraph, welcher die Strahlungscharakteristik der Patchantenne darstellt.

Besonders interessant ist jedoch das Zufügen von Annotations, um beispielsweise die Feldvektoren zu betrachten. Eine Annotation für die Feldvektoren kann über **Rechtsklick auf die EM-Struktur > Add Anotation > EM 3D > EM-FIELD-VEC** angelegt werden. Sollte es eine Fehlermeldung geben, da keine Daten vorliegen, muss die Struktur erneut simuliert werden, mit **Rechtsklick auf die EM-Struktur > Force Re-Simulation**

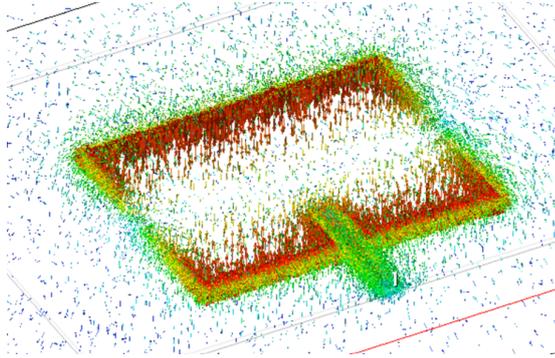


Abbildung 4.21: Darstellung der Feldvektoren nach Simulation mit der Annotation "EM-FIELD-VEC".

## 5 Bewertung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie weitere Einstellungen sich auf die Simulationsergebnisse auswirken. Neben dem Vergleich, von dem Simulationsergebnis der EM Struktur und dem physischen Nachbau der Patchantenne, erfolgt eine Analyse der Auswirkung verschiedener Sweepmethoden und der Basisfunktionen.

### 5.1 Unterschied Sweepmethoden

In dem Abschnitt 3.5 ist eine Auswahl aus den Sweepmethoden "Auto" und "Galerkin Asymptotic Wave Expansion (GAWE)" beschrieben. Um Unterschiede dieser zu untersuchen, wurde eine Simulation mit beiden Auswahlmöglichkeiten durchgeführt und festgestellt, dass Abweichungen gering sind. Im Gegensatz zu der normalen Sweepmethode konnte jedoch mit der Methode nach GAWE eine Simulationsdauer von 1.49 Minuten erreicht werden, während der diskrete Sweep eine Dauer von 5.28 Minuten benötigte.

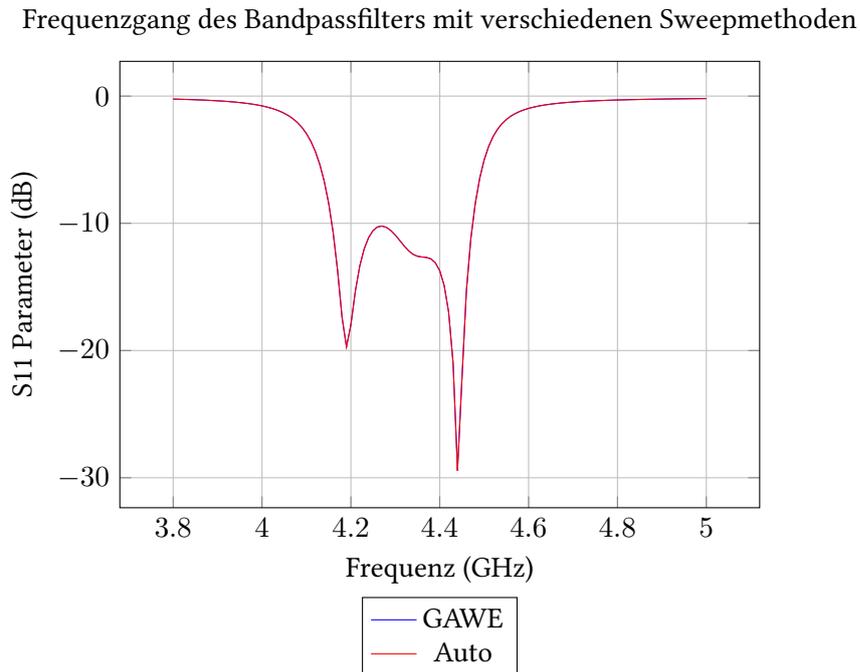


Abbildung 5.1: Frequenzgang des Bandpassfilters mit Sweepmethode GAWE und Auto. Es ist kein Unterschied erkennbar.

Die folgende Tabelle ist aus den Simulationslogs erstellt worden und zeigt sowohl Unterschiede in der Simulationszeit als auch die Anzahl der Matrixlösungen.

Sweep-Type	AMR-Zeit (min)	Gesamtzeit (min)	Matrixlösungen (MFLU)
GAWE	0.95	1.37	70
Diskret	1.08	5.28	274

Tabelle 5.1: Vergleich von GAWE und diskreter Sweepmethode

Aus den Simulationslogs geht hervor, dass der diskrete Sweep einen erheblichen Mehraufwand in dem Lösen der Matrixgleichungen betreibt. Für Strukturen, wie Streifenfilter, ist die Methode nach Galerkin ausreichend und zeitsparend. Diese Methode kann jedoch aufgrund der eingesparten Matrixlösungen Details in der Berechnung komplexerer Strukturen verlieren.

## 5.2 Unterschiede Basis Funktionen

In dem Kapitel 3.5 wurden die Basisfunktionen erläutert, welche dazu dienen, eine Interpolation der Felder in einer Meshzelle zu schaffen und diese mit Hilfe linearer Funktionen

darstellbar zu machen. Hierzu stellt AWR Microwave Office verschiedene Möglichkeiten mit unterschiedlichen Interpolationsgraden zur Verfügung. Diese unterscheiden sich, wie in Tabelle 5.2 aufgezeigt, in ihrer Simulationszeit und dem Bedarf an Rechenressourcen. Aufgrund ihrer Relevanz und dem direkten Eingriff in die Methode der finiten Elemente unterscheiden sich Simulationsergebnisse wie in Grafik 5.2 dargestellt.

Frequenzgang eines Bandpassfilters mit verschiedenen Basisfunktionen

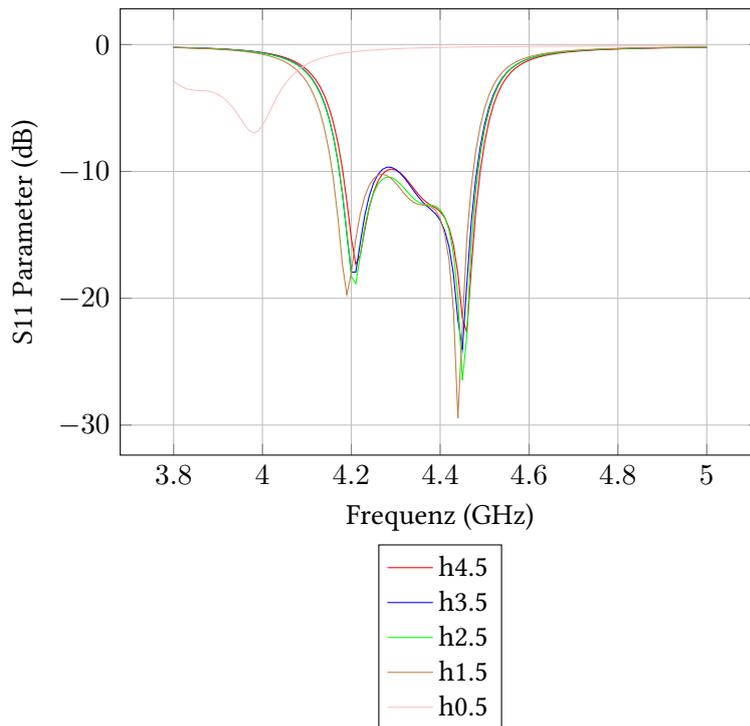


Abbildung 5.2: S11 Parameter (dB) eines Bandpassfilters für verschiedene Basisfunktionen

Der entstandene Speicherbedarf der verschiedenen Basisfunktionen ist zusammen mit der Simulationsdauer in Tabelle 5.2 eingetragen. Hier ist sichtbar, dass sich der wachsende Interpolationsgrad, bedingt durch die Wahl der Basisfunktion, unmittelbar auf Speicherbedarf und Simulationsdauer auswirkt. Mit dem Basis Set, welches den höchsten Interpolationsgrad bietet, wurde eine Simulationsdauer von 26.45 Minuten erreicht und nahezu 20 GB an Arbeitsspeicher benötigt. Eine akkurate Berechnung der Struktur konnte mit der niedrigsten Einstellung hierbei nicht erreicht werden.

Basisfunktion	RAM (MB)	Anzahl der Meshzellen	Matrix Faktor (MFLU)	Matrix Lösungen (MFLU)	Dauer (min)
h0.5	545.0	3450	8	48	0.12
h1.5	5242.8	19968	19	70	1.23
h2.5	17474.7	15719	14	60	4.46
h3.5	21236.4	9453	9	50	11.17
h4.5	20293.8	7022	6	44	26.45

Tabelle 5.2: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Basis Sets

Um detailreiche Strukturen ohne zu hohen Rechenaufwand aufzulösen oder die Felder in Meshzellen nahe an Metallkanten mit einem hohen Interpolationsgrad zu berechnen, gibt es die Möglichkeit adaptive Basisfunktionen zu verwenden. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 5.3 festgehalten. Hierbei konnte in 6.71 Minuten ein Ergebnis erreicht werden, welches sich, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, geringfügig von der fest eingestellten Basisfunktion unterscheidet. In diesem Simulationsbeispiel konnte die Effizienz durch Anpassung der Basisfunktionen erheblich verbessert werden.

Basisfunktion	RAM (MB)	Anzahl der Meshzellen	Matrix Faktor (MFLU)	Matrix Lösungen (MFLU)	Dauer (min)
c1.5	3683.2	66672	28	88	2.74
c2.5	4467.0	13517	16	64	0.92
c3.5	15152.5	10527	13	58	6.57
c4.5	13774.0	4206	8	48	6.71

Tabelle 5.3: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene adaptive Basis Sets

Simulationsergebnis mit Verwendung der Basisfunktionen h4.5 und c4.5.

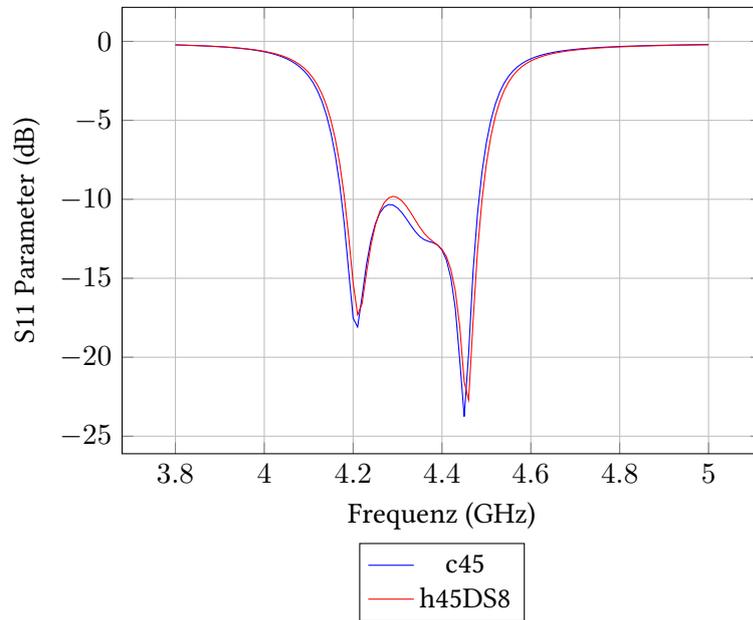


Abbildung 5.3: Vergleich der Simulationsergebnisse mit Verwendung der Basisfunktion, welche die höchste Interpolationsstufe bieten.

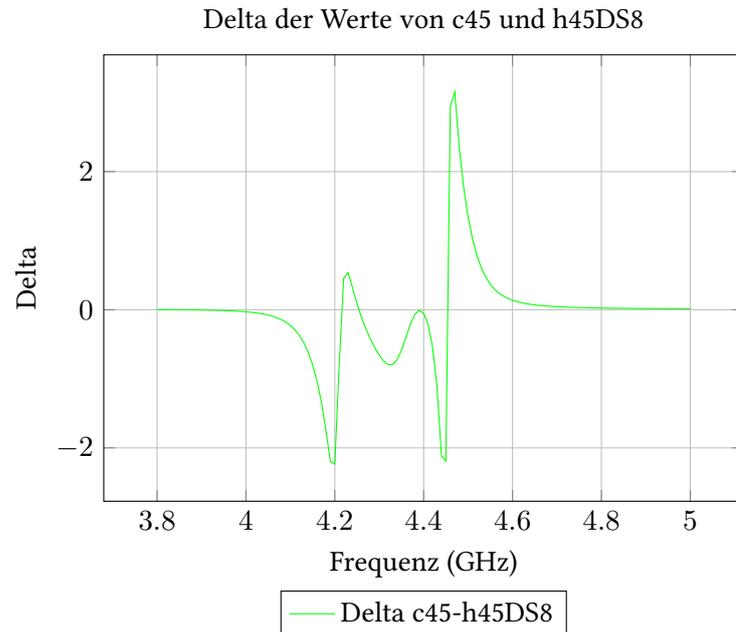


Abbildung 5.4: Darstellung des Deltas zwischen den Werten der adaptiven Basisfunktion c4.5 und der feststehenden Basisfunktion h4.5.

### 5.3 Vergleich der Patchantenne mit physischem Nachbau

Die im Kapitel 4 entworfene Patchantenne, wurde für eine Validierung der Simulationsgenauigkeit von AWR Microwave Office, mit dem Solver Analyst physisch nachgebaut und ihre Streumatrix für einen Vergleich vermessen. Der Nachbau dieser ist in der Abbildung 5.5 dargestellt. Die Antenne wurde hierbei ebenfalls in einer Antennenmesskammer vermessen, um die Strahlungscharakteristik zu erfassen.



(a) Frontansicht der gefertigten Patchantenne. (b) Rückansicht der gefertigten Patchantenne.

Abbildung 5.5: Vor- und Rückseite der gefertigten Patchantenne

Abbildung 5.6 zeigt hierbei einen sehr ähnlichen Verlauf der S11 Parameter, wie die Simulation es berechnet hat. Als Mittenfrequenz sollte bei der Auslegung 2.45 GHz getroffen werden.

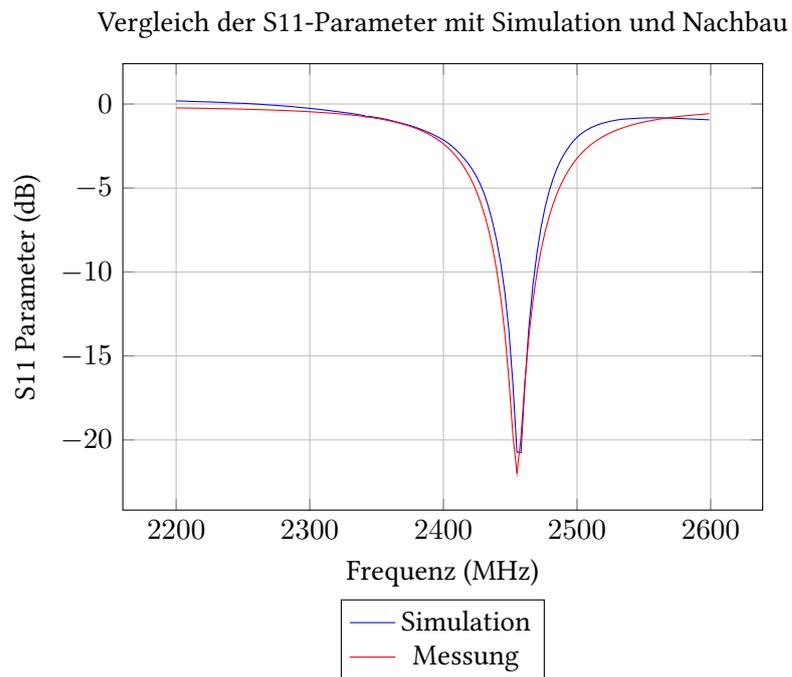


Abbildung 5.6: Graphen der simulierten und nachgebauten Patchantenne.

Größere Unterschiede ergeben sich für die Strahlungscharakteristik. Dargestellt in Abbildung 5.7 ist eine Hauptkeule, welche vom Patchelement wegstrahlt.

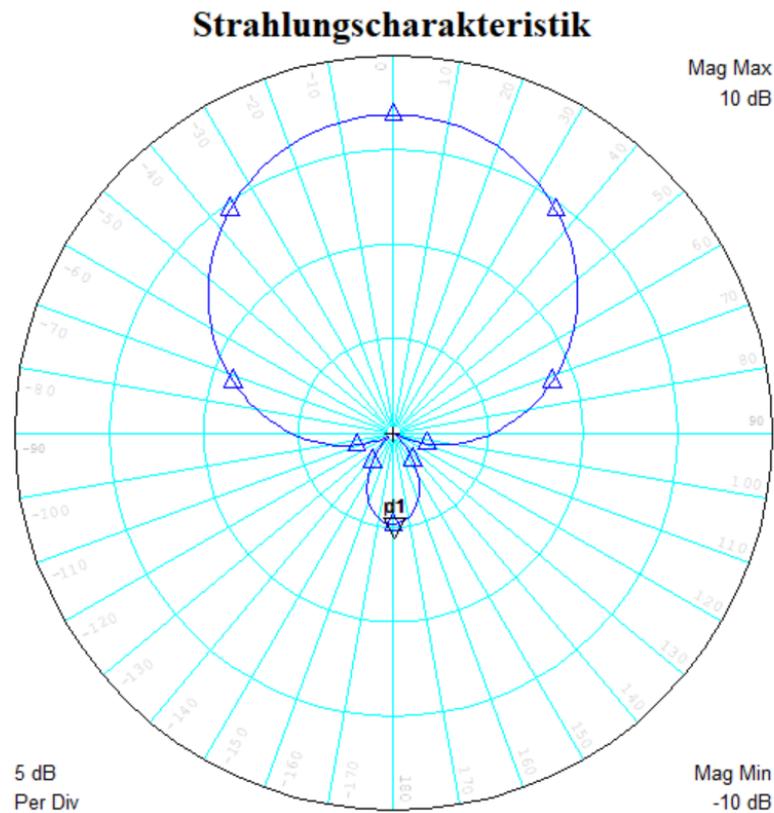


Abbildung 5.7: Strahlungscharakteristik der Patchantenne bei 2.45 GHz in der Simulationsumgebung.

In Abbildung 5.8 ist die Messung der Strahlungscharakteristik aus der Antennenmesskammer festgehalten. Eine geringe Abstrahlung gegen die Ausrichtung der Patchantenne konnte hierbei korrekt simuliert werden. Auch eine nach vorn gerichtete Hauptkeule entspricht der Erwartung, welche aus der Simulation hervorgeht.

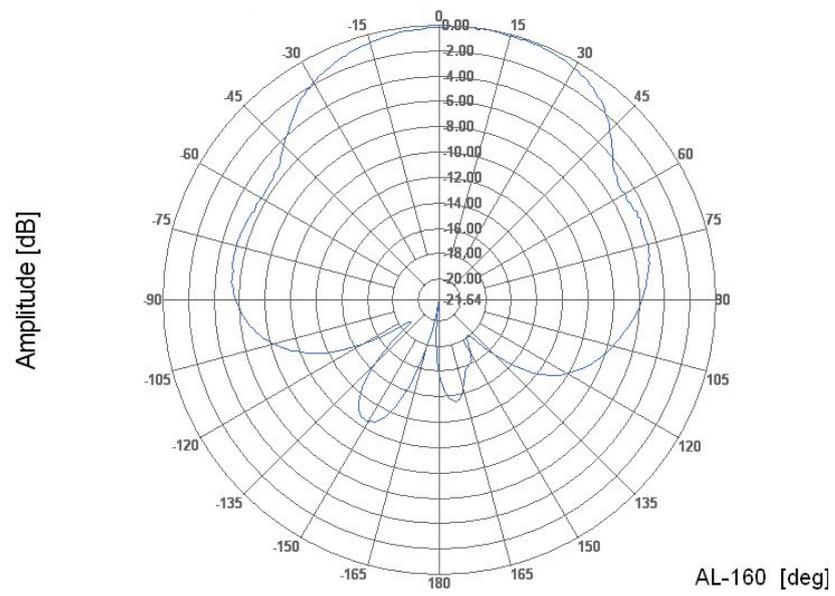


Abbildung 5.8: Strahlungscharakteristik des Nachbaus der Patchantenne bei 2.45 GHz in der Antennenmesskammer bei vertikaler Polarisation.

## 6 Schlussfolgerung mit Ausblick

In dieser Arbeit werden Aspekte der Hochfrequenzsoftware AWR Microwave Office beleuchtet, welche dem Nutzer zur Verfügung stehen, um die Feldsimulation an das entsprechende Problem anzupassen. Dabei werden Eigenheiten, wie der Lagenaufbau und das Arbeiten im 2D-Editor, kenntlich gemacht. Auch erweiterte Möglichkeiten, wie der 3D-Editor zur Erstellung volumetrischer Strukturen, werden erwähnt. Es sind dem Anwender viele Möglichkeiten bezüglich der Konfiguration wichtiger Elemente in der Simulation von Feldproblemen geboten, wodurch dieser mit den entsprechenden Freiheitsgraden umgehen muss. Die verfügbaren Optionen und die Auswirkung werden in Kapitel 3 oder 5 erklärt. Angefangen mit dem Anlegen von Materialien und die Erstellung dieser in Abschnitt 3.1, sind erste Arbeitsweisen mit AWR Microwave Office erläutert. Hierbei ist ein Augenmerk auf den Schichtenaufbau zu legen, da bei der Dimensionierung der Materialdicke eine negative Dimensionierung Vorteile im späteren Aufbau bringen kann. Die Möglichkeit bezüglich Ports sind in Kapitel 3.2 erläutert. Auch hier gibt es eine vielfältige Auswahl, welche durch differentielle Ports, Waveports und Funktionen wie de-embedding gefüllt ist. Auch Ports, welche sich nach Ground verbinden und an Kanten oder Zentren von Strukturen gelegt werden können, fehlen hier nicht. Über die Einstellungen der Boundaries in Kapitel 3.3 können die Grenzbedingungen festgelegt werden, welche neben in Simulationssoftware gängigen Optionen auch die "Perfectly Matched Layer" mit einem Wellenwiderstand von  $377 \Omega$  anbietet. Die Eigenschaften dieser Grenzbedingungen werden in Tabelle 3.2 mit ihren Nutzungshinweisen dargestellt. Da die Entwicklung des Gitternetzes einer der kritischsten Vorgänge in einer Simulation für Feldprobleme ist, wird in Abschnitt 3.4 auf diese eingegangen. Neben der Erläuterung von Konvergenzkriterien und adaptiven Algorithmen zur Bildung des Gitternetzes, ist in Tabelle 3.3 eine Reihe an möglichen Einstellungen aufgezeigt, welche den Meshingprozess beeinflussen und dabei helfen können, das Gitternetz dem zu berechnenden Problem anzupassen. Eine wichtige Rolle hierbei stellt die Meshingfrequenz, welche, wie in Abbildung 3.13 sichtbar, bei falscher Anwendung zu fehlerhaften Simulationsergebnissen führen kann. Der Solver kann mit den Einstellungen aus Tabelle 3.5 angepasst werden. Neben Aspekten wie der Sweepmethode und den Shape-functions, welche in AWR als Basis Set bekannt sind, wird auf die LU-Faktorisierung eingegangen, um ihre Wich-

tigkeit im Lösungsalgorithmus zu verdeutlichen. Durch Post-processing und Annotationen können, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, Felddarstellungen ermöglicht werden. Hierbei sind in Tabelle 3.7 alle in AWR Microwave Office verfügbaren Darstellungsmöglichkeiten aufgezeigt, welche jedoch nur in Abhängigkeit des Solvers zur Verfügung stehen. Um Rechenressourcen zu sparen, werden die in den Annotationen gezeigten Möglichkeiten nur berechnet, wenn diese vom Anwender aktiviert werden. Um einen praktischen Bezug zu schaffen, behandelt der Abschnitt 4 den Designprozess einer Patchantenne für eine Frequenz von 2.45 GHz. Diese wird im Anschluss simuliert und ist ebenfalls Gegenstand der Auswertung in Kapitel 5.3.

Durch ein praktisches Beispiel wird gezeigt, dass AWR Microwave Office ein professionelles Softwaretool ist, welches in einer Simulation die Sachverhalte der Realität widerspiegeln kann. Auch, wenn aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten die Einarbeitung anfangs schwerer vorkommt, als es bei intuitiveren Umgebungen wie CST Studio Suite der Fall ist, adaptiert man schnell an die ungewohnte Umgebung und erlangt eine effiziente Arbeitsweise im Umgang mit Feldproblemen und der Modellierung komplexerer Strukturen. Eine intuitivere Bedienoberfläche oder sogar ein Ersetzen des 2D-Editors durch eine CAD-Umgebung könnte hierbei helfen, Anwender an sich zu binden und von den Stärken dieser Software zu überzeugen. Ein weiteres spannendes Gebiet könnte die Optimierung von Algorithmen für die Bildung der Gitternetze sein, insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung und KI-gestützte Anpassungen. Als Gesamteindruck bleibt ein Softwaretool, welches viele Bereiche der Elektrotechnik abdeckt und durch Implementation vieler Teilalgorithmen dem Nutzer die Möglichkeit überlässt, die Simulationseinstellungen des Bedarfs anzupassen.

AWR Microwave Office ist ein Softwaretool, welches für die Simulation und Erstellung von Strukturen neben anderen Softwaretools zielführend verwendet werden kann. Durch etliche Freiheitsgrade in den Einstellungen und den direkten Einfluss auf Lösungsalgorithmen bietet die Software den Anspruch professionell genutzt zu werden und belohnt mit akkuraten Simulationsergebnissen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Cadence Design Systems, Inc., *AWR Design Environment Simulation and Analysis Guide*, San Jose, CA, 2022.
- [2] A. J. Schwab, W. Kürner, and A. J. Schwab, *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Springer, 1990, vol. 4.
- [3] J. M. Dunn, “Where did em simulation tools go?: A comparison of how em tools were used in circuit simulators 25 years ago to today,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 65–69, 2014.
- [4] C. M. Studio, “Cst studio suite 2013,” *Computer Simulation Technology AG*, 2013.
- [5] J. L. Volakis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, *Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*. IEEE Press, 1998.
- [6] R. Hazra and C. K. Gosh, “Mutual coupling depends on the size of wave ports,” *International Journal of Computer and Communication System Engineering*, 2014.
- [7] S. Abbasbandy, R. Ezzati, and A. Jafarian, “Lu decomposition method for solving fuzzy system of linear equations,” *Applied Mathematics and computation*, vol. 172, no. 1, pp. 633–643, 2006.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.

# Anhang

Der weitere Anhang befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden.

## **Eigenständigkeitserklärung**

*Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.*

Hamburg, 11.04.2024 Niklas Neujahr