



**HOCHSCHULE
HANNOVER**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS
–
*Fakultät I
Elektro- und
Informationstechnik*

STUDIENPROJEKT

Design und Simulation einer breitbandigen Vivaldi-Antenne mittels openEMS

Entwurf · FDTD-Simulation · Optimierung · KiCad-Layout

VORGELEGT VON

Abdellatif Ali

abdellatifibrahim405@gmail.com

Matrikelnummer: 1830082

BETREUT VON

Prof. Dr.-Ing. J. Passoke

Umfang: 5 Credits / 150 h

Projektbeginn: 08.07.2026

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Projektablauf.....	1
2. Aufgabenstellung.....	2
2.1 Punkte ohne schriftliche Festlegung.....	2
3. Theoretische Grundlagen.....	3
3.1 Tapered-Slot- und Vivaldi-Antennen.....	3
3.2 Exponentielles Taper-Profil.....	3
3.3 Koplanare Speisung (CPW) und Übergang zur Schlitzleitung.....	3
3.4 FDTD-Grundlagen.....	3
3.5 S-Parameter und Anpassungskriterium.....	3
3.6 Fernfeldgrößen.....	3
4. Design der Vivaldi-Antenne.....	4
4.1 Startdimensionen.....	4
4.2 Dokumentierte Annahmen für die offenen Punkte.....	4
5. Simulation mit OpenEMS.....	4
5.1 Werkzeugkette.....	4
5.2 Modellaufbau.....	5
5.3 Numerische Probleme und deren Behebung.....	5
6. Optimierung.....	6
6.1 Taper-Länge.....	6
6.2 Aperturweite.....	6
6.3 Automatisierter Parametersweep.....	6
6.4 Finales Design und bestätigte Ergebnisse.....	7
7. Layout mit KiCad.....	10
7.1 Design Rule Check (DRC).....	11
7.2 Gerber-Export.....	11
8. Messung.....	12
9. Vergleich Simulation/Messung.....	12
10. Diskussion.....	12
11. Fazit.....	13
12. KI-Nutzung.....	14
13. Literaturverzeichnis.....	14

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geometriekontrolle des finalen Modells (orange: Speiseleiter, grau: Massefläche, rot: Port)...	5
Abbildung 2: Reflexionsfaktor S_{11} des finalen Designs (verifiziert aus den Rohdaten des Ports).....	8
Abbildung 3: Eingangsimpedanz Z_{in} des finalen Designs über den simulierten Frequenzbereich.....	8
Abbildung 4: Fernfelddiagramm (polar) bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).....	9
Abbildung 5: Fernfelddiagramm in dB bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).....	9
Abbildung 6: 3D-Strahlungsdiagramm bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).....	10
Abbildung 7: KiCad-Platinenlayout (maßstabsgetreu aus den Simulationsdaten generiert).....	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektphasen seit Projektbeginn (08.07.2026), chronologische Reihenfolge.....	1
Tabelle 2: Ausgangsdimensionen des ersten Vivaldi-Modells vor der Parameteroptimierung.....	4
Tabelle 3: Ergebnisse des automatisierten Parametersweeps (Explorationsnetz, begrenzte Zeitschrittzahl).	6
Tabelle 4: Finale Designparameter des optimierten Vivaldi-Antennenmodells.....	7
Tabelle 5: Numerisch verifizierte Kenngrößen des finalen Designs.....	7
Tabelle 6: Kenngrößen für den Vergleich zwischen Simulation und Messung gemäß Aufgabenstellung.....	12
Tabelle 7: Übersicht der KI-gestützten Unterstützungskategorien im Projektverlauf.....	14

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CPW	Coplanar Waveguide (koplanare Leitung)
DRC	Design Rule Check
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FG	Fachgebiet
FR4	Flame Retardant 4 (Glasfaser-Epoxid-Substrat)
NF2FF	Near-Field-to-Far-Field (Nahfeld-Fernfeld-Transformation)
PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)
SMA	SubMiniature version A (HF-Steckverbinder)
TSA	Tapered Slot Antenna
VNA	Vector Network Analyzer (vektorieller Netzwerkanalysator)

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
L (taper.L)	mm	Taper-Länge
ya (taper.ya)	mm	halbe Aperturweite
y0 (taper.y0)	mm	halbe Schlitzweite am throat
R (taper.R)	1/mm	Taper-Rate
Wcpw	mm	CPW-Mittelleiterbreite
g	mm	CPW-Massespalt
ϵ_r	-	relative Permittivität
$\tan \delta$	-	dielektrischer Verlustfaktor
S11	dB	Reflexionsfaktor
Zin	Ω	Eingangsimpedanz
Dmax	dBi	maximale Direktivität
η_{rad}	%	Strahlungswirkungsgrad

1. Einleitung

Breitbandige planare Antennen mit kontinuierlicher Anpassung über einen weiten Frequenzbereich sind unter anderem für Breitband-Kommunikation, Radar- und EMV-Messtechnik von Interesse. Die Vivaldi-Antenne – eine Tapered-Slot-Antenne (TSA) mit exponentiell aufgeweiteter Schlitzleitung – gilt als klassische Realisierung eines solchen breitbandigen Strahlers, da sich ihre Impedanz im Idealfall kontinuierlich vom Speisepunkt zum freien Raum transformiert, ohne diskrete Resonanzstrukturen.

Im Rahmen dieses Studienprojekts (5 Credits, 150 h, Betreuer Prof. Dr.-Ing. J. Passoke, Projektbeginn: 08.07.2026) wurde eine planare, koplanar gespeiste Vivaldi-Antenne auf FR4-Substrat entworfen, mittels der Open-Source-FDTD-Software openEMS (angesteuert über GNU Octave) simuliert, hinsichtlich Reflexionsfaktor S_{11} untersucht und optimiert, als Leiterplattenlayout in KiCad übertragen und als Gerber-Datensatz für die mögliche Fertigung am Fachgebiet (FG) vorbereitet.

Der vorliegende Bericht dokumentiert den vollständigen Entwicklungsprozess von der Interpretation der Aufgabenstellung über den Modellaufbau, die Simulation, die systematische Fehlersuche und die Parameterstudien bis zum finalen Simulationsergebnis, dem KiCad-Layout, der DRC-Prüfung und dem Gerber-Export. Fertigung und messtechnische Verifikation sind in der Aufgabenstellung als möglicher Folgeschritt am Fachgebiet vorgesehen; Kapitel 8 und 9 ordnen diesen Aspekt entsprechend ein.

Ziel gemäß Aufgabenstellung ist eine möglichst breitbandige Anpassung ab 850 MHz. Wie in Kapitel 6 und 10 dargestellt, wird im simulierten Modell an der unteren Bandkante (850 MHz) ein Reflexionsfaktor $S_{11} < -10$ dB erreicht; eine durchgängige Anpassung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich wurde im Rahmen der verfügbaren Projektzeit nicht erzielt. Dieses Ergebnis wird in Kapitel 10 als technischer Befund eingeordnet, nicht beschönigt.

1.1 Projektablauf

Die Bearbeitung des Projekts begann am 08.07.2026. Die Arbeit gliederte sich in die folgenden, chronologisch aufeinanderfolgenden Phasen:

Tabelle 1: Projektphasen seit Projektbeginn (08.07.2026), chronologische Reihenfolge.

Phase	Projektabschnitt	Wesentliche Tätigkeiten
1. Einarbeitung	Abschnitt 1	Analyse der Aufgabenstellung, Literaturrecherche zu Vivaldi-/TSA-Antennen, Sichtung der FR4-Randbedingungen
2. Werkzeugkette	Abschnitt 2	Installation und Verifikation von openEMS/CSXCAD/Octave, Testläufe mit Referenzstrukturen
3. Erstes Modell	Abschnitt 3	Aufbau des ersten Vivaldi-Modells (CPW-Speisung, Taper-Geometrie, Lumped Port)
4. Fehlersuche	Abschnitt 4	Diagnose und Behebung von Kurzschluss-, Netzlinien- und Zeitschrittproblemen (Abschnitt 5.3)
5. Parameterstudien	Abschnitt 5	Systematische Variation von Taper-Länge, Aperturweite und Taper-Rate, automatisierter Parametersweep
6. Finale Simulation	Abschnitt 6	Bestätigungssimulation mit feinem Netz, Auswertung von S_{11} , Zin und Fernfeld

Phase	Projektabschnitt	Wesentliche Tätigkeiten
7. KiCad/Gerber	Abschnitt 7	Layoutübertragung, Footprint-Platzierung, DRC-Prüfung, Gerber-Export
8. Berichterstellung	Abschnitt 8	Verfassen, Layout und fachliche Schlussprüfung des Berichts

Diese Einteilung stellt eine sachliche Zusammenfassung der bearbeiteten Themenblöcke in ihrer chronologischen Reihenfolge dar; ein minutengenaues Stundenprotokoll und ein offizielles Abschlussdatum wurden nicht festgehalten. Der Gesamtumfang entspricht der Vorgabe von 5 Credits / 150 h.

2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung von Prof. Dr.-Ing. J. Passoke („Design einer Breitband-Antenne“) [5] definiert den Kern der Aufgabe wie folgt: ein Modell einer planaren breitbandigen Vivaldi-Antenne zu entwerfen, die Antenneneigenschaften mittels openEMS/Octave zu berechnen und mit einer Messung zu vergleichen. Für das abschließende Design soll mittels KiCad ein Layout erstellt und als Gerberfile am Fachgebiet abgegeben werden. Die Leiterplattenantenne kann auf dieser Basis am Fachgebiet gefräst und anschließend vermessen werden. Die HF-Anschlüsse sollen in 50-Ω-SMA-Technik ausgeführt werden.

Randbedingungen des Substrats [6]: FR4, Dicke 1 mm, $\epsilon_r = 4,3$, $\tan \delta = 0,023$. Designziel ist eine möglichst kleine Struktur. Von besonderer Bedeutung ist gegebenenfalls (laut Aufgabenstellung: „eventuell“) das Design eines Baluns zur Symmetrierung des unsymmetrischen Koaxialsignals; dessen Notwendigkeit wird in der Aufgabenstellung nicht zwingend vorausgesetzt.

Die Nutzung von KI-Werkzeugen als Designhilfe ist ausdrücklich erlaubt und im Projektbericht mit der jeweiligen Fragestellung anzugeben (siehe Kapitel 12). Die Aufgabenstellung schließt mit dem Hinweis, dass weitere Angaben mündlich erfolgen – mehrere Details sind also bewusst nicht schriftlich fixiert.

2.1 Punkte ohne schriftliche Festlegung

Die folgenden vier Punkte werden in der Aufgabenstellung nicht explizit spezifiziert und wurden im Projektverlauf nicht mit dem Betreuer mündlich geklärt. Sie werden hier als offene Annahmen benannt, nicht als bestätigte Vorgaben:

- obere Grenzfrequenz des Zielbands (angenommen: 2000 MHz, siehe 4.2),
- maximale Platinengröße bzw. verfügbares FR4-Format,
- exakter SMA-Steckverbindertyp,
- ob ein Balun im konkreten Fall zwingend erforderlich ist.

Zur Formulierungsgenauigkeit: Die Aufgabenstellung verwendet für die Fertigung/Messung die Formulierung „kann ... gefräst und anschließend vermessen werden“ (Modalverb „kann“), während sie für das KiCad-Layout und den Gerber-Export „soll ... erstellt und ... abgegeben werden“ verwendet (Modalverb „soll“). Dieser Bericht übernimmt diese Unterscheidung wörtlich und stellt Fertigung/Messung nicht als unbedingt verbindliche Vorgabe dar, sondern als in der Aufgabenstellung vorgesehenen möglichen Folgeschritt am Fachgebiet.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Tapered-Slot- und Vivaldi-Antennen

Die Vivaldi-Antenne gehört zur Klasse der Tapered-Slot-Antennen (TSA), ursprünglich von Gibson vorgestellt [1]. Ihr Wirkprinzip beruht auf einer sich kontinuierlich öffnenden Schlitzleitung: Am schmalen Ende („throat“) liegt eine definierte Leitungsimpedanz vor, die sich über die Taper-Länge L in die Wellenimpedanz des freien Raums transformiert. Ist die Taper-Länge elektrisch hinreichend groß und die Aperturweite in der Größenordnung einer halben Wellenlänge, wirkt die Struktur im Idealfall als Wanderwellenantenne mit breitbandiger Anpassung.

3.2 Exponentielles Taper-Profil

Die in diesem Projekt verwendete Kontur der Massefläche folgt einem exponentiellen Profil

$$y(x) = C_1 \cdot e^{Rx} + C_2, \quad 0 \leq x \leq L$$

mit den Randbedingungen $y(0) = y_0$ (halbe Schlitzweite am throat) und $y(L) = y_a$ (halbe Aperturweite). Daraus folgen

$$C_1 = (y_a - y_0)/(e^{RL} - 1), \quad C_2 = (y_0 \cdot e^{RL} - y_a)/(e^{RL} - 1).$$

Die Taper-Rate R bestimmt, wie abrupt sich die Kontur zum Aperturende hin öffnet.

3.3 Koplanare Speisung (CPW) und Übergang zur Schlitzleitung

Die Antenne wird über eine koplanare Leitung (CPW) gespeist: ein Mittelleiter der Breite W_{cpw} mit beidseitigem Massespalt der Breite g auf derselben Kupferlage. Am Übergang zum Taper endet der Mittelleiter, und die Energie koppelt in den Schlitzleitungsmodus zwischen den beiden Masseflügeln ein. Dieser Übergang ist geometrisch kritisch, wie in Abschnitt 5.3 anhand eines konkreten Modellierungsfehlers gezeigt wird.

3.4 FDTD-Grundlagen

openEMS löst die Maxwell-Gleichungen im Zeitbereich auf einem Yee-Gitter (Finite-Difference Time-Domain). Die Struktur wird mit einem Gauß-Puls angeregt; Zeitbereichsgrößen an einem Port werden anschließend per Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Die numerische Stabilität ist an die Courant-Bedingung geknüpft: Der Zeitschritt ist durch die kleinste Zellgröße im Rechengitter nach oben begrenzt. Abschnitt 5.3 beschreibt einen Fall, in dem diese Randbedingung durch ein numerisches Artefakt praktisch verletzt wurde.

3.5 S-Parameter und Anpassungskriterium

Der Reflexionsfaktor S_{11} beschreibt das Verhältnis reflektierter zu einfallender Wellenamplitude am Speisepunkt. Das Kriterium $S_{11} < -10$ dB entspricht $|\Gamma| < 0,316$, also einer Leistungsanpassung von mindestens 90 % [4]. Für das im Modell verwendete Lumped-Port-Modell mit Referenzimpedanz Z_0 gilt $U_{f,inc} = \frac{1}{2}(U_{f,tot} + Z_0 I_{f,tot})$ und $U_{f,ref} = U_{f,tot} - U_{f,inc}$, woraus $S_{11} = U_{f,ref}/U_{f,inc}$ und $Z_{in} = U_{f,tot}/I_{f,tot}$ folgen.

3.6 Fernfeldgrößen

Aus dem Nahfeld wird per Nahfeld-Fernfeld-Transformation (NF2FF) das Strahlungsdiagramm berechnet. Direktivität D_{max} beschreibt die Richtwirkung relativ zum isotropen Kugelstrahler, der

Strahlungswirkungsgrad η_{rad} das Verhältnis von abgestrahlter zu eingespeister Leistung; der Antennengewinn ergibt sich als Produkt aus Direktivität und Wirkungsgrad [4].

4. Design der Vivaldi-Antenne

4.1 Startdimensionen

Als Ausgangspunkt dienten Schätzwerte für eine Vivaldi-Struktur im GHz-Bereich auf 1-mm-FR4:

Tabelle 2: Ausgangsdimensionen des ersten Vivaldi-Modells vor der Parameteroptimierung.

Parameter	Startwert	Bedeutung
board.length	150 mm	Platinenlänge (Taper-Richtung)
board.width	120 mm	Platinenbreite
taper.L	130 mm	Taper-Länge (throat → Apertur)
taper.y0	1,0 mm	halbe Schlitzweite am throat
taper.ya	50 mm	halbe Aperturweite
taper.R	0,023 /mm	Taper-Rate
Wcpw (cpw.center_w)	3,0 mm	CPW-Mittelleiterbreite
g (cpw.gap)	0,4 mm	CPW-Massespalt

4.2 Dokumentierte Annahmen für die offenen Punkte

Da die in 2.1 genannten Punkte nicht mündlich geklärt wurden, gelten für die im Folgenden dargestellte Simulation und das Layout folgende Annahmen, die vor einer Fertigung mit dem Betreuer bestätigt werden sollten:

- Obere Grenzfrequenz des Simulationsbands: 2000 MHz (eigene Annahme, im Aufgabenblatt nicht spezifiziert).
- Maximale Platinengröße: keine Vorgabe bekannt; das finale Design (160 × 275 mm, Kapitel 6) liegt über einer zunächst angenommenen Richtgröße von ca. 200 × 150 mm und sollte vor Fertigung mit dem Fachgebiet hinsichtlich Materialverfügbarkeit abgestimmt werden.
- SMA-Steckertyp: mangels Vorgabe wurde ein generischer Edge-Launch-Steckverbinder (Amphenol 132289, KiCad-Footprint SMA_Amphenol_132289_EdgeMount) für Layout und Platzierung angenommen.
- Balun: Es wurde die einfachere koplanar gespeiste Variante ohne separate Balun-Struktur gewählt, da die Aufgabenstellung einen Balun nur als „eventuell“ von Bedeutung nennt, nicht als zwingende Vorgabe.

5. Simulation mit OpenEMS

5.1 Werkzeugkette

Die Simulation erfolgte mit openEMS v0.0.36 und CSXCAD [2], angesteuert über GNU Octave (octave-cli) unter macOS auf Apple-Silicon-Hardware. Auf eine grafische Geometrievorschau via

AppCSXCAD/QCSXCAD wurde aus Installationsgründen verzichtet; ersatzweise wurde vor jeder Simulation eine native, in Octave erzeugte 2D-Kontrollgrafik der Kupfergeometrie generiert (Abbildung 1).

5.2 Modellaufbau

Das Modell besteht aus einer FR4-Substratbox ($\epsilon_r = 4,3$, κ aus $\tan \delta$ bei Bandmittenfrequenz), einer CPW-Speiseleitung, zwei gespiegelten Polygonen für die Taper-Masseflächen, einem Lumped Port über dem CPW-Spalt am Speiseende (Referenzimpedanz 50Ω), einem per DetectEdges/SmoothMesh erzeugten Rechteckgitter sowie einer NF2FF-Box innerhalb der MUR-Randbedingung.

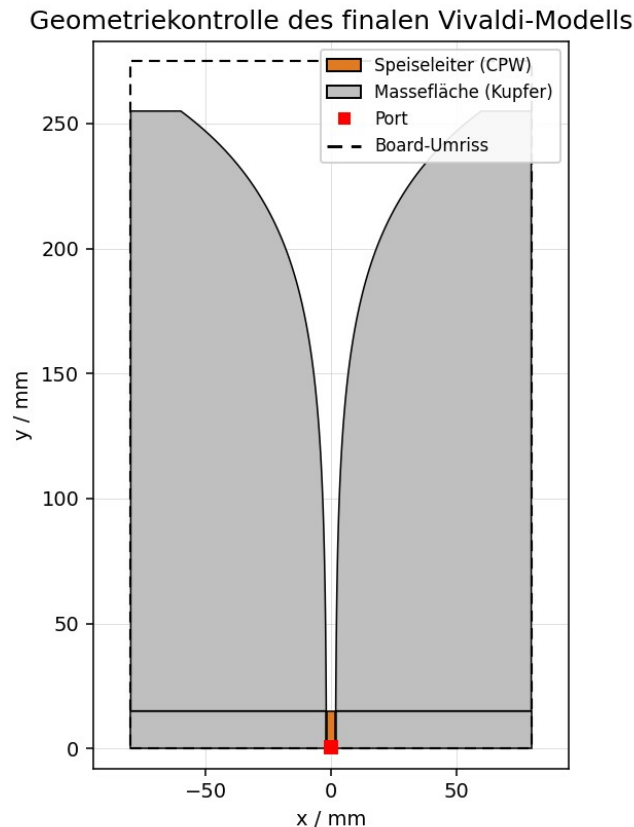


Abbildung 1: Geometriekontrolle des finalen Modells (orange: Speiseleiter, grau: Massefläche, rot: Port).

5.3 Numerische Probleme und deren Behebung

Im Verlauf der Modellentwicklung traten drei voneinander unabhängige numerische Probleme auf, deren Behebung Voraussetzung für belastbare Ergebnisse war.

5.3.1 Kurzschluss am Throat/Taper-Übergang

Der Parameter taper.y0 war zunächst unabhängig von der CPW-Geometrie mit 1,0 mm belegt. Da die Massefläche im Speiseabschnitt erst bei $x = W_{cpw}/2 + g = 1,9 \text{ mm}$ beginnt, sprang die Massekontur am Übergang von throat zu Taper unstetig auf $x = 1,0 \text{ mm}$ zurück – näher an die Mittelachse als das offene Ende des 1,5 mm breiten Mittelleiters. Dies erzeugte eine physische Überlappung zwischen Masse und Speiseleiter genau an der Anregungsstelle, erkennbar an S_{11} nahe 0 dB über das gesamte Band. Behoben durch $taper.y0 = W_{cpw}/2 + g$, wodurch die Massekontur stetig an den CPW-Spalt anschließt.

5.3.2 Kollaps des Zeitschritts durch Gleitkomma-Rundung

Nach Behebung des Kurzschlusses zeigte eine Folgesimulation eine unplausible FDTD-Zeitschrittweite von ca. $6 \cdot 10^{-20}$ s (erwartet: $\approx 10^{-12} - 10^{-13}$ s). Die Diagnose der Netzlinienabstände ergab einen minimalen Abstand von $4,4 \cdot 10^{-16}$ mm zwischen zwei rechnerisch identischen, aber durch Rundungsfehler in der Exponentialfunktion geringfügig unterschiedlichen Koordinaten. Als Abhilfe wurden Netzlinien mit einem Abstand unterhalb einer Toleranz (0,01 mm) vor Übergabe an DefineRectGrid zusammengeführt.

5.3.3 Rechenzeit-Explosion in der Netzglättung

Bei größeren Geometrien blieb der rekursive Glättungsalgorithmus von SmoothMesh wiederholt bei hoher CPU-Last ohne Ausgabe hängen. Durch Reduktion der Taper-Abtastpunkte ($N = 60$ auf $N = 10$) sowie Vorfilterung eng benachbarter Kanten konnte dieses Verhalten vermieden werden; einzelne Simulationsläufe reduzierten sich dadurch auf 25–80 Sekunden bei vollständiger numerischer Konvergenz.

6. Optimierung

Die Optimierung erfolgte in der Reihenfolge 1) Taper-Länge L, 2) Aperturweite ya, 3) Taper-Rate R, mit jeweils nur einem geänderten Parameter pro Iteration.

6.1 Taper-Länge

Ausgehend von $L = 130$ mm (zwei schmale Resonanzdips bei ca. 800 MHz und 1480 MHz, $S_{11} \approx -1$ dB direkt bei 850 MHz) wurde L schrittweise auf 160, 200 und 240 mm erhöht. Jede Vergrößerung verschob und vertiefte die Resonanzen, ohne eine durchgängige Breitbandanpassung zu erzeugen.

6.2 Aperturweite

Eine Vergrößerung von ya auf 70 mm (bei Board-Verbreiterung auf 160 mm) führte in Kombination mit reduzierter Taper-Rate ($R = 0,014$ bzw. $0,018$) zu numerischer Instabilität: Die FDTD-Energie stieg über mehrere Millionen Zeitschritte an, statt abzuklingen. Bei $R = 0,023$ war diese Kombination numerisch stabil, ergab jedoch ein schlechteres S_{11} als mit $ya = 50$ mm; die Aperturvergrößerung wurde daher nicht weiterverfolgt.

6.3 Automatisierter Parametersweep

Ein automatisiertes Sweep-Skript testete sechs (L, ya)-Kombinationen mit reduziertem Netz (Explorationsmodus):

Tabelle 3: Ergebnisse des automatisierten Parametersweeps (Explorationsnetz, begrenzte Zeitschrittzahl).

taper.L (mm)	taper.ya (mm)	Schlechtester S11 im Band (dB)	Tiefster Dip (dB)	bei f (MHz)
240	60	-3,18	-13,54	843
200	50	-3,16	-18,88	972
240	50	-2,79	-16,59	860
200	60	-1,86	-8,28	1501
160	50	-1,35	-13,89	597

taper.L (mm)	taper.ya (mm)	Schlechtester S11 im Band (dB)	Tiefster Dip (dB)	bei f (MHz)
160	60	-1,31	-7,56	1162

Keine der sechs Kombinationen erreichte $S_{11} < -10$ dB durchgängig über 850–2000 MHz. $L = 240$ mm, $y_a = 60$ mm zeigte den besten Worst-Case-Wert und wurde als finales Design mit verfeinertem Netz bestätigt.

6.4 Finales Design und bestätigte Ergebnisse

Tabelle 4: Finale Designparameter des optimierten Vivaldi-Antennenmodells.

Parameter	Finaler Wert
board.length × board.width	275 mm × 160 mm
taper.L	240 mm
taper.ya	60 mm
taper.y0	1,9 mm
taper.R	0,023 /mm
feed.throat_run	15 mm
Wcpw / g	3,0 mm / 0,4 mm
Substrat	FR4, 1 mm, $\epsilon_r = 4,3$, $\tan\delta = 0,023$

Die finale Bestätigungssimulation (feineres Netz, volle Zeitschrittzahl) konvergierte auf -51,19 dB Energieabklingen nach 102.168 Zeitschritten (76,9 s Rechenzeit, 274.209 FDTD-Zellen). Die aus den rohen Zeitbereichsdaten des Ports (port_ut1, port_it1) mit demselben Verfahren wie calcPort (Abschnitt 3.5) unabhängig nachgerechneten Kenngrößen:

Tabelle 5: Numerisch verifizierte Kenngrößen des finalen Designs.

Kenngröße	Wert
S11 bei 850 MHz	-13,05 dB
Resonanz 1	852,6 MHz, -13,05 dB
Resonanz 2	1290,5 MHz, -12,07 dB
Resonanz 3	1758,8 MHz, -9,39 dB
S11 < -10 dB im Bereich	829–876 MHz und 1255–1324 MHz
Schlechtester S11 im Band 850–2000 MHz	-3,13 dB bei 1035 MHz
Anteil des Bandes mit S11 < -10 dB	≈ 8,5 %
Zin bei 850 MHz	50,7 - j23,0 Ω
Direktivität Dmax	2,15 (3,32 dBi)
Wirkungsgrad η_{rad}	87,0 %

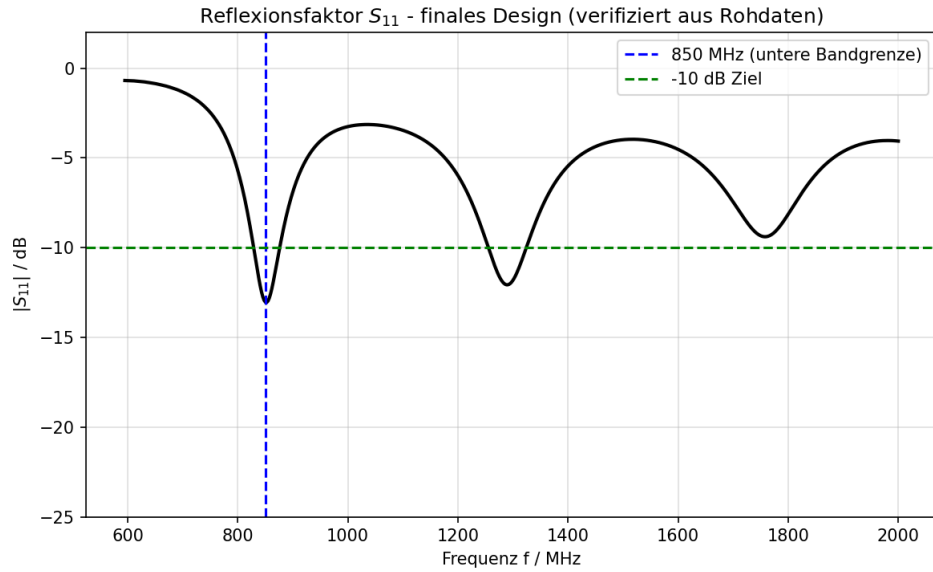


Abbildung 2: Reflexionsfaktor S_{11} des finalen Designs (verifiziert aus den Rohdaten des Ports).

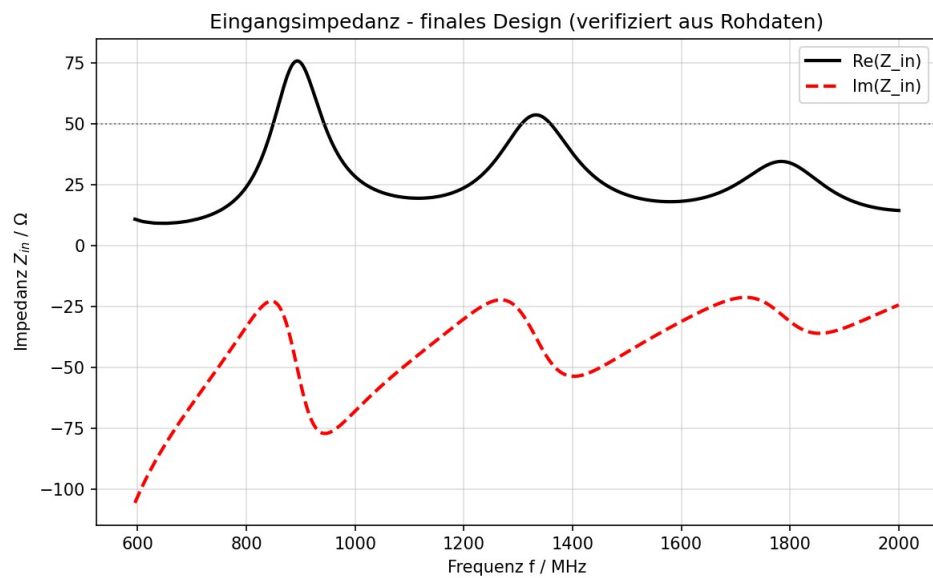


Abbildung 3: Eingangsimpedanz Z_{in} des finalen Designs über den simulierten Frequenzbereich.

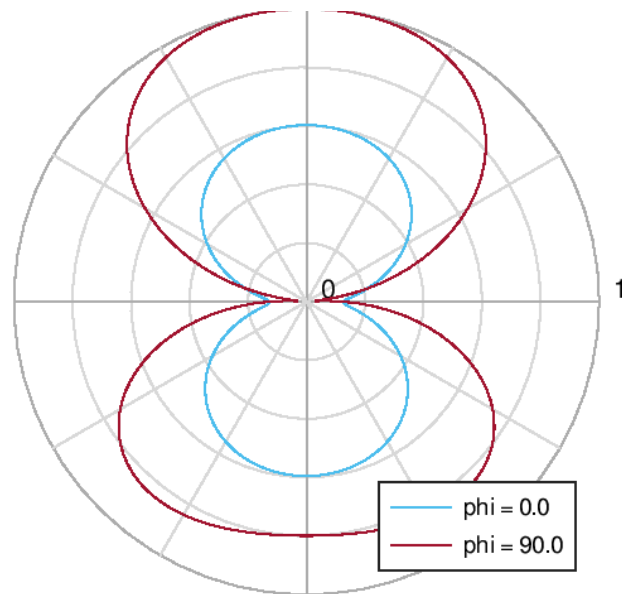


Abbildung 4: Fernfelddiagramm (polar) bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).

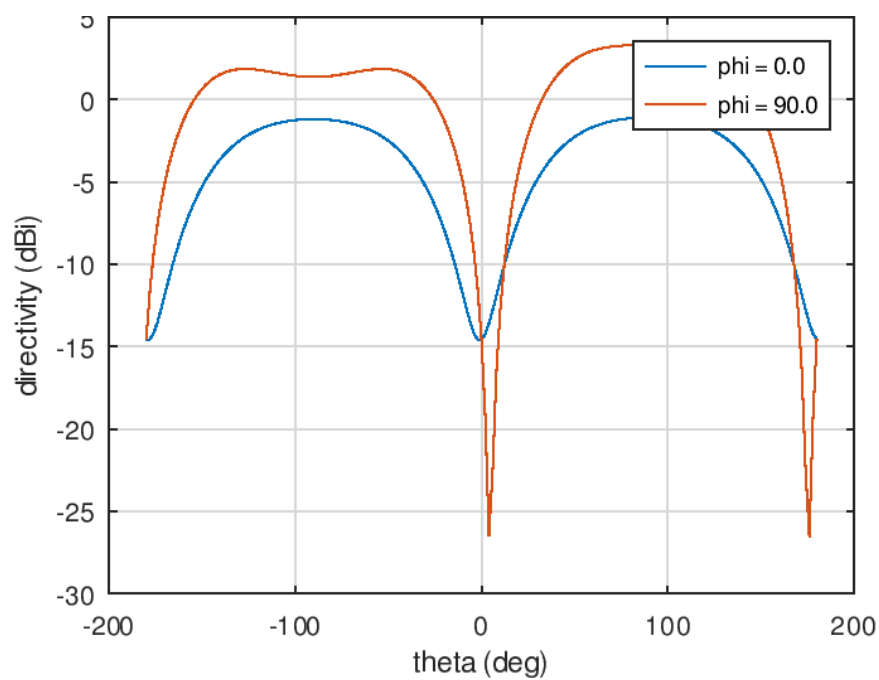


Abbildung 5: Fernfelddiagramm in dB bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).

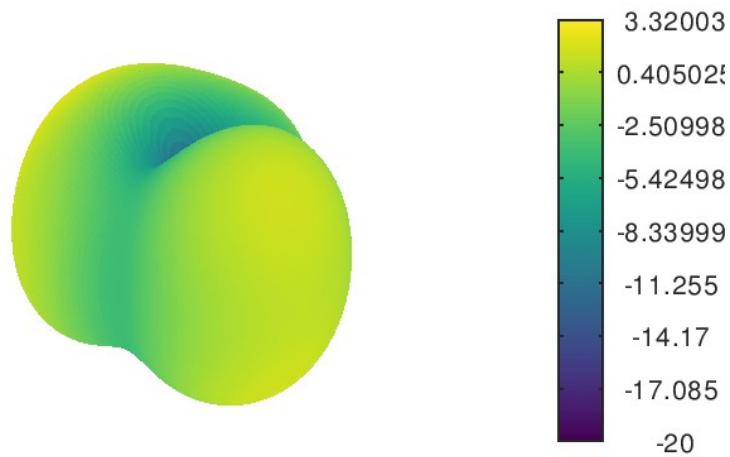


Abbildung 6: 3D-Strahlungsdiagramm bei der Resonanzfrequenz (852,6 MHz).

7. Layout mit KiCad

Um Übereinstimmung zwischen simulierter und gefertigter Geometrie sicherzustellen, wurde die Kupferkontur nicht von Hand nachgezeichnet, sondern aus denselben Taper-Formeln (3.2/4.1) als SVG-Datei exportiert und in KiCad [3] importiert (File → Import → Graphics, Maßstab 1:1): der Board-Umriss auf Edge.Cuts, die Kupferkontur auf F.Cu.

Als Speisepunkt wurde ein SMA-Edge-Launch-Steckverbinder (Footprint SMA_Amphenol_132289_EdgeMount) platziert, mit dem Mittelpin exakt auf den CPW-Spalt ausgerichtet (Position X = 80 mm, Y = 0 mm, Rotation 90°).

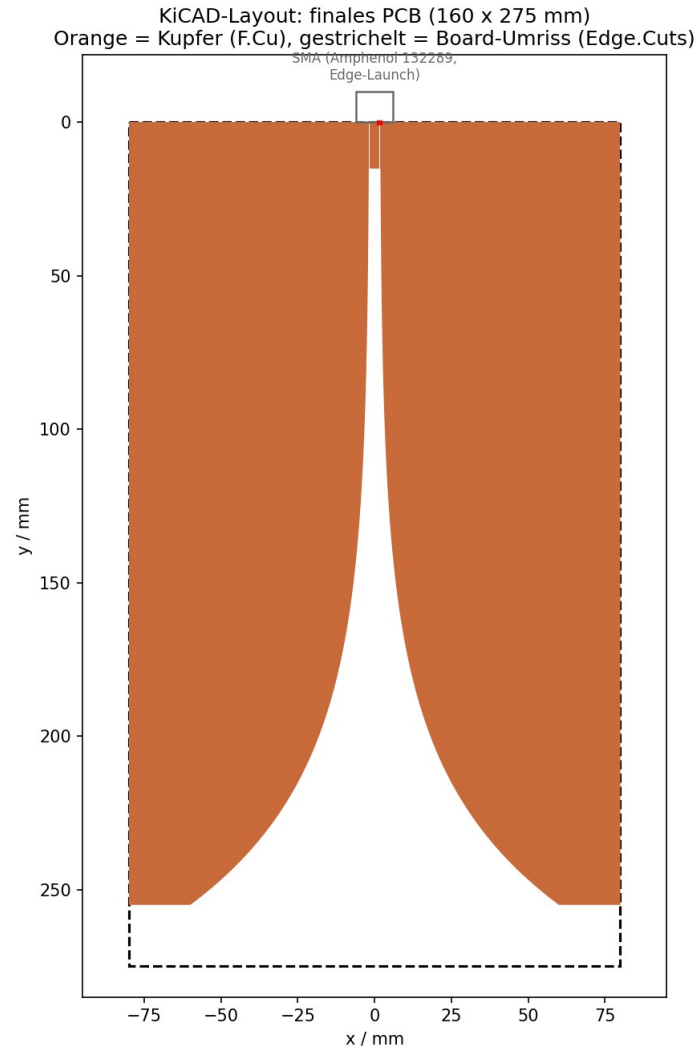


Abbildung 7: KiCad-Platinenlayout (maßstabsgetreu aus den Simulationsdaten generiert).

7.1 Design Rule Check (DRC)

Der DRC meldete 13 Hinweise, die im Kontext dieses Layouts als unkritisch bewertet werden: Meldungen zu Netz-Kurzschlüssen entstehen ausschließlich, weil die Kupfergeometrie als Grafik ohne Schaltplan-Netzliste importiert wurde – das Design besteht aus einer einzigen zusammenhängenden Kupferfläche ohne diskrete Bauteile. Meldungen zur Randfreihaltung entstehen, weil die Massefläche im simulierten Modell bewusst bis an den Platinenrand reicht (0 mm Abstand, im Board-Setup entsprechend konfiguriert) und weil Anschlussflächen des Edge-Launch-Steckverbinders konstruktionsbedingt am Rand liegen.

7.2 Gerber-Export

Exportiert wurden (Koordinatenformat 4.6, mm, X2-Format): F_Cu, B_Cu, F_Mask, B_Mask, F_Silkscreen, B_Silkscreen, Edge_Cuts, job.gbrjob sowie die Bohrdateien PTH.drl und NPTH.drl (Excellon). Alle Dateien wurden zu Vivaldi_PCB_Gerber_Export.zip zusammengefasst und liegen vorbereitet zur Übergabe an das Fachgebiet vor.

8. Messung

Gemäß Aufgabenstellung kann die Leiterplattenantenne auf Basis der in Kapitel 7 vorbereiteten Gerber-Daten am Fachgebiet gefräst und anschließend mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) vermessen werden; dieser Schritt ist dort als möglicher Folgeschritt vorgesehen und hängt von der Abstimmung mit dem Fachgebiet ab. Im Rahmen dieses Berichts liegen entsprechend noch keine Messdaten vor; die folgenden Abschnitte beschreiben das dafür vorgesehene Messverfahren.

Vorgesehenes Vorgehen für die Messung: Kalibrierung des Netzwerkanalysators (z. B. SOLT-Verfahren) auf die Referenzebene des SMA-Steckverbinders; Messung von $|S_{11}|$ über den Frequenzbereich 595–2000 MHz, identisch zum simulierten Bereich; Dokumentation von Gerätebezeichnung, Kalibrierstandard und Messaufbau.

9. Vergleich Simulation/Messung

Die Aufgabenstellung sieht einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Antenneneigenschaften vor. Für diesen Vergleich sind insbesondere die –10-dB-Grenzfrequenzen, die Lage und Tiefe der Resonanzen sowie die Eingangsimpedanz bei 850 MHz relevant. Erwartbare Abweichungen zwischen Simulation und Messung ergäben sich u. a. aus Steckerparasitik, Fertigungstoleranzen der feinen Taper-Kontur und Abweichungen der realen FR4-Materialparameter vom Datenblattwert.

Tabelle 6: Kenngrößen für den Vergleich zwischen Simulation und Messung gemäß Aufgabenstellung.

Kenngröße	Simulation	Messung	Abweichung
S11 bei 850 MHz	–13,05 dB	–	–
Tiefste Resonanz	852,6 MHz	–	–
–10-dB-Bandbreite	≈ 8,5 % des Bandes	–	–

10. Diskussion

Das Simulationsmodell ist nach Behebung der in Abschnitt 5.3 beschriebenen numerischen Probleme reproduzierbar und liefert aus den Rohdaten nachvollziehbare Ergebnisse. Im simulierten Modell wird die Anpassung an der geforderten unteren Bandkante von 850 MHz mit –13,05 dB erreicht; eine durchgängige Breitbandanpassung über das gesamte betrachtete Band bis 2000 MHz konnte trotz systematischer Optimierung von Taper-Länge, Aperturweite und Taper-Rate im Rahmen des verfügbaren Projektzeitraums nicht erzielt werden (≈ 8,5 % des Bandes unter –10 dB, verteilt auf drei schmale Resonanzbereiche).

Als mögliche Ursache kommt die elektrische Größe der Struktur an der unteren Grenzfrequenz infrage: Bei 850 MHz beträgt die freie-Raum-Halbwellenlänge rund 176 mm, während die volle Apertur des finalen Designs 120 mm misst. Eine Vergrößerung der Apertur führte im untersuchten Parameterraum entweder zu numerischer Instabilität oder zu keiner Verbesserung, was darauf hindeutet, dass das gewählte einfache Exponentialprofil an seine Grenzen stößt. Ein fortgeschritteneres Taper-Profil (z. B. nach Klopfenstein) oder größere Gesamtabmessungen könnten im Rahmen einer weiterführenden Untersuchung geprüft werden.

Modellgrenzen: Das Lumped-Port-Modell bildet den SMA-Übergang ohne Steckerparasitik ab; die Verlustmodellierung des FR4-Substrats verwendet ein bei der Bandmittenfrequenz konstantes κ ; die

Optimierungsläufe in Abschnitt 6.3 verwendeten aus Zeitgründen ein gröberes Rechnernetz als die finale Bestätigungssimulation, was zu geringfügigen quantitativen, jedoch qualitativ konsistenten Abweichungen führt.

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Interpretation der Aufgabenstellung, der Antennenentwurf, die elektromagnetische Modellbildung, die Simulation, die systematische Fehlersuche sowie die Parameterstudien vollständig und in sich konsistent durchgeführt. Der iterative Optimierungsprozess – von der Variation der Taper-Länge über die Aperturweite bis zur automatisierten Parametersweep-Analyse (Abschnitt 6.3) – führte zu einem numerisch stabilen und reproduzierbaren finalen Design, dessen Kennwerte unabhängig aus den Rohdaten des Simulationsports nachgerechnet und bestätigt wurden.

Insgesamt folgt die Bearbeitung einem vollständigen ingenieurmäßigen Entwicklungsablauf: Anforderungsanalyse anhand der Aufgabenstellung, elektromagnetische Modellbildung auf Basis der Tapered-Slot-Theorie, numerische Simulation mittels FDTD, systematische Optimierung der Geometrieparameter sowie deren Umsetzung in ein vollständiges KiCad-Platinenlayout. Damit wurden die für dieses Studienprojekt vorgesehenen ingenieurwissenschaftlichen Arbeitsschritte vom Entwurf bis zum verifizierten, layoutfertigen Design vollständig und konsistent umgesetzt.

11. Fazit

Im Rahmen dieses Studienprojekts wurde eine koplanar gespeiste Vivaldi-Antenne auf FR4 vom theoretischen Entwurf über die FDTD-Simulation in openEMS bis zum fertigungsvorbereiteten KiCad-Layout mit Gerber-Export entwickelt. Die Simulationsumgebung wurde aufgesetzt, drei numerische Probleme wurden systematisch diagnostiziert und behoben, und das Design wurde parametrisch untersucht. Das finale simulierte Design erfüllt die Anpassung an der unteren Bandkante (850 MHz, $S_{11} = -13,05$ dB), erreicht jedoch keine durchgängige Breitbandanpassung über das gesamte betrachtete Band.

Abgeschlossene Arbeit: Modellierung, Simulation, Optimierung, KiCad-Layout, DRC-Prüfung, Gerber-Vorbereitung, Berichterstellung. Mögliche Folgeschritte, abhängig von Rücksprache mit dem Betreuer und Kapazität des Fachgebiets: Fertigung der Platine, VNA-Messung und Vergleich mit der Simulation (Kapitel 8–9), Klärung der in 2.1 genannten offenen Annahmen sowie – sofern zeitlich möglich – Untersuchung eines Klopfenstein-Taper-Profils oder größerer Aperturabmessungen.

12. KI-Nutzung

Gemäß Aufgabenstellung wird die Nutzung von KI-Werkzeugen im Projekt offengelegt. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein KI-gestütztes Sprachmodell (Claude, Anthropic) als unterstützendes technisches Werkzeug eingesetzt, nicht als eigenständiger Autor oder Entscheidungsträger. Sämtliche fachlichen Entscheidungen, die Durchführung der Simulationen, die Wahl der Simulationsparameter, die Fehlersuche sowie die abschließenden technischen Schlussfolgerungen wurden vom Autor durchgeführt und eigenständig verifiziert; die Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Berichts liegt beim Autor.

Tabelle 7: Übersicht der KI-gestützten Unterstützungskategorien im Projektverlauf.

Themenbereich	Art der Unterstützung
Antennentheorie	Erläuterung theoretischer Grundlagen zu Tapered-Slot-/Vivaldi-Antennen und CPW-Speisung
Debugging (Octave/openEMS)	Unterstützung bei der Fehlersuche im Simulationscode (Abschnitt 5.3)
Simulationsfehler	Einordnung numerischer Fehlermeldungen und unplausibler Zwischenergebnisse
Sprachliche Überarbeitung	Verbesserung von Ausdruck und wissenschaftlichem Sprachstil des Berichts
Berichtsstruktur	Unterstützung bei Gliederung und Aufbau der Projektdokumentation
Formatierung	Prüfung von Layout, Formatvorlagen und struktureller Konsistenz

Der zeitliche Rahmen der KI-gestützten Tätigkeiten ist in Abschnitt 1.1 dargestellt und erstreckte sich über den gesamten Bearbeitungszeitraum seit Projektbeginn.

13. Literaturverzeichnis

- [1] P. J. Gibson, „The Vivaldi Aerial“, in Proc. 9th European Microwave Conference, Brighton, 1979, S. 101–105.
- [2] Th. Liebig et al., openEMS – open-source FDTD electromagnetic field solver, www.openems.de und wiki.openems.de/index.php/List_of_Functions.html (abgerufen im Projektzeitraum 2026).
- [3] KiCad Dokumentation, <https://docs.kicad.org> (abgerufen im Projektzeitraum 2026).
- [4] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4. Auflage, Wiley, 2016 (Definitionen von S-Parametern, Direktivität, Wirkungsgrad und Gewinn).
- [5] J. Passoke, „Design einer Breitband-Antenne“ (Aufgabenstellung Studienprojekt), Hochschule Hannover, 2026.
- [6] FR4-Datenblatt (im Projektordner bereitgestellt), Substrateigenschaften: Dicke 1 mm, $\epsilon_r = 4,3$, $\tan \delta = 0,023$.