



## **Antennenprojekt**

im Studiengang Elektrische Systeme

# **Entwurf und Simulation einer Mikrostrip-Patch-Antenne für WLAN bei 5,4 GHz**

Vorgelegt von

**Chin-I Feng**

Matrikel-Nummer: 300545

Durchgeführt an der

**Hochschule Konstanz**

**Technik, Wirtschaft und Gestaltung**

Betreuung:

Prof. Dr. Christoph Schick

Konstanz, 6. August 2025

# Kurzfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Patchantenne für das 5-GHz-Band mit der Simulationssoftware EMPro entwickelt. Die wesentlichen Antennenkenngößen wie Rückflusdämpfung, Bandbreite, Gewinn und Direktivität wurden simuliert und mit Literaturwerten verglichen. Die Simulationsergebnisse stimmen weitgehend mit den Literaturwerten überein. Geringfügige Abweichungen sind in erster Linie auf unterschiedliche Materialparameter zurückzuführen. Eine praktische Fertigung und Vermessung der Antenne war aufgrund begrenzter Erfahrung mit der Simulationssoftware im Projektzeitraum nicht möglich, ist jedoch als zukünftige Erweiterung vorgesehen.

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Kurzfassung .....                           | II  |
| Abbildungsverzeichnis.....                  | IV  |
| Tabellenverzeichnis.....                    | IV  |
| 1    Einleitung .....                       | 1   |
| 2    Antennenvergleich .....                | 2   |
| 3    Entwurf und Funktion .....             | 3   |
| 3.1    Grundprinzip der Patchantenne .....  | 3   |
| 3.2    Antennendesign im EMPro .....        | 4   |
| 3.3    Bestimmung der Patchdimensionen..... | 7   |
| 4    Simulationsergebnisse .....            | 9   |
| 5    Fazit und Ausblick .....               | 13  |
| Literaturverzeichnis .....                  | V   |
| Eidesstattliche Erklärung .....             | VI  |
| Anhang .....                                | VII |

# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abb. 1: Aufbau einer Mikrostrip-Patchantenne [5, S. 1595].....                   | 2  |
| Abb. 2: Patchantenne mit elektrischen Feldlinien [9, S. 14] .....                | 3  |
| Abb. 3: Schematischer Schichtaufbau der Patchantenne (nicht maßstabsgetreu)..... | 4  |
| Abb. 4: Draufsicht des Patchantennendesigns (nicht maßstabsgetreu) .....         | 5  |
| Abb. 5: Patchantenne mit eingesetzter 50-Ohm-Einspeisung in EMPro .....          | 6  |
| Abb. 6: Reflexionskoeffizient der Patchantenne über dem Frequenzbereich .....    | 9  |
| Abb. 7: Reflexionskoeffizient in dB über dem Frequenzbereich .....               | 10 |
| Abb. 8: 3D-Richtdiagramm des Antennengewinns der simulierten Patchantenne.....   | 11 |
| Abb. 9: 3D-Darstellung der Direktivität der Patchantenne .....                   | 12 |

# Tabellenverzeichnis

|   |   |
|---|---|
| Tab. 1: Konstruktionsparameter der Patchantenne ..... | 5 |
|---|---|

# 1 Einleitung

Drahtlose Kommunikation spielt heutzutage eine große Rolle in zahlreichen Alltagsanwendungen [1]. Insbesondere Wireless Local Area Network (WLAN)-Technologien ermöglichen eine flexible und effiziente Vernetzung von Geräten wie Laptops oder Smartphones [2]. Dabei haben sich zwei Frequenzbereiche, das 2,4-GHz- und das 5-GHz-Band, als Standard für WLAN-Anwendungen etabliert [3].

Für den zuverlässigen Betrieb moderner WLAN-Systeme sind Antennen erforderlich, die sowohl leistungsfähig als auch kompakt und wirtschaftlich herzustellen sind. Mikrostrip-Patch-Antennen (im Folgenden als Patchantennen bezeichnet) erfüllen diese Anforderungen und finden breite Anwendung in drahtlosen Netzwerken [4].

Im Rahmen dieses Projekts wurde daher eine Patchantenne für das 5-GHz-Band entworfen und mit Hilfe der Simulationssoftware Keysight EMPro hinsichtlich wichtiger Kenngrößen wie Rückflusdämpfung, Bandbreite und Strahlungseigenschaften untersucht.

Im folgenden Verlauf dieser Projektdokumentation wird die Entwicklung und Simulation einer Patchantenne für das 5-GHz-Band beschrieben. **Kapitel 2** beschreibt die gewählte Patchantenne und stellt deren Eigenschaften einem  $\lambda/2$ -Dipol gegenüber. In **Kapitel 3** werden das grundlegende Entwurfsverfahren, die Funktionsweise sowie alle relevanten Maße und Konstruktionsschritte erläutert.

**Kapitel 4** fasst die wichtigsten Simulationsergebnisse zusammen. Hierzu gehören grafische Auswertungen zentraler Kenngrößen sowie eine kurze Diskussion der Resultate im Vergleich zu Literaturwerten. **Kapitel 5** bildet den Abschluss der Arbeit und enthält eine Zusammenfassung sowie einen kurzen Ausblick.

## 2 Antennenvergleich

Ein wesentlicher Vorteil der Patchantenne gegenüber dem  $\lambda/2$ -Dipol besteht in der einfachen Entwicklung und Herstellung. Patchantennen werden üblicherweise direkt auf Leiterplatten realisiert. Dabei bestehen sowohl der Patch als auch die Massefläche (Ground) aus einer Kupferschicht, während als Substrat meist das Leiterplattenmaterial FR4 verwendet wird, das als Dielektrikum zwischen den leitenden Flächen dient. Neben dem eigentlichen Patch ist eine Massefläche erforderlich, die durch das Substrat von der Antenne getrennt bleibt (siehe Abb. 1) [5].

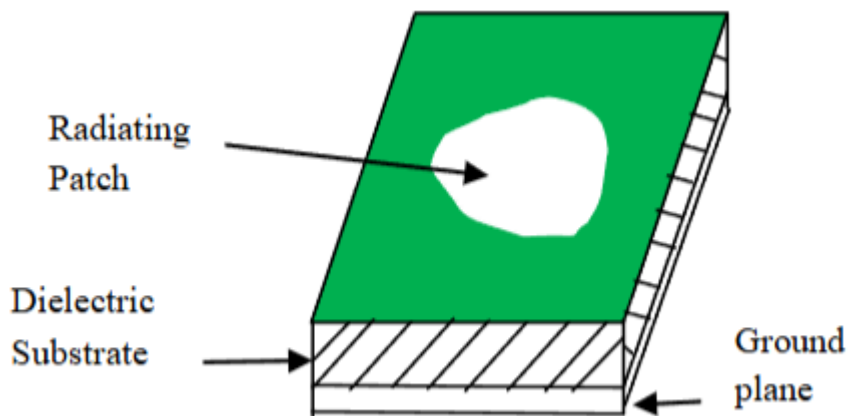


Abb. 1: Aufbau einer Mikrostrip-Patchantenne [5, S. 1595]

Durch die kompakte Bauweise ist die gesamte Größe einer Patchantenne deutlich geringer als bei vielen anderen Antennentypen, wie etwa einem klassischen  $\lambda/2$ -Dipol. Trotz der geringen Dicke zeichnet sich diese Antennenart durch Robustheit aus und eignet sich gut für die Integration in die Außenflächen von Objekten, beispielsweise in Mobiltelefone. Dies stellt einen Vorteil gegenüber dem  $\lambda/2$ -Dipol dar, der sich aufgrund seiner Bauform weniger gut in Geräte integrieren lässt [4].

Diese Bauweise bringt jedoch Einschränkungen mit sich. In bestimmten Anwendungsbereichen, etwa bei Mobilgeräten im Frequenzbereich unterhalb von 2 GHz, erweist sich die Patchantenne in einigen Fällen als zu groß [6]. Der Antennengewinn einer Patchantenne liegt typischerweise im Bereich von 5 bis 8 dBi. Im Vergleich dazu erreicht ein idealer  $\lambda/2$ -Dipol einen Gewinn von etwa 2,15 dBi [7]. Damit weist die Patchantenne in der Regel einen höheren Gewinn auf als der  $\lambda/2$ -Dipol, was eine stärkere Bündelung der abgestrahlten Energie in eine bestimmte Richtung ermöglicht [8].

### 3 Entwurf und Funktion

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden physikalischen Prinzipien der Patchantenne erläutert. Anschließend wird das konkrete Antennendesign und dessen Umsetzung in der Simulationssoftware EMPro beschrieben.

#### 3.1 Grundprinzip der Patchantenne

Eine Patchantenne ist eine planare Resonanzantenne und besteht in der Regel aus einer rechteckigen Metallfläche (Patch), die auf einem dielektrischen Substrat aufgebracht wird. Unterhalb des Substrats befindet sich eine leitende Massefläche (Ground). Der Patch verhält sich wie ein Resonator mit einer elektrischen Länge von etwa der halben Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) der Betriebsfrequenz (siehe Abb. 2). Wird die Antenne an einer geeigneten Einspeiseposition mit einem Hochfrequenzsignal angeregt, entsteht im Patch eine stehende Welle. Auf diese Weise erfolgt die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen in den Raum [8] [9].

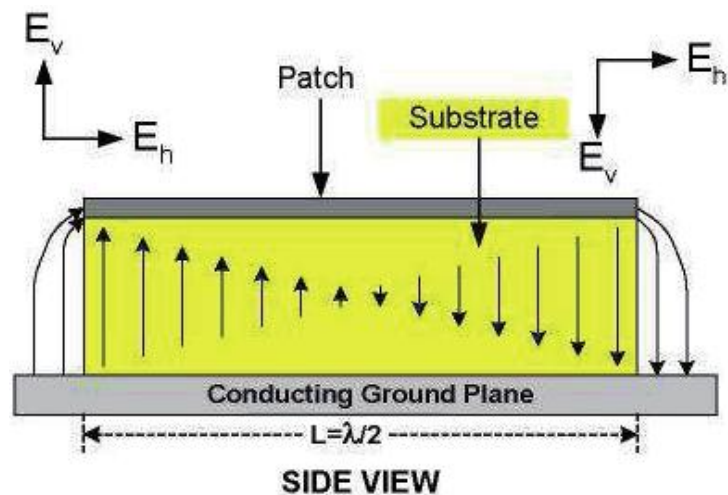


Abb. 2: Patchantenne mit elektrischen Feldlinien [9, S. 14]

Als Resonanzantenne bietet die Patchantenne jedoch nur eine geringe Bandbreite. Der überwiegende Teil der elektromagnetischen Energie wird im Bereich zwischen Patch und Massefläche innerhalb des Substrats gespeichert, wodurch außerhalb des Resonanzbereichs die Effizienz stark abnimmt. Die resultierende Bandbreite beträgt typischerweise nur etwa 2 % bis 5 % der jeweiligen Betriebsfrequenz [8].

## 3.2 Antennendesign im EMPro

Das im Folgenden vorgestellte Design der Patchantenne orientiert sich an der in [10] beschriebenen Struktur. Aufbau und Materialauswahl wurden entsprechend dieser Quelle übernommen und an die Anforderungen des 5,4-GHz-Bandes angepasst. Im Rahmen dieses Abschnitts werden die wesentlichen Konstruktionsparameter, Materialien sowie die spezifischen Maße des entwickelten Antennendesigns detailliert vorgestellt.

Die Schichtdicken des Antennendesigns wurden zunächst gemäß den Angaben in [10] gewählt. Sowohl der Patch als auch die Massefläche (Ground) wurden mit einer Dicke von 0,03 mm ausgeführt und als Kupfer realisiert. Für Kupfer wurde eine relative Permittivität von 1 angenommen. Für das dielektrische Substrat wurde eine Schichtdicke von 1 mm festgelegt und das Material FR4 mit einer relativen Permittivität von 4,6 verwendet. Eine seitliche Darstellung des Antennenaufbaus ist in Abb. 3 dargestellt.

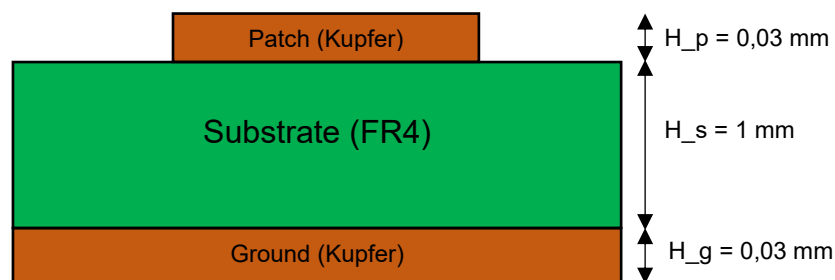


Abb. 3: Schematischer Schichtaufbau der Patchantenne (nicht maßstabsgetreu)

Anschließend wurden die Breite und Länge der Substratschicht sowie der leitenden Massefläche (Ground) entsprechend den Angaben in [10] festgelegt. Beide weisen eine Breite von 38 mm und eine Länge von 28 mm auf, um ausreichend Randabstand für den Patch sowie für die Einspeisestruktur zu gewährleisten. Der Patch selbst wurde mit einer Breite von 17 mm und einer Länge von 12,8 mm dimensioniert, was für die gewünschte Resonanzfrequenz im 5,4-GHz-Band erforderlich ist.

Darüber hinaus wurden auch die Maße für die Einspeisestruktur, insbesondere die Schlitz- und Leiterbreiten, gemäß den Literaturvorgaben definiert. Eine vollständige, schematische Gesamtansicht des Antennendesigns mit allen relevanten Abmessungen ist in Abb. 4 dargestellt.



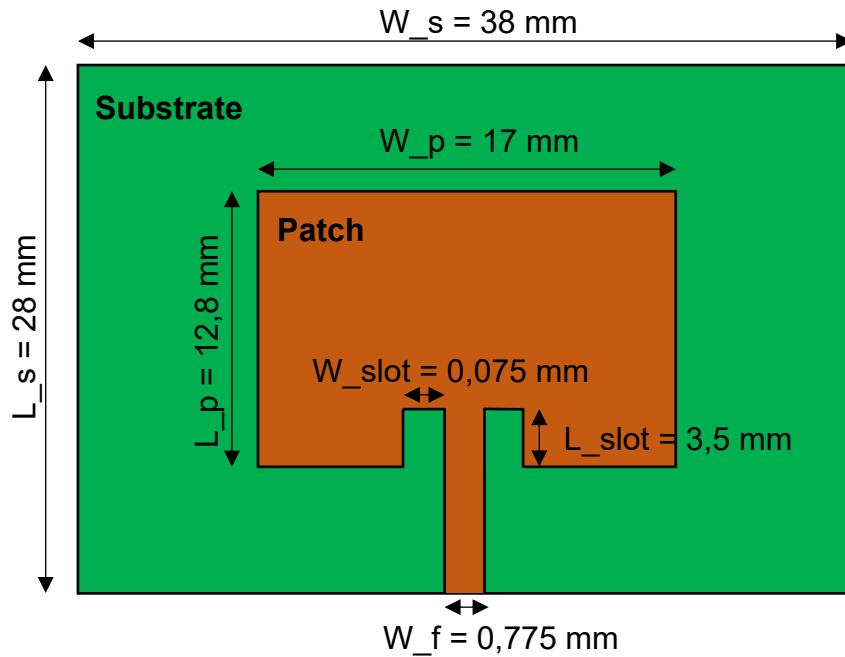


Abb. 4: Draufsicht des Patchantennendesigns (nicht maßstabsgetreu)

Die zuvor bestimmten Antennenparameter wurden anschließend in der Simulationssoftware EMPro als benutzerdefinierte Parameter hinterlegt. Durch die Verwendung der Parameterfunktion ließ sich das Patchantennendesign flexibel und effizient modellieren sowie bei Bedarf schnell anpassen. Alle in EMPro definierten Parameter sind in Tab. 1 übersichtlich zusammengestellt.

Tab. 1: Konstruktionsparameter der Patchantenne

| Parameter               | Wert [mm] | Beschreibung                |
|-------------------------|-----------|-----------------------------|
| <b>W<sub>s</sub></b>    | 38        | Substrat- und Ground-Breite |
| <b>L<sub>s</sub></b>    | 28        | Substrat- und Ground-Länge  |
| <b>W<sub>p</sub></b>    | 17        | Patch-Breite                |
| <b>L<sub>p</sub></b>    | 12,8      | Patch-Länge                 |
| <b>W<sub>slot</sub></b> | 0,075     | Einspeiseschlitz-Breite     |
| <b>L<sub>slot</sub></b> | 3,5       | Einspeiseschlitz-Länge      |
| <b>W<sub>f</sub></b>    | 0,775     | Einspeiseleiter-Breite      |

|                      |      |                           |
|----------------------|------|---------------------------|
| <b>H<sub>s</sub></b> | 1    | Dicke des Substrats (FR4) |
| <b>H<sub>p</sub></b> | 0,03 | Patch-Dicke (Kupfer)      |
| <b>H<sub>g</sub></b> | 0,03 | Ground-Dicke (Kupfer)     |

Schlussendlich erfolgt die Einspeisung der Antenne, indem zwischen Patch und Ground ein Circuit Component mit einer 50-Ohm-Spannungsquelle eingefügt wird. Diese Einspeisung dient zur Hochfrequenzanregung der Antenne und ermöglicht die Analyse der elektrischen Eigenschaften während der Simulation. Eine beispielhafte Darstellung der Einspeisung in EMPro ist in Abb. 5 zu sehen.

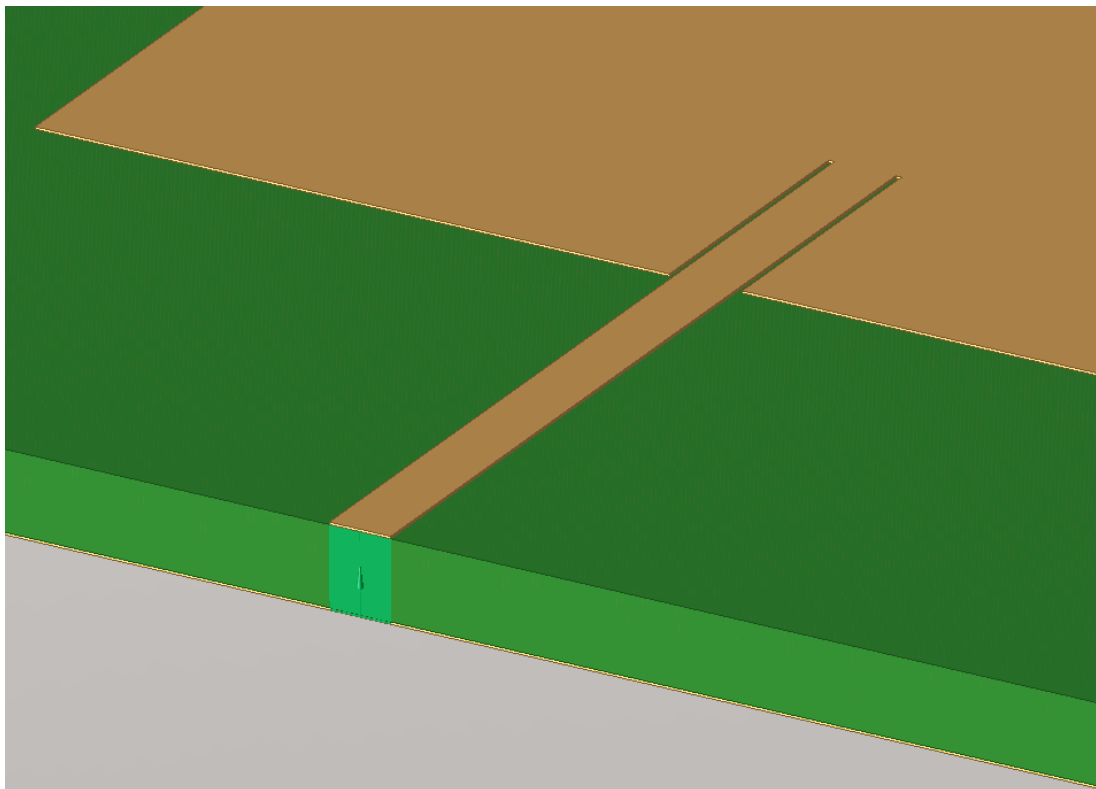


Abb. 5: Patchantenne mit eingesetzter 50-Ohm-Einspeisung in EMPro

Alle Maße wurden direkt aus der Literatur [10] übernommen, um eine Patchantenne für das 5,4-GHz-Band originalgetreu nachzubilden und zu untersuchen, inwieweit sich die Ergebnisse mit der Simulationssoftware EMPro realisieren und vergleichen lassen. Darüber hinaus stellt die Quelle die grundlegenden Formeln zur Verfügung, mit denen sich das Antennendesign auch für andere Frequenzbereiche anpassen lässt.

### 3.3 Bestimmung der Patchdimensionen

Um eine Patchantenne für einen anderen Frequenzbereich auszulegen, müssen Patch-Länge und -Breite entsprechend neu berechnet werden, da diese direkt die Resonanzfrequenz bestimmen. Zur Auslegung der Patchantenne wurden die in [10] angegebenen Formeln für die Berechnung der Breite und der effektiven Länge des Patches verwendet.

#### Berechnung der Patchbreite

Die Breite  $W_{Patch}$  berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$W_{Patch} = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Hierbei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),  $f_0$  die gewünschte Resonanzfrequenz in Hertz und  $\epsilon_r$  die relative Permittivität des Substrats. Die Permittivität charakterisiert, wie stark das Substratmaterial elektrische Felder beeinflusst und ist für typische Leiterplattenmaterialien wie FR4 etwa 4,3 – 4,6.

#### Berechnung der Patchlänge

Die tatsächliche Länge  $L_{Patch}$  wird nach folgender Formel bestimmt:

$$L_{Patch} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} = -0,824 h_{Substrat} \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left( \frac{W_{Patch}}{h_{Substrat}} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left( \frac{W_{Patch}}{h_{Substrat}} + 0,8 \right)} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet  $h_{Substrat}$  die Dicke des Substrats,  $W_{Patch}$  die zuvor berechnete Patchbreite und  $\epsilon_{reff}$  die effektive Permittivität des Substrats. Die effektive Permittivität ( $\epsilon_{reff}$ ) berücksichtigt, dass sich die elektromagnetischen Felder sowohl im Dielektrikum als auch teilweise in der Luft ausbreiten und beeinflusst maßgeblich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle auf dem Substrat.

#### Berechnung der effektiven Permittivität

Die effektive Permittivität  $\epsilon_{reff}$  berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1 + 12 h_{Substrat}}{W_{Patch}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Hierbei ist  $\epsilon_{\text{reff}}$  die relative Permittivität des Substrats,  $h_{\text{Substrat}}$  die Dicke des Substrats und  $W_{\text{Patch}}$  die Breite des Patches. Die effektive Permittivität  $\epsilon_{\text{reff}}$  liegt zwischen 1 (Luft) und  $\epsilon_r$  (reines Substrat).

Die oben aufgeführten Gleichungen (Formeln 1 bis 3) stellen das typische Entwurfsverfahren für Patchantennen dar. Diese drei Formeln ermöglichen es, die erforderlichen Abmessungen des Patches für eine gewünschte Betriebsfrequenz analytisch zu bestimmen. Somit können mithilfe dieser Formeln Patchantennen auch für andere Frequenzbereiche gezielt ausgelegt werden, indem die jeweiligen Parameter entsprechend angepasst werden.

## 4 Simulationsergebnisse

Nach der Durchführung der Simulation in EMPro wurde der Betrag des Reflexionskoeffizienten ( $|\Gamma|$ ) über den Frequenzbereich von 4 GHz bis 6 GHz ermittelt. Abb. 6 zeigt den Verlauf des Reflexionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Frequenz. Der niedrigste Wert des Reflexionskoeffizienten wird bei 5,63 GHz mit  $|\Gamma| = 0,026$  erreicht, was auf eine besonders gute Anpassung und eine sehr geringe Reflexion in diesem Bereich hinweist. Das bedeutet, dass an dieser Stelle lediglich etwa 0,07 % ( $|\Gamma|^2 \approx 0,0007$ ) der eingekoppelten Leistung reflektiert werden, während rund 99,9 % der Leistung in die Antenne übertragen werden.

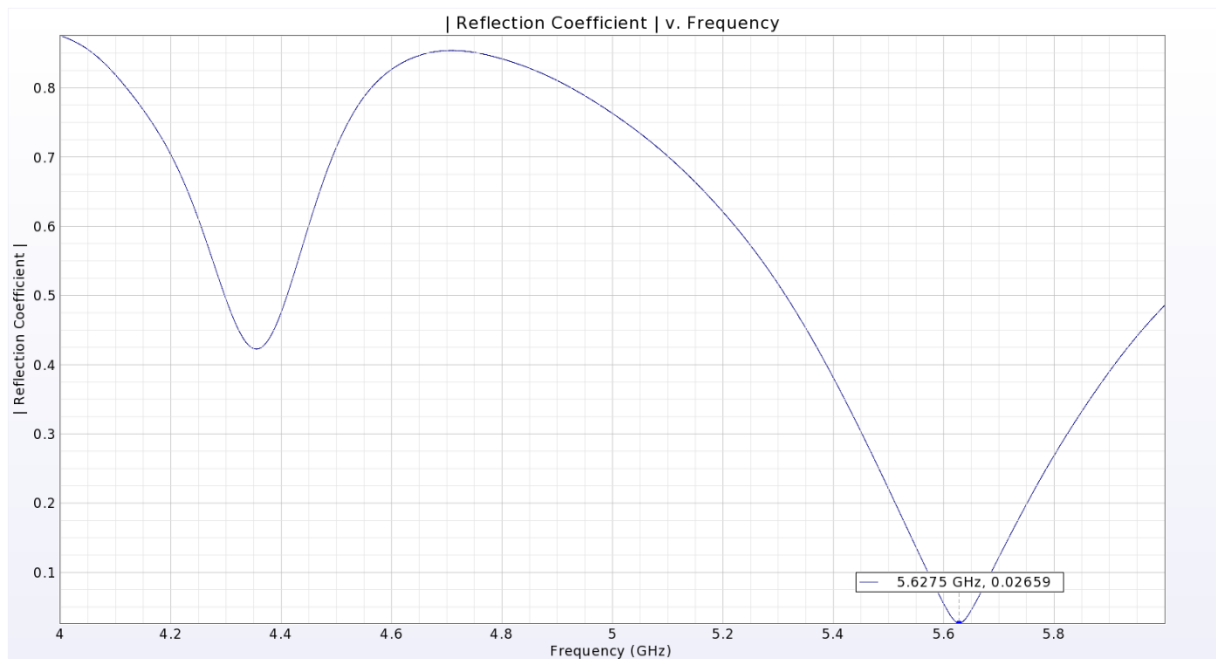


Abb. 6: Reflexionskoeffizient der Patchantenne über dem Frequenzbereich

Das simulierte Ergebnis zeigt, dass die Antenne in der Nähe der Zielarbeitsfrequenz von 5,4 GHz resonant ist, wobei das Minimum des Reflexionskoeffizienten leicht oberhalb dieses Werts auftritt. Ein möglicher Grund für die Abweichung liegt darin, dass in der Simulation eine relative Permittivität von 4,6 verwendet wurde, während die Literatur [10] von einem Wert von 4,3 ausgeht. Diese Differenz führt zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz und erklärt die beobachtete Abweichung, die im Rahmen der üblichen Toleranzen analytisch ausgelegter Patchantennen liegt.

Der Reflexionskoeffizient kann nicht nur als Betrag, sondern auch in der dB angegeben werden. Die Darstellung in dB ist besonders in der Hochfrequenztechnik und bei der Analyse von S-Parametern üblich. Die Umrechnung erfolgt mit folgender Formel:

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(|\Gamma|) \quad (4)$$

Dabei ist  $|Γ|$  der Betrag des Reflexionskoeffizienten. Negative dB-Werte entsprechen einer guten Anpassung, da sie eine geringe Reflexion anzeigen. Typischerweise gilt ein Wert von  $-10$  dB als Grenzwert für eine akzeptable Anpassung; Werte von  $-20$  dB oder niedriger deuten auf eine sehr gute Anpassung hin. Die Abb. 7 zeigt den Verlauf des Reflexionskoeffizienten der simulierten Patchantenne über den Frequenzbereich in der Darstellung als dB-Wert.

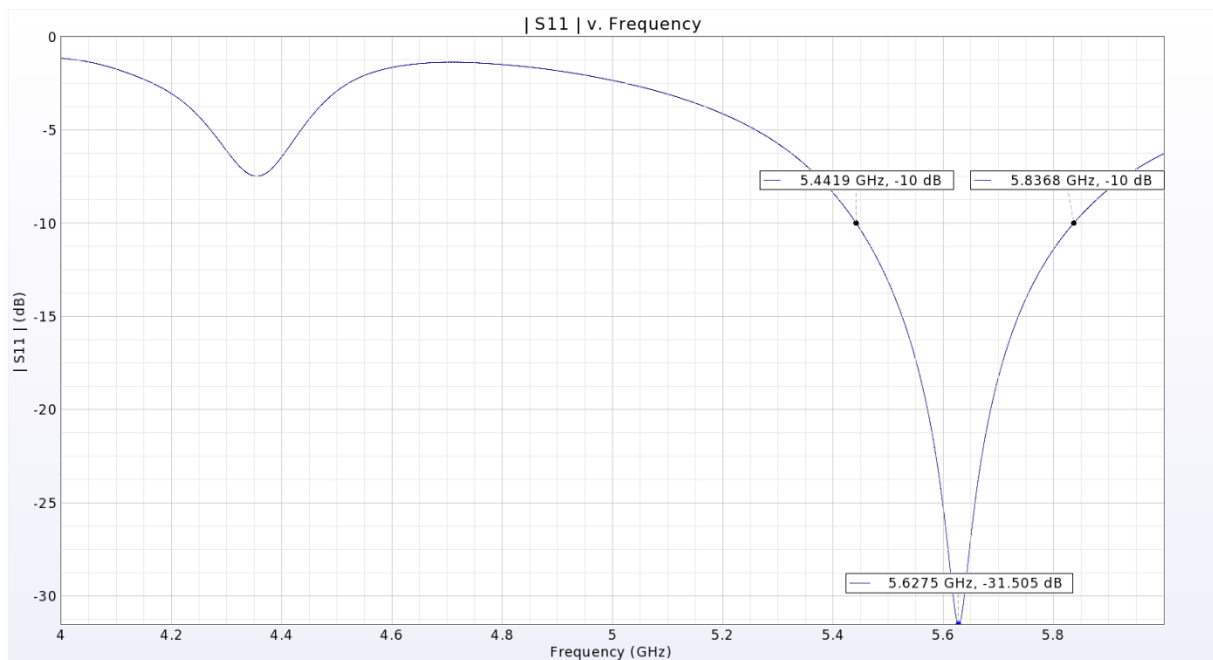


Abb. 7: Reflexionskoeffizient in dB über dem Frequenzbereich

Das obige Diagramm zeigt, dass der Reflexionskoeffizient  $|S_{11}|$  im Simulationsergebnis bei 5,63 GHz einen Wert von  $-31,5$  dB erreicht. Im Vergleich dazu wird in der Literatur [10] für eine vergleichbare Patchantenne ein deutlich niedrigerer Wert von  $-53,2$  dB angegeben. Eine mögliche Ursache für diese Abweichung ist die unterschiedliche Wahl der relativen Permittivität des Substrats. Während in der Simulation eine Permittivität von 4,6 angenommen wurde, basiert das Literaturbeispiel auf einem Wert von 4,3.

Darüber hinaus lässt sich aus dem Diagramm auch die Bandbreite der Antenne bestimmen. Die Bandbreite wird üblicherweise als der Frequenzbereich definiert, in dem der Reflexionskoeffizient unter  $-10$  dB liegt. Dies entspricht einer maximalen Leistungsreflexion von 10 %, sodass mindestens 90 % der eingekoppelten Leistung abgestrahlt werden. Im vorliegenden Fall ergibt sich eine Bandbreite von  $5,8368 \text{ GHz} - 5,4419 \text{ GHz} = 0,3949 \text{ GHz}$ .

In der Literatur [10] beträgt die Bandbreite für ein vergleichbares Design hingegen nur 0,2006 GHz. Die größere Bandbreite im Simulationsergebnis zeigt, dass das simulierte

Design eine breitere Anpassung im betrachteten Frequenzbereich bietet. Dies kann auf Unterschiede beim Substratmaterial, bei der Geometrie der Antenne oder bei den gewählten Simulationsparametern zurückzuführen sein und verdeutlicht, wie empfindlich die Bandbreite auf solche Faktoren reagiert.

Im EMPro kann zusätzlich zum Reflexionsverhalten auch das 3D-Far-Field, also das dreidimensionale Strahlungsdiagramm der Antenne, visualisiert werden. Wie in Abb. 8 zu sehen ist, erfolgt die Hauptabstrahlung senkrecht zur Patchfläche nach oben. Der maximale Antennengewinn beträgt in der Simulation 2,95 dBi. In der Literatur [10] wird für ein vergleichbares Design ein Gewinn von 2,58 dBi angegeben. Die beiden Werte liegen sehr nah beieinander, was zeigt, dass das simulierte Antennendesign hinsichtlich des Gewinns gut mit dem in der Literatur beschriebenen Aufbau übereinstimmt.

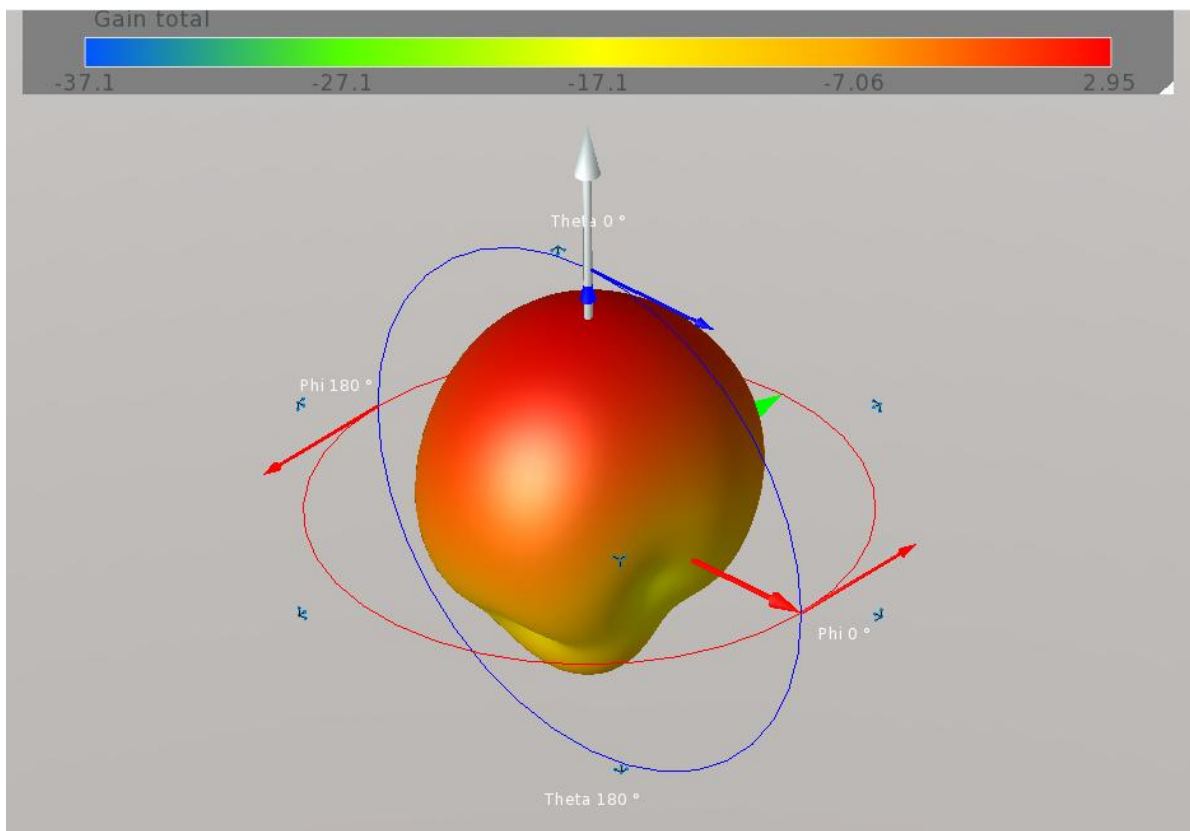


Abb. 8: 3D-Richtdiagramm des Antennengewinns der simulierten Patchantenne

In der Simulation mit EMPro zeigt die entwickelte Patchantenne eine maximale Direktivität von 7,32 dBi. Die Direktivität gibt an, wie stark die Antenne die abgestrahlte Energie in eine bevorzugte Richtung bündelt, verglichen mit einer idealen isotropen Quelle. Ein höherer Wert steht für eine ausgeprägtere Richtwirkung. In der Literatur [10] wird für eine vergleichbare Patchantenne ein Wert von 6,16 dBi berichtet, was auf ähnliche Abstrahleigenschaften hinweist. Damit bestätigen die Simulationsergebnisse, dass das entwickelte Design die typischen Merkmale dieser Antennenart aufweist.

Eine dreidimensionale Darstellung des Richtdiagramms, die die Richtwirkung und Abstrahlungscharakteristik anschaulich zeigt, ist in Abb. 9 dargestellt.

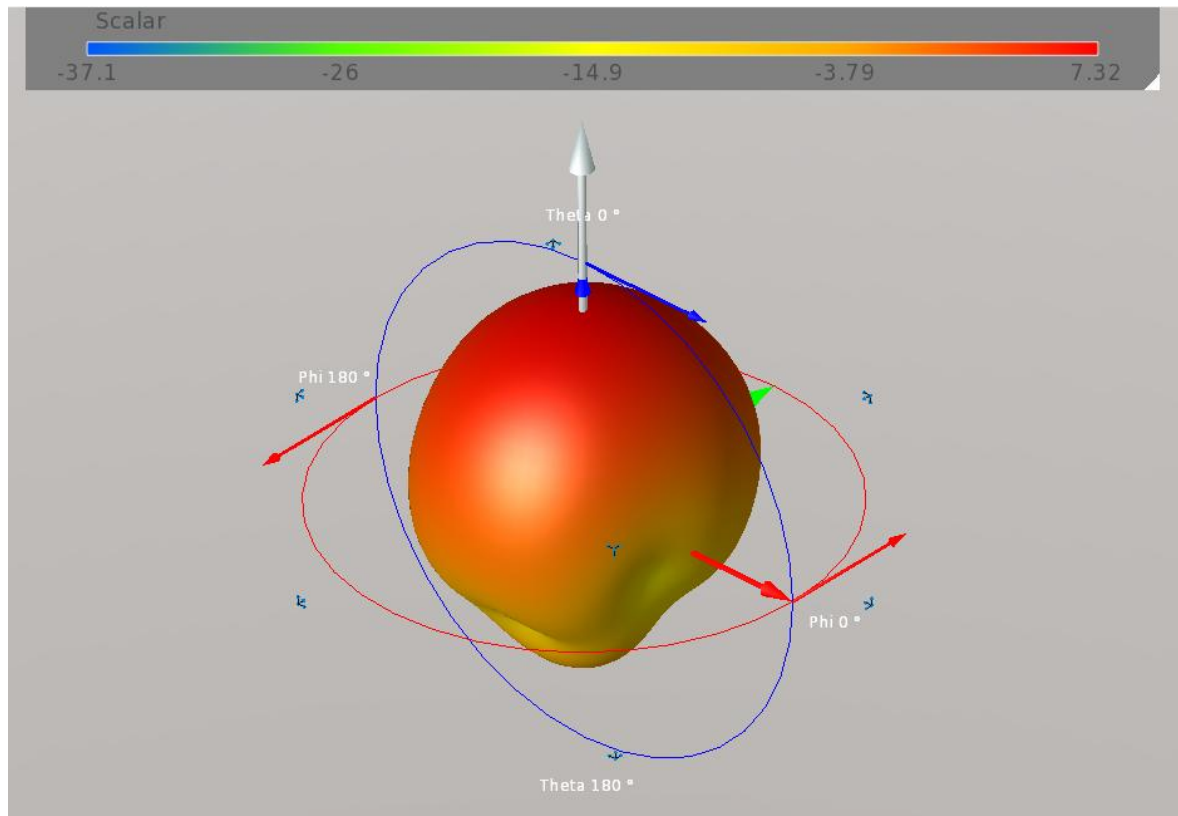


Abb. 9: 3D-Darstellung der Direktivität der Patchantenne

Schlussendlich lässt sich die Effizienz, also der Wirkungsgrad der Patchantenne, anhand des Verhältnisses von Antennengewinn zu Direktivität bestimmen. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$\eta = \frac{G}{D} \times 100\% \quad (5)$$

Wobei  $G$  den Antennengewinn (in dBi) und  $D$  die Direktivität (in dBi) bezeichnet. Für die in EMPro simulierte Antenne ergeben sich folgende Werte:

$$\eta = \frac{2,95}{7,32} \times 100\% \approx 40,3\% \quad (6)$$

Der Wirkungsgrad beschreibt den Anteil der eingespeisten Leistung, der tatsächlich von der Antenne abgestrahlt wird. Ein Wirkungsgrad von etwa 40 % bedeutet, dass rund 40 % der zugeführten Leistung als elektromagnetische Welle abgestrahlt werden, während der Rest beispielsweise durch Verluste im Dielektrikum oder in den leitenden Materialien umgesetzt wird.



## 5 Fazit und Ausblick

Das Projekt hat erfolgreich gezeigt, dass sich Patchantennen für den Einsatz im 5-GHz-Band mithilfe von Keysight EMPro zielgerichtet entwickeln und auslegen lassen. Die gewählte Antennenengeometrie sowie die verwendeten Materialparameter wurden zunächst aus der Fachliteratur übernommen und im Simulationsmodell umgesetzt. Die anschließenden Simulationen lieferten Antennenkenngrößen wie Rückflusdämpfung, Bandbreite, Gewinn und Direktivität, welche mit den Referenzwerten aus der Literatur verglichen wurden.

Allerdings sind verschiedene Verbesserungen und Erweiterungen des Projekts möglich und auch sinnvoll. Anstelle alle Maße direkt aus der Literatur zu übernehmen, wäre es empfehlenswert, insbesondere die Patchlänge und -breite selbst zu berechnen und gezielt an das eigene Design anzupassen. Da in der vorliegenden Simulation eine etwas höhere relative Permittivität als in der Literatur verwendet wurde, könnten durch eine entsprechende Anpassung der Dimensionen genauere Ergebnisse erzielt und die gewünschte Resonanzfrequenz bei 5,4 GHz besser getroffen werden.

Eine praktische Umsetzung und Vermessung der entwickelten Patchantenne im Labor wäre als Erweiterung besonders wünschenswert, um die Simulationsergebnisse mit realen Messdaten vergleichen zu können. Dies hätte zusätzliche Erkenntnisse über die Genauigkeit der Modellierung und die tatsächlichen Einflüsse in der Praxis geliefert. Dieser Schritt konnte im Rahmen des Projekts jedoch nicht realisiert werden, da aufgrund fehlender Erfahrung mit der Simulationssoftware EMPro ein großer Teil der Zeit für das Zeichnen und Anpassen des 3D-Modells aufgewendet werden musste. Mit zunehmender Routine im Umgang mit der Software könnten zukünftige Projekte diese Herausforderungen leichter bewältigen und einen vollständigen Vergleich zwischen Simulation und Messung ermöglichen.

# Literaturverzeichnis

- [1] V. K. Nassa, „Wireless Communications: Past, Present and Future,“ *Dronacharya Research Journal*, Bd. III, Nr. II, S. 50-54, Jul. 2011.
- [2] I. Alshourbaji, „An overview of wireless local area network (WLAN),“ arXiv preprint arXiv:1303.1882, 2013.
- [3] J. Yeh, J. Chen und C. Lee, „WLAN standards,“ *IEEE Potentials*, Bd. 22, Nr. 4, S. 16-22, 2003.
- [4] N. Parmar, M. Saxena und K. Nayak, „Review of Microstrip patch antenna for WLAN and Wimax application,“ *International Journal of Engineering Research and Applications*, Bd. 4, Nr. 1, S. 168-171, 2014.
- [5] I. Singh, A. Singh, R. Dubey, und A. Tiwari, „Micro strip patch antenna and its applications: a survey,“ *International Journal of Computer Technology and Applications*, Bd. 2, Nr. 5, S. 1595–1599, 2011.
- [6] R. B. Waterhouse, *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*, New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Hoboken, USA: Wiley, 2016.
- [8] D. M. Pozar, „Microstrip antennas,“ *Proceedings of the IEEE*, Bd. 80, Nr. 1, S. 79–91, Jan. 1992.
- [9] S. Bhunia, *Microstrip Patch Antenna Design, A Novel Approach*, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- [10] K. M. Elme, M. R. Shihab, P. Saha, und N. Alam, „A Simple Design of Microstrip Patch Antenna for WLAN Application Using 5.4 GHz Band,“ in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022.

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich dieses Projekt selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe und alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, als solche gekennzeichnet sind. Die Arbeit wurde noch nicht bei einer Prüfungsbehörde eingereicht oder veröffentlicht. Zusätzlich erkläre ich, dass ich Generative KI-Technologien ausschließlich zur Verbesserung des Codes und der Rechtschreibung eingesetzt habe. Dabei wurden keine sensiblen Daten eingegeben oder ganze Texte generiert. Der Einsatz dieser Technologien beschränkte sich strikt auf technische Unterstützung ohne Einfluss auf die inhaltliche Eigenleistung.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

6. August 2025

Datum

Chin-I Feng

Unterschrift

# Anhang

Im Anhang liegt die Datei **simple\_microstrip\_patch\_antenna\_cfeng.zep**. Diese Datei enthält die Geometrie- und Materialdefinitionen der im Projekt entwickelten Patchantenne. Die Simulationsergebnisse wurden aufgrund der Dateigröße nicht beigefügt. Bei Fragen oder falls Simulationsergebnisse benötigt werden, kann gerne unter [c.feng@htwg-konstanz.de](mailto:c.feng@htwg-konstanz.de) Kontakt aufgenommen werden.