

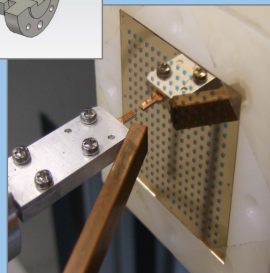
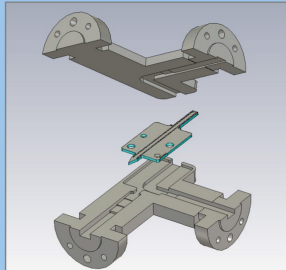


Sabine Dieter (Autor)

## Charakterisierung und Optimierung von quasioplanaren Millimeterwellenantennen bezüglich Rekonfigurierbarkeit

Sabine Dieter

**Charakterisierung und Optimierung von  
quasioplanaren Millimeterwellenantennen  
bezüglich Rekonfigurierbarkeit**



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6953>

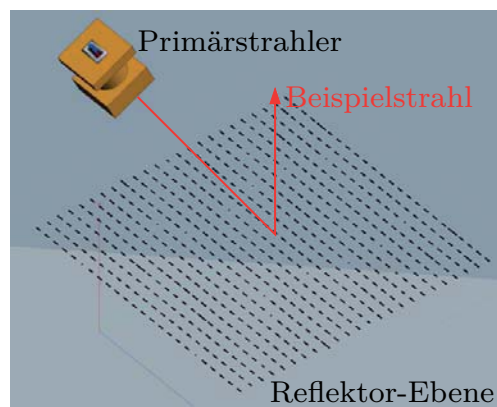
Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Seit den 1980er Jahren sind planare Reflectarray-Antennen eine attraktive Alternative zu Parabolantennen für Millimeterwellen-Anwendungen. Ihre Vorteile sind eine leichte, kompakte Bauform, geringes Gewicht und niedrige Fertigungskosten. Ihr Einsatzgebiet reicht allgemein von Sensorikanwendungen über automobile Radarsensoren bis hin zu industriellen Applikationen, z. B. zur Hindernisdetektion und zur Rollfeldüberwachung auf Landebahnen von Flughäfen.

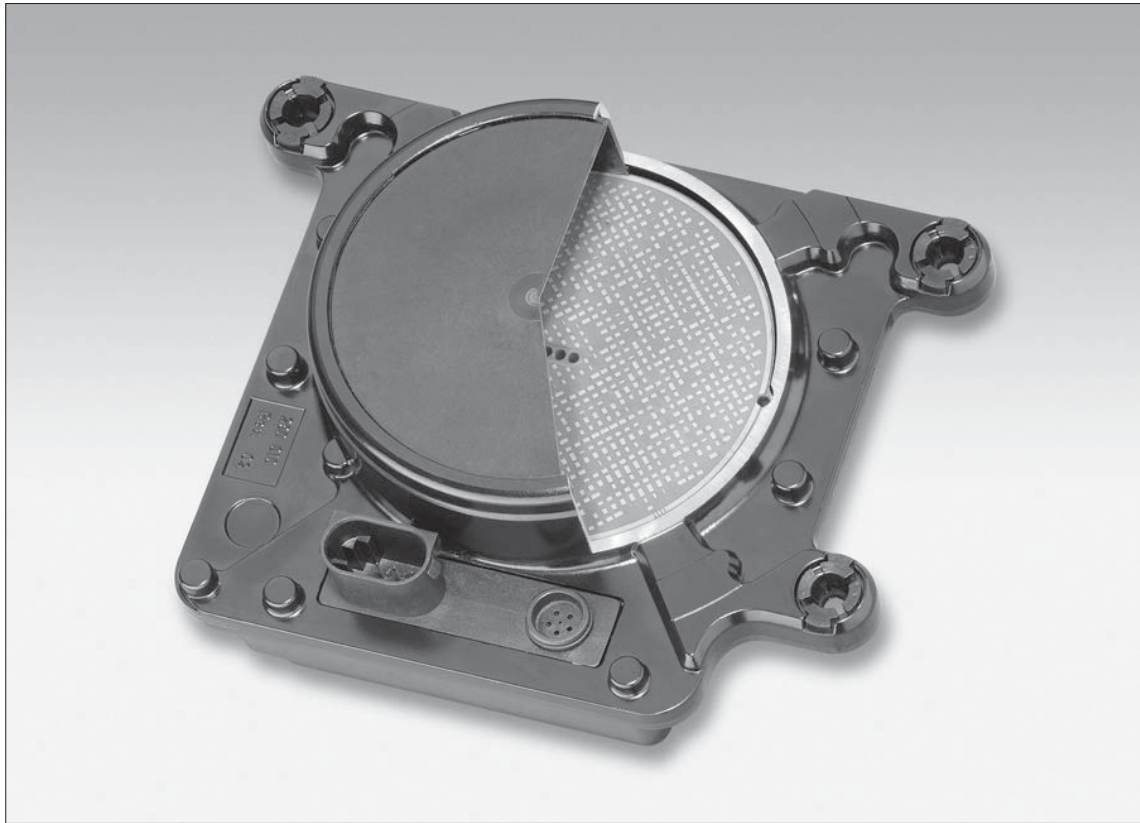
Im Allgemeinen bestehen diese Antennen aus der Kombination einer planaren Fläche mit metallisierten Strukturen, dem Reflectarray, sowie einer Speisevorrichtung, dem Primärstrahler, der dieses Reflectarray beleuchtet. Die Unterseite der Reflektorfläche ist durchgehend metallisiert. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 1.1 zu sehen.



**Abb. 1.1:** Prinzipieller Aufbau einer Reflectarray-Antenne mit Primärstrahler und planarer Fläche, auf die metallisierte Reflektorelemente aufgebracht sind.

Eine spezielle Bauform hat die gefaltete Reflectarray-Antenne mit einer in die Reflektorebene eingebetteten Speisevorrichtung. Dadurch ergeben sich als weitere Vorteile eine geringe Bautiefe, die Integrationsfähigkeit in ein Gehäuse sowie geringere Abschattungseffekte verglichen mit der frontalen Beleuchtung der Antennenfläche. Das Beispiel einer kommerziell genutzten gefalteten Reflectarray-Antenne ist in Abbildung 1.2 gezeigt [1]. Man sieht eine teilweise geöffnete Anten-

nenstruktur dieses Typs. Im Inneren ist der planare Reflektor mit metallisierten Flächen zu erkennen. Für eine typische Reflectarray-Antenne werden etwa 1000 dieser metallisierten Elemente, oder Patches, verwendet.



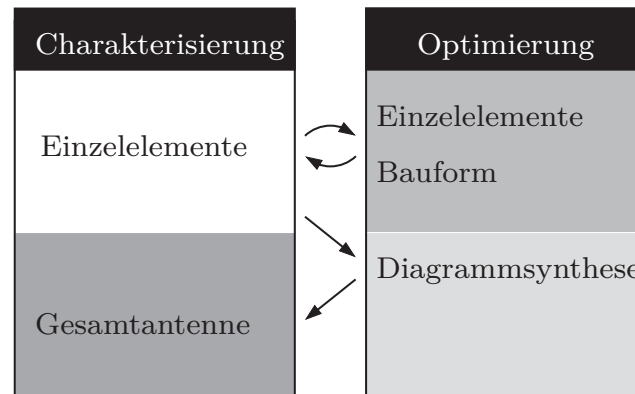
**Abb. 1.2:** Beispiel einer kommerziell genutzten Reflectarray-Antenne [1].

In aktuellen Forschungen steht die Weiterentwicklung dieser Antennen im Hinblick auf Rekonfigurierbarkeit im Vordergrund. Dabei handelt es sich um Prinzipien, bei denen die Einzelelemente des Reflectarrays so aufgebaut sind, dass sich ihre Eigenschaften mithilfe neuer Technologien gezielt verändern lassen.

Dadurch ergeben sich zahlreiche neue Möglichkeiten verschiedener Abstrahleigenschaften einer einzigen Antenne, so dass z. B. im Automobilbereich zur Fahrzeugumfeldererkennung die Funktion mehrerer Einzelantennen in eine einzige integriert werden kann. Allgemein lassen sich mit einer rekonfigurierbaren Antenne Zielbereiche verschiedener Richtungen nacheinander bestrahlen, so dass unter Einsatz von Signalverarbeitungs-Algorithmen sogar bewegten Zielen gefolgt werden kann.

Allerdings birgt diese Entwicklung neue Herausforderungen für den Entwurf und die messtechnische Charakterisierung der Antenne sowie natürlich auch

für die Forschung an Technologien zur Realisierung von rekonfigurierbaren Antennen. In Abbildung 1.3 sind die Anforderungen gezeigt, die sich durch den Übergang auf rekonfigurierbare Reflectarray-Antennen ergeben.



**Abb. 1.3:** Anforderungen zur Weiterentwicklung von Reflectarray-Antennen im Hinblick auf Rekonfiguration.

Neben der messtechnischen Charakterisierung der gesamten Antenne wird nun auch die Bestimmung des Verhaltens der einzelnen Elemente des Reflectarrays nötig: Aufgrund von fertigungsbedingten Abweichungen vom Entwurf bei neuartigen Technologien bis hin zu Ausfällen von Einzelelementen müssen diese nichtidealen Effekte erfasst und bestenfalls auch in die Ansteuerung der rekonfigurierbaren Antenne einbezogen werden. Damit kann die gewünschte Abstrahlcharakteristik der Antenne bestmöglich realisiert werden, auch wenn die Einzelelemente starke Abweichungen vom idealen Verhalten aufweisen. Somit wird nach einem Verfahren der Diagrammsynthese zur Optimierung der Abstrahleigenschaften der Antenne gesucht, das sich auf die realen Eigenschaften der Elemente stützt.

Ein weiterer Punkt zur Optimierung der Antenneneigenschaften ist gemäß Abbildung 1.3 die Untersuchung neuartiger Einzelstrukturen, die ein möglichst ideales Verhalten und geringe Verluste aufweisen. Weiterhin soll die Bauform der Antenne trotz rekonfigurierbarer Elemente vorteilhaft realisierbar sein, z. B. der Integration einer Vielzahl von Steuerleitungen.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung von Reflectarrays im Hinblick auf Rekonfigurierbarkeit. Sie entstand im Rahmen des Projektes „Rekonfigurierbare Millimeterwellen-Antennen mit steuerbaren hoch-anisotropen Flüssigkristallen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Dabei werden alle neuen Konzepte zuerst an Prototypen auf Basis von herkömmlichen Substratmaterialien untersucht. Anschließend werden sie mit rekonfigurierbaren Ar-



rays in Flüssigkristalltechnologie, oder *Liquid Crystal* (LC) Technologie, getestet.

Dieser zweite Schritt erfolgt im Rahmen dieses gemeinsamen Förderprojektes in Kooperation zwischen dem Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm und dem Institut für Mikrowellentechnik und Photonik der Technischen Universität Darmstadt. Durch die dortigen Forschungsarbeiten im Bereich der Flüssigkristalltechnologie für Mikrowellentechnik konnten alle vorgestellten Prinzipien mit rekonfigurierbaren LC-Arrays an der TU Darmstadt aufgebaut werden und mit den Kooperationspartnern an der Universität Ulm getestet und validiert werden.

Diese Kooperation ermöglicht die Untersuchung von den oben genannten Methoden an einem rekonfigurierbaren Konzept, im Einzelnen:

- die Anwendung der entwickelten Charakterisierungsmethoden, insbesondere zur Untersuchung von Einzelelementen;
- die Ausarbeitung von Prinzipien für neuartige Einzelelemente mit verbesserten Eigenschaften;
- die Realisierung rekonfigurierbarer Konzepte in der vorteilhaften Bauform gefalteter Reflectarray-Antennen;
- die Diagrammsynthese unter Anwendung der Partikelschwarmoptimierung und unter Einbezug der messtechnischen Charakterisierungsergebnisse.

Natürlich lassen sich alle diese Methoden und Ergebnisse prinzipiell auf weitere rekonfigurierbare Antennen übertragen. Die Grundlagen zum planaren Reflectarray, das in dieser Arbeit zur Untersuchung rekonfigurierbarer Ansätze herangezogen wird, finden sich in **Kapitel 2**. Hier werden sowohl seine Funktionsweise, als auch Konzepte zur Erzielung von Rekonfigurierbarkeit erläutert. Des Weiteren wird das Verfahren zum Antennenentwurf sowie Auswirkungen von notwendigen, vereinfachenden Annahmen hierbei behandelt.

In **Kapitel 3** werden mehrere Verfahren zur Charakterisierung von Reflectarrays vorgestellt. Neben Messaufbauten zur Bestimmung des gemittelten Verhaltens mehrerer Elemente sind auch zwei Methoden zur Vermessung der Einzelcharakteristika ausgearbeitet. Diese stützen sich auf die Verwendung des SAR-Prinzips (*Synthetic Aperture Radar*) oder eines speziell entwickelten Nahfeld-Messsystems mit Sonden hoher Ortsauflösung. Diese Verfahren sind bei herkömmlichen Reflectarrays interessant für die Untersuchung von Fertigungstoleranzen sowie Randeffekten an den Arraykanten. Desweiteren sind sie von großer Bedeutung für alle rekonfigurierbaren Reflectarrays zur Vermessung der nicht-idealen Einzelelemente. Die Charakterisierungsmethoden werden mit Demon-



---

strationsarrays bekannter Eigenschaften validiert und am Ende des Kapitels zur messtechnischen Charakterisierung eines LC-Arrays verwendet.

Im **4. Kapitel** steht die Optimierung von Reflectarrays im Hinblick auf Rekonfigurierbarkeit im Vordergrund. Dies beinhaltet gemäß Abbildung 1.3 die Entwicklung und die Untersuchung von verbesserten Einzelementen für Reflectarrays sowie die Prüfung ihrer Anwendbarkeit für rekonfigurierbare Konzepte. Zusätzlich wird hier die Bauform einer gefalteten Antenne so weiterentwickelt, dass sie sich für rekonfigurierbare Konzepte eignet.

Das **5. Kapitel** beschäftigt sich mit der Optimierung der Abstrahleigenschaften der Antenne. Es wird eine Methode zur Diagrammsynthese vorgestellt, die auf einer Partikelschwarmoptimierung beruht. Diese wird zuerst mit herkömmlichen Reflectarrays und dann mit einem LC-Reflectarray validiert. Dabei fließen die Ergebnisse aus den vorigen Kapiteln mit ein. Die in Kapitel 3 vorgestellten Charakterisierungsmethoden liefern die Eingabedaten für die Diagrammsynthese, wie in Abbildung 1.3 dargestellt ist. Zusätzlich wird beim Aufbau der LC-Antenne ein weiterentwickeltes Elementkonzept aus Kapitel 4 verwendet.

Hier werden Aufbauten für die Frequenzbereiche 35 GHz und um 77 GHz vorgestellt. Speziell die Antennen für das W-Band erfordern dabei sehr hohe Ansprüche an Technologie und Fertigungstoleranzen.



## 2 Entwurf quasiplanarer Apertur-Antennen

Planare Reflectarray-Antennen [2–4] haben den Vorteil einer kompakten Bauweise, geringen Gewichts, einfacher Fertigung und daraus resultierender reduzierter Kosten. Die Grundlagen zu diesen Antennentypen sollen in diesem Kapitel erläutert werden: In Abschnitt 2.1 werden gängige Bauformen von Reflectarray-Antennen vorgestellt, dabei sind auch Möglichkeiten der Rekonfiguration aufgezeigt, d.h. Technologien zur Erzeugung variabler Abstrahlcharakteristik. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 näher auf die Simulationemethode für Reflectarray-Strukturen eingegangen, bevor in Abschnitt 2.3 das simulierte Gesamtverhalten der Antenne beim Entwurfsverfahren behandelt wird. Die Auswirkungen notwendigerweise vernachlässigter Effekte bei diesem Prozess werden im letzten Abschnitt 2.4 untersucht.

### 2.1 Bauformen

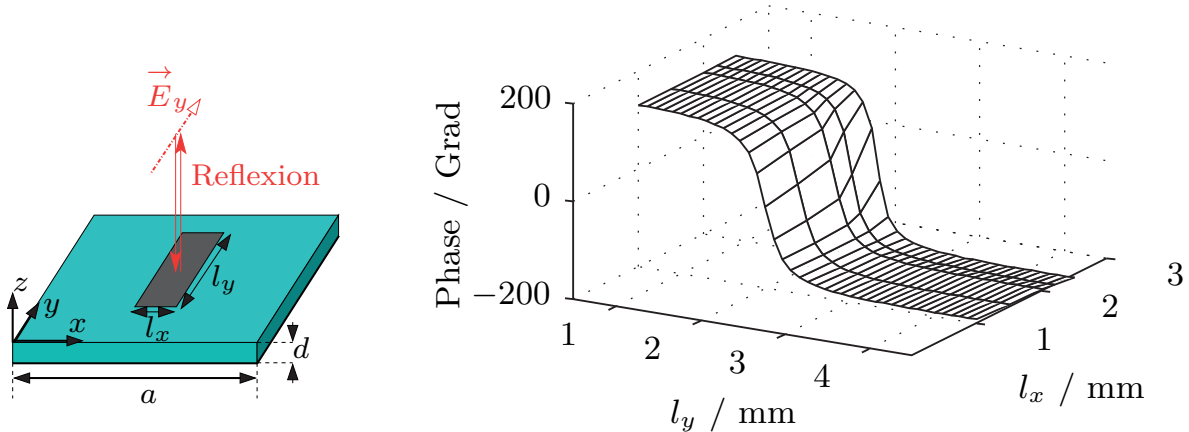
#### 2.1.1 Reflectarray-Antennen

Allen Antennen dieses Typs gemeinsam ist der planare Reflektor, die Reflectarray-Fläche. Diese ist mit Elementen bestückt, die bei Reflexion einer Welle eine Phasenverzögerung hervorrufen. Durch eine bestimmte Auswahl der Elemente auf dem Reflektor kann die Phasenkorrektur so gewählt werden, dass die Antenne bestimmte Abstrahleigenschaften besitzt. Die Reflectarray-Elemente können beispielsweise dazu genutzt werden, um Weglängenunterschiede der Freiraumausbreitung zu kompensieren oder um eine Phasenprogression auf dem Reflektor zu erzeugen, die zu einer bestimmten Hauptabstrahlrichtung der Antenne führt.

In Abbildung 2.1 (links) ist das Beispiel eines einfachen Reflectarray-Elements gezeigt [5]. Dabei handelt es sich um ein Substrat der Größe  $(a \times a)$  und Dicke  $d$  mit einer relativen Permittivität  $\epsilon_r$  und dem Verlustfaktor  $\tan \delta$ . Die Unterseite wird flächig metallisiert, auf der Oberseite ist ein metallisierter Dipol aufgedruckt, den man auch als Patch bezeichnet. Diese sogenannte Einheitszelle ist platzbegrenzt, ihre Ausdehnung  $a$  liegt in der Regel im Bereich einer halben Wellenlänge bei der Betriebsfrequenz; auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 2.3 genauer eingegangen. Fällt nun eine linear polarisierte Welle mit Polarisation des elektrischen Feldes in  $y$ -Richtung senkrecht auf das Element ein, so kann



ihre Reflexionsfaktorphase aufgrund der gewählten Dipollänge  $l_y$  um einen bestimmten Wert verschoben werden.



**Abb. 2.1:** Einheitszelle bestehend aus einem einlagigen, rückseitig metallisiertem Substrat der Dicke  $d$  mit einem metallisierten rechteckigen Patch (links) und zugehöriger Reflexionsfaktorphasen-Verlauf bei Polarisierung des elektrischen in  $y$ -Richtung (rechts).

In Abbildung 2.1 (rechts) ist die zugehörige simulierte Reflexionsfaktorphase des Elements zu sehen [6]. Je nach Zelltopologie, d.h. Aufbau, Struktur und Material, ist dieser verfügbare Phasenbereich mehr oder weniger eingeschränkt. Im vorliegenden Beispiel kann mit der Auswahl der Dipollänge  $l_y$  eine Reflexionsfaktorphase zwischen  $-200^\circ$  und  $+155^\circ$  eingestellt werden. Dabei treten die größten Phasenvariationen über der Veränderung der Dipollänge  $l_y$  entlang der Polarisationsrichtung  $E_y$  auf. Mit der Variation der Patchbreite  $l_x$  lassen sich dagegen nur geringe Phaseneinstellungen vornehmen.

In der Simulation werden die Elemente in einem unendlich periodisch fortgesetzten Gitter in  $x$ - und  $y$ -Richtung, einem Array, simuliert. Obwohl in der Regel nur ein Einzelelement dargestellt wird, die sogenannte Elementarzelle, beruht also die Simulation auf einem Verband aus unendlich vielen Elementen. Bei Polarisierung des elektrischen Feldes in  $y$ -Richtung, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, werden die Begrenzungen der Einheitszelle in  $y$ -Richtung mit idealen magnetischen Wänden bei  $x=0$  und  $x=a$  und in  $x$ -Richtung mit elektrischen Wänden bei  $y=0$  und  $y=a$  versehen, um das Verhalten eines unendlich wiederholten Verbandes dieser Zelle zu simulieren. Die simulierte Gesamtstruktur wird aufgrund ihres frequenzselektiven Verhaltens FSS genannt, *Frequency Selective Surface*. Der periodische Wiederholfaktor  $a$  entspricht dabei der Größe der Elementarzelle, er ist meist in beiden Dimensionen  $x$  und  $y$  gleich groß gewählt. In

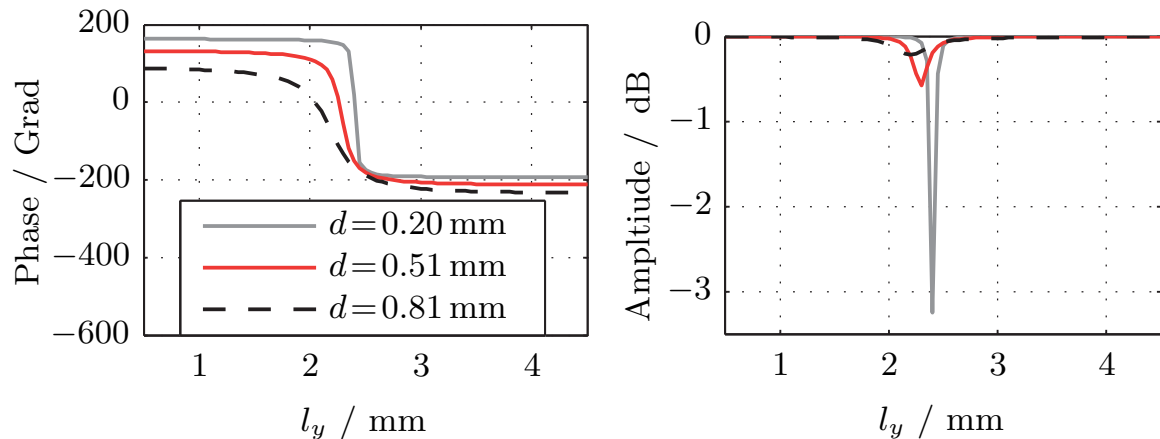
diesem Zellabstand werden später die Elemente auf dem Reflektor angeordnet, somit ist ihre gegenseitige Verkopplung in der Simulation bereits näherungsweise berücksichtigt. Entgegen der Simulation werden die metallisierten Patches der Antenne unterschiedliche Dimensionen haben, da sie, je nach Position auf dem Reflektor, unterschiedliche Phasenverschiebungen vornehmen sollen.

Der berechnete Reflexionsfaktor wird als Grundlage zum Antennenentwurf benötigt, weicht aber in drei wichtigen Punkten von der gefertigten Antenne ab:

- Im Gegensatz zur FSS ist die reale Antenne nicht unendlich ausgedehnt, was zu einer veränderten Verkopplung der Elemente in den Randgebieten und zu Kanteneffekten führt.
- Die FSS-Simulation geht von einem gleichförmigen Array, einer Anordnung exakt gleicher Elemente aus, während beim Antennenentwurf alle Nachbarelemente unterschiedliche Patchdimensionen aufweisen, um unterschiedliche Reflexionsphasen zu erzeugen.
- Der Einfallswinkel der einfallenden Welle ist meist nicht senkrecht und variiert leicht für jedes Element auf dem Reflektor, je nach geometrischem Aufbau der Antenne und Position des Elements.

Der zweite Punkt hat geringere Auswirkungen als zunächst anzunehmen ist, da sich die benötigten Reflexionsfaktorphasen stetig mit der Reflektorposition ändern, also nur geringe geometrische Variationen zwischen Nachbarelementen vorkommen. Größere Sprungstellen geometrischer Variation treten nur an manchen Stellen auf, wenn zum Beispiel zwei benachbarte Elemente den Übergang von verfügbarer Minimal- zu Maximalphase vollziehen. Auch die endliche Ausdehnung ist bei ausreichender Zahl an Zellen auf der Antenne nicht problematisch. Es muss beim Entwurf zudem darauf geachtet werden, dass die Randgebiete der Antenne nicht zu stark bestrahlt werden, um unerwünschte Nebenkeulen und Kanteneffekte zu reduzieren.

Die Zelltopologie hat entscheidende Auswirkungen auf das Reflexionsverhalten der FSS-Struktur. Dazu gehört neben Lagenaufbau, Substratmaterial und Patchgeometrie auch die Substratdicke  $d$ . In Abbildung 2.2 ist die mit dem Programm *Ansoft Designer* [6] simulierte Reflexionsfaktorcharakteristik einer FSS-Struktur über der Patchlänge  $l_y$  bei konstanter Patchbreite  $l_x$  und für drei verschiedene Substratdicken gezeigt [5]. Das gewählte Substratmaterial ist 4003C der Firma Rogers, das u. a. in den Dicken 0.2 mm, 0.51 mm und 0.81 mm verfügbar ist. Die Dicke der Metallisierungsschichten beträgt jeweils 0.017 mm. Die Simulationsfrequenz ist 35 GHz, die Wiederholdistanz  $a$  der Zellen beträgt  $0.55\lambda_0$  bei der Entwurfsfrequenz, also 4.71 mm. Auf die Wahl des Abstandes der Einzelemente wird in Abschnitt 2.3 auf Seite 31 näher eingegangen.



**Abb. 2.2:** Phasen- (links) und Amplitudenverlauf (rechts) des Reflexionsfaktors in Abhängigkeit der Dimension  $l_y$  einer FSS-Patchstruktur für drei verschiedene Substratdicken  $d$  bei 35 GHz.

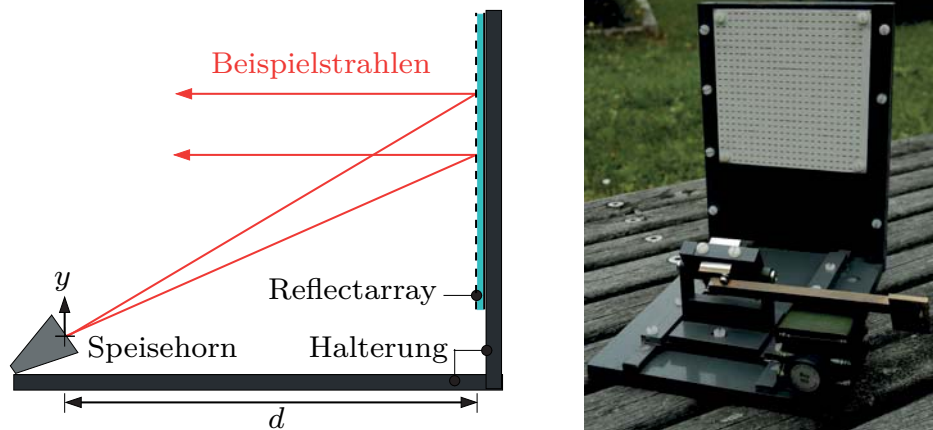
Interessant bei den Simulationsergebnissen aus Abbildung 2.2 ist die Verknüpfung jedes Phasenwertes mit einer charakteristischen Reflexionsfaktoramplitude. Betrachtet man den Dipol als Resonator der Länge  $l_y$ , so findet man an Stelle der Resonanzlänge den Punkt größter Phasensteilheit, bei den Simulationskurven etwa zwischen 2.1 mm und 2.3 mm. Gleichzeitig tritt an dieser Stelle auch ein Amplitudeneinbruch aufgrund der vergrößerten Verluste bei Resonanz auf. Diese setzen sich aus dielektrischen und ohmschen Verlusten zusammen. Je größer die Resonatorgüte ist, umso höher sind auch Phasensteilheit und Reflexionsfaktorverluste bei Resonanz. In Abbildung 2.2 fällt auf, dass Substrate geringer Dicke, hier  $d=0.2$  mm, als Resonatoren hoher Güte fungieren. Dies führt einerseits zu größeren abgedeckten Phasenbereichen; in diesem Fall ist schon mit einer einfachen einlagigen Struktur mit Einzelpatch ein Phasenbereich von fast  $360^\circ$  abgedeckt. Auf der anderen Seite führt die hohe Phasensteilheit bei solchen Elementen zu hoher Empfindlichkeit bezüglich Maßhaltigkeit, da eine kleine Abweichung in der Patchdimension  $l_y$  bereits zu stark veränderten Phasenwerten führt. Weiterhin sind die Verluste bei Resonanz sehr hoch, wie in Abbildung 2.2 (rechts) zu sehen ist. Eine Übersicht der drei Simulationsergebnisse ist in Tabelle 2.1 gegeben [5].

Eine der einfachsten Bauweisen von Reflectarray-Antennen ist die Platzierung einer Speisung vor dem Reflektor. Dies kann zentral vor der Substratfläche erfolgen oder versetzt, in einer *Offset-Feed*-Anordnung [3, 4]. Schema und Foto dieses Antennentyps sind in Abbildung 2.3 zu sehen [5]. Die Hauptabstrahlrichtung der dargestellten Antenne ist senkrecht zur Reflektoroberfläche. Durch die

Versetzung des Speisehorns sind Abschattungseffekte, *Feed Blocking*, in Hauptabstrahlrichtung der Antenne gering gehalten.

Substratdicke $d$ / mm	0.2	0.51	0.81
Phasenbereich $\Delta\phi$ / °	356	343	320
Phasensteigung bei Resonanz / [°/mm]	5420	1742	638
Maximale Dämpfung / dB	3.25	0.59	0.22

**Tab. 2.1:** Vergleich der Reflexionsfaktorcharakteristik bei drei Substratdicken.



**Abb. 2.3:** Querschnitt (links) und Foto (rechts) einer Reflectarray-Antenne mit versetzter Speisung (*Offset Feed*-Antenne).

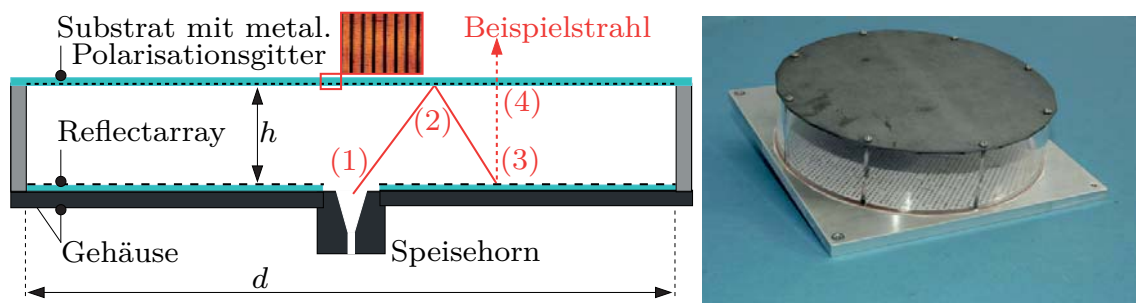
Die Dimensionen der Patchgrößen einer Antenne gemäß Abbildung 2.3 sind so gewählt, dass ihre Phasenverschiebungen die Weglängenunterschiede der Beispielstrahlen in Abhängigkeit ihrer Elementposition auf dem Reflektor kompensieren. Dazu wird die simulierte Phasencharakteristik zu Hilfe genommen, die in 2.2 dargestellt ist. Um eine ebene ausfallende Welle und senkrechte Abstrahlrichtung der Offset-Feed-Antenne aus Abbildung 2.3 zu erreichen, beträgt die nötige Phasenkompensation  $\Delta\varphi$  an der Stelle  $(x, y)$  des Reflektors

$$\Delta\varphi(x, y) = k_0 \sqrt{d^2 + x^2 + y^2} \quad (2.1)$$

Mögliche Antennen zur Speisung sind u. a. ein konisch zulaufendes Horn für gute Strahlbündelung oder ein Zweimodenhorn mit hoher Polarisationsreinheit. Näheres zu diesen beiden Speisehorntypen ist in Anhang A.1 auf Seite 155 zu finden.

### 2.1.2 Gefaltete Reflectarray-Antennen

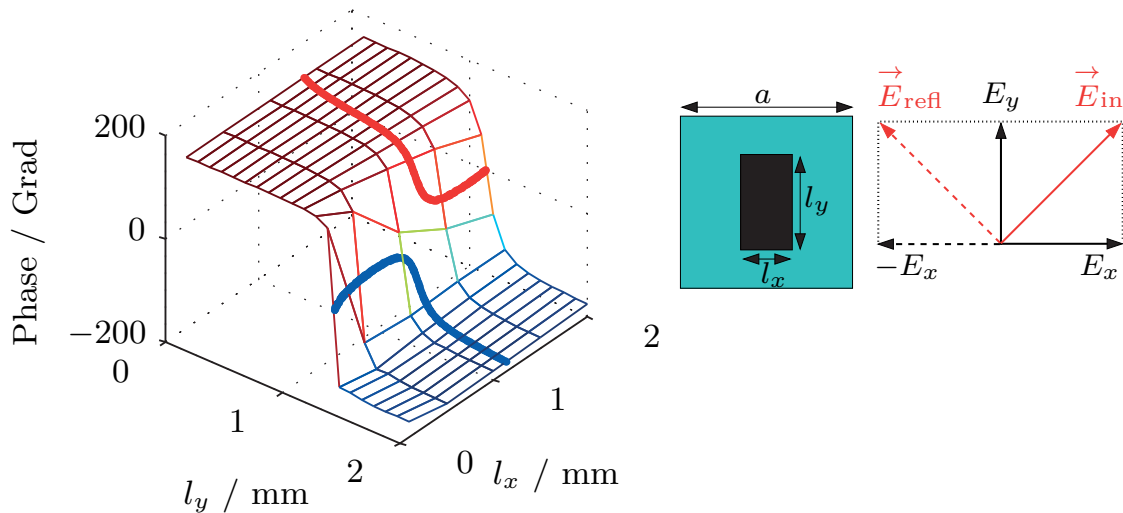
In diesem Abschnitt soll näher auf die gefaltete Reflectarray-Antenne [7] eingegangen werden. Aufbau und Funktion einer solchen Antenne sind in Abbildung 2.4 zu sehen, dort ist ein Querschnitt durch das Gehäuse dargestellt. Die Antenne besteht aus einem runden Speisehorn, das mittig in einem Reflectarray mit Einzelzellen eingebracht ist, und einem metallisierten Polarisationsgitter, das auf ein dielektrisches Substrat aufgedruckt ist. Ein Beispielstrahl in Abbildung 2.4 zeigt den Strahlengang im Inneren der Antenne in vier Schritten: Die vom Horn mittig eingespeiste Welle (1) wird am oberen Gitter reflektiert (2), da ihre Polarisierung parallel zu den Gitterlinien ausgerichtet ist. An den Patchelementen des unteren Reflektors tritt eine zweite Reflexion in Schritt (3) auf. Durch die dort angebrachten Reflectarray-Elemente wird eine Phasenkorrektur vorgenommen, die abhängig von ihrer relativen Position zur Speisung ist. Somit kann beim Entwurf der Antenne durch Festlegung des Phasenverlaufs auf dem Reflektor aus einer Vielzahl von möglichen Antennendiagrammen eine gewünschte Abstrahlcharakteristik realisiert werden. In dieser Antenne haben die Einzelelemente neben der Phasenverzögerung eine weitere Aufgabe: Sie müssen für eine Polarisationsdrehung der Welle um  $90^\circ$  sorgen, damit diese in Schritt (4) das Polarisationsgitter passieren kann.



**Abb. 2.4:** Querschnitt (links) und Foto (rechts) einer gefalteten Antenne.

Nach Abbildung 2.4 muss daher in Schritt (3) bei der Reflexion am Reflectarray eine Polarisationsdrehung erfolgen, damit die Welle im letzten Schritt die Antenne durch das Polarisationsgitter verlassen kann. Dazu sind nur Einzelelemente mit besonderen Patchdimensionen in der Lage. In Abbildung 2.5 sind die Polarisationsrichtungen in Abhängigkeit der Patchdimension für eine Polarisationsdrehung auf dem unteren Reflektor dargestellt. Die auf dem unteren Reflektor einfallende Welle  $\vec{E}_{in}$  ist parallel zu den Gitterlinien und im  $45^\circ$ -Winkel relativ zur Patchausrichtung polarisiert. Die Polarisation der reflektierten Welle

$\vec{E}_{\text{refl}}$  soll gegenüber der einfallenden Welle um  $90^\circ$  rotiert sein, um nun senkrecht zu den Gitterlinien ausgerichtet zu sein. Das ist möglich, wenn sich die Phasendifferenz zwischen  $E_x$  und  $E_y$  gegenüber dem Wert vor der Reflexion um  $180^\circ$  ändert.



**Abb. 2.5:** Phasenverlauf des Reflexionsfaktors von  $E_y$  in Abhängigkeit der Dimensionen  $l_x$  und  $l_y$  einer FSS-Patchstruktur mit Kennzeichnung der Patchdimensionen für Polarisationsdrehung (links) und zugehörige Einheitszelle mit den entsprechenden Polarisierungen (rechts).

In Abbildung 2.5 (rechts) ist der Fall dargestellt, dass die Phasenkomponente von  $E_y$  keine Phasendifferenz erfährt, aber diejenige von  $E_x$  einen Phasenunterschied von  $180^\circ$  zwischen den Werten vor und nach der Reflexion aufweist. Damit dreht sich der Gesamtvektor  $\vec{E}_{\text{in}}$  bei Reflexion um  $90^\circ$  in Richtung  $\vec{E}_{\text{refl}}$ . Die Patchdimensionen, die diese Phasendifferenz bei Reflexion vollziehen und sich damit zur Polarisationsdrehung eignen, sind in Abbildung 2.5 (links) in der Simulationskurve markiert. Diese Kurve wurde mit dem Programm Designer von Ansoft [6] berechnet. Die Lage der Patchdimensionen mit Polarisationsdrehung ist in der Simulationskurve an der Diagonalen gespiegelt, da die relative Phasendifferenz bei Umkehr der  $x$ - und  $y$ -Dimensionen der Zelle dieselbe bleibt.

Der gezeigte Antennentyp hat eine kompakte Bauweise mit halbiertem Höhe durch Faltung im Gegensatz zu direkter Speisung, sowie geringe Verluste und eine hohe Effizienz. Daher wurde die gefaltete Reflectarray-Antenne in mehreren Variationen weiterentwickelt, u. a. finden sich Möglichkeiten zur Strahlschwenkung in diskreten Schritten (*Multiple Beam*) [7] oder eines zusätzlichen Freiheitsgrades durch Einbringen weiterer Reflexionselemente in das Polarisations-

gitter [8]. Weitere Ausführungen dazu werden in Kapitel 4 behandelt. Damit eignet die Antenne sich hervorragend zu Anwendungen in der Radarsensorik, u. a. beim Einsatz im automobilen Umfeld [9] oder bei Anwendungen im Flugverkehr zur Rollfeldüberwachung [10].

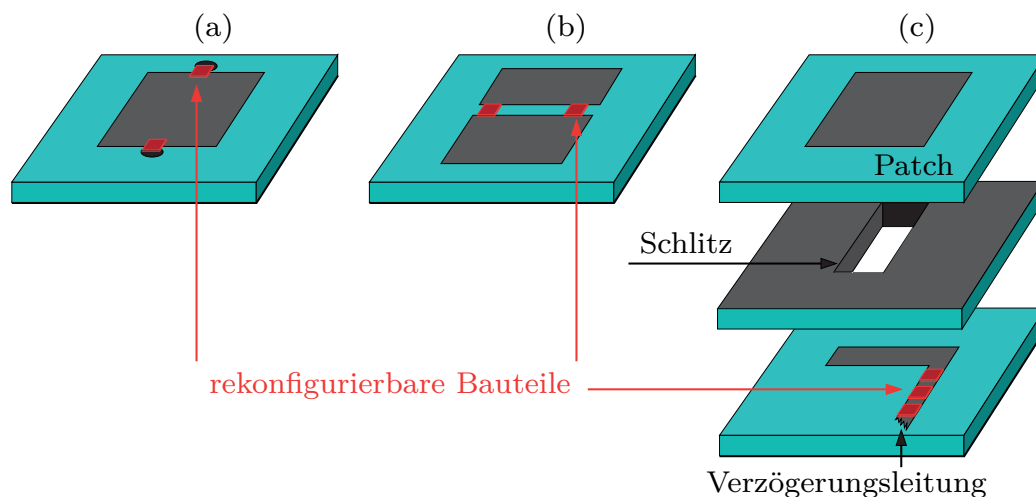
Neben Reflectarray-Antennen werden FSS-Strukturen auch in Transmission verwendet, um einen Phasenverlauf über einer sogenannten planaren Linse zu realisieren [11]. Darauf kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden.

### 2.1.3 Konzepte für rekonfigurierbare Antennen

Beim Antennenentwurf kann bei den vorgestellten Antennentypen eine Vielzahl von Fernfelddiagrammen entworfen werden, beispielsweise verschiedenen Hauptstrahlrichtungen oder speziellen Diagrammformen wie bei Cosecans-Antennen. Der Reflektor wird einmalig konfiguriert mit fest metallisierten Strukturen, daher sind nach Fertigung der Antenne im Allgemeinen keine Änderungen der Abstrahlcharakteristik möglich. Weiterentwicklungen dieser Antennen verwenden verschiedene Speisepunkte zur Erzeugung mehrerer diskreter Abstrahlwinkel (*Multiple Beam*) [8, 12, 13] oder auch Vorrichtungen zum mechanischen Schwenken der Hauptkeule [7]. Weiterhin sind Kombinationen aus Reflectarrays und Linsen möglich, wobei durch Brennpunktverschiebung eine veränderte Abstrahlrichtung bewirkt wird [14, 15].

Ein anderer Ansatz eignet sich zur kontinuierlichen Strahlschwenkung sowie zu einer zeitlichen Abfolge verschiedenster Antennendiagramme. Durch Rekonfiguration der Einzelelemente können an jeder Stelle des Reflectarrays unterschiedliche Phaseneinstellungen vorgenommen werden, die sich, z. B. mit einer Kontrollspannung pro Zelle, ändern lassen.

Im Folgenden sollen einige Technologien zur Erstellung rekonfigurierbarer Reflectarrays gezeigt werden. Eine Übersicht rekonfigurierbarer Technologien für Antennen im Mikrowellenbereich findet sich beispielsweise in [16–18]. Gängige Methoden benutzen rekonfigurierbare Elemente wie Schalter oder Dioden, um eine Phaseneinstellung an der Einheitszelle vorzunehmen. Drei Beispiele sind in Abbildung 2.6 gezeigt. Man kann die effektive Länge des Patches variieren (a) bzw. verschiedene Patchlängen über rekonfigurierbare Schlitze ankoppeln (b). Weiterhin bietet es sich an, ein phasenverzögerndes Element, z. B. eine längenverstellbare Verzögerungsleitung, unterhalb des Patches über einen Schlitz anzukoppeln (c). Dies ist mit verschiedenen Phasenschiebern möglich, allerdings muss die Größenlimitierung einer Einheitszelle beachtet werden.



**Abb. 2.6:** Möglichkeiten einer Reflectarray-Einheitszelle mit rekonfigurierbaren Bauteilen.

### Varaktordioden

Eine Möglichkeit zur Rekonfiguration von Reflectarrays ist das Einbringen einer Varaktordiode in die Patchstruktur. Somit kann durch kontinuierliches Verändern der Diodespannung ihre Kapazität eingestellt werden und damit die effektive Patchlänge variiert werden. Die Diode kann z. B. am Ende des Patches gegen die Massefläche kurzgeschlossen werden, in [19, 20] wurden hierbei Phasenbereiche von  $180^\circ$  bei 10.8 GHz abgedeckt. Eine weitere Methode ist das Unterteilen des Patches mit Verbindungen aus zwei Dioden [21–23], hier wurde ein Phasenbereich von  $325^\circ$  bei 5.8 GHz erreicht. Untersuchungen zu FSS-Transmissionsstrukturen basierend auf Ringresonatoren, die mittels Varaktordioden verstimmt werden, sind in [24] zu finden. Ein Reflectarray aus  $6 \times 6$  Elementen bestehend aus einer Patch-Varaktor-Kombination wird in [25] für 6.15 GHz vorgestellt. Hier wurde ein Schwenken der Hauptkeule um bis zu  $\pm 15^\circ$  mit einem Nebenkeulenabstand von 9 dB erreicht. Der Vorteil dieser Konzepte sind die kontinuierlichen Phaseinstellungen mit einer Kontrollspannung pro Zelle. Nachteilig ist ihre mangelnde Eignung für höhere Frequenzbereiche, da dort die parasitären Effekte von Varaktordioden zu groß werden.

### PIN-Dioden

Aufgrund ihrer geringen Kapazität im Sperr- und ihres geringen Widerstandes im Durchlassfall eignen sich PIN-Dioden zur Rekonfiguration von Reflectarrays. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Kapazitätsänderung von Varaktordioden bieten PIN-Dioden im Wesentlichen Schaltfunktionalität, was andere Konzepte