



Thorsten Tischler (Autor)

# Die Perfectly-Matched-Layer-Randbedingung in der Finite-Differenzen-Methode im Frequenzbereich: Implementierung und Einsatzbereiche



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2863>

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

## 1.1 Bedeutung der em-Simulation von Mikrowellenschaltungen

Wichtige Anwendungsgebiete kommerziell genutzter integrierter Mikrowellenschaltkreise liegen in der Mobil- und Satellitenkommunikation, sowie im Bereich intelligenter Sensorsysteme wie Radaranwendungen für die Automotive Industrie. Die Bedienung solcher Massenmärkte erfordert kostengünstige Herstellungsprozesse. Als Schlüsseltechnologie fungiert hierbei die monolithische Integration von Mikrowellenschaltkreisen (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) auf einem Halbleitersubstrat. MMIC's integrieren, neben den aktiven Komponenten (Transistoren, Dioden), eine Vielzahl passiver Strukturelemente. Hierzu zählen Kapazitäten und Induktivitäten, aber auch diverse Leitungsbaulemente und Filter.

Durch die stetige Miniaturisierung der elektrischen Schaltungen, die dadurch auch bei immer höheren Frequenzen betrieben werden können, wird die sorgfältige Simulation der elektrischen Übertragungseigenschaften passiver Schaltungselemente unabdingbar. Fortschrittliche numerische Verfahren, wie die Finite-Elemente- oder auch die Finite-Differenzen-Methode erlauben hierbei eine vollständige elektromagnetische- (em-) Simulation beliebig gestalteter dreidimensionaler Strukturen. So können bereits in der Designphase der Schaltung unerwünschte Störeffekte wie Übersprechen, die Entstehung von Oberflächenwellen, die Ankopplung unerwünschter Moden oder Abstrahlungseffekte detektiert und beseitigt werden.

Neben der Optimierung von einzelnen passiven Schaltungselementen gewinnt die (Teil-) Simulation hybrider Aufbauten immer mehr an Bedeutung. Als Beispiel sei hier das modulare Design integrierter HF-Module (Multichip Modules, MCM) genannt. Diese Aufgaben stellen, aufgrund ihrer Komplexität, enorme Anforderungen an die Effizienz des verwendeten numerischen Verfahrens.

Da bei integrierten Schaltungen keine nachträgliche Abstimmung der einzelnen Bauelemente möglich ist, wird eine sorgfältige Vorab-Simulation der einzelnen Schaltungselemente unabdingbar. Hierbei können nur wenige rudimentäre Schaltungselemente mit analytischen Methoden beschrieben werden. Die Übertragungseigenschaften komplexer Geometrien lassen sich mit numerischen Verfahren ermitteln. Das rechnergestützte Schaltungsdesign dient somit als Werkzeug zur Kosten- und Zeitersparnis, um mehrfache Prototypen-Design-Läufe zu vermeiden. Es ist deshalb festzustellen, dass die innovative Weiterentwicklung im Bereich der Halbleitertechnologie aufs Engste mit der Verwendung leistungsfähiger em-Simulationwerkzeuge verknüpft ist.

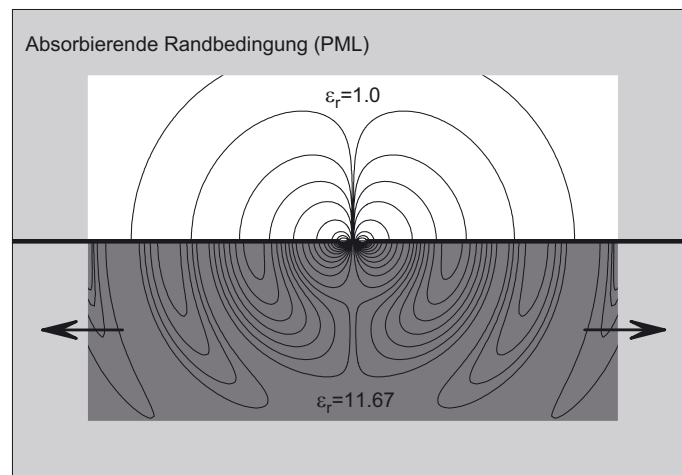
## **1.2 Bedeutung und Anwendung absorbierender Randbedingungen**

Vorraussetzung für die Anwendbarkeit der gängigen Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Verfahren ist die Vorgabe fest definierter Felder an den Berandungen des finiten Rechengebietes. Klassischerweise werden hier sogenannte elektrische oder magnetische Randbedingungen vorgegeben. Allerdings ist oftmals an den Berandungen eines Rechengebietes keine rein normale (elektrische Wand) oder tangential (magnetische Wand) Ausrichtung der elektrischen Feldstärke zu erwarten. Um trotzdem die elektromagnetische Wechselwirkung der dort allokierten Felder mit dem Raum außerhalb der Berandung präzise nachbilden zu können, werden offene oder auch absorbie-

rende Randbedingungen (Absorbing Boundary Condition, ABC) verwendet, die diesen Außenraum emulieren.

Bei der elektromagnetischen Simulation von Hochfrequenzstrukturen erfüllen absorbierende Ränder zwei wesentliche Aufgaben:

Zum einen ermöglichen sie die Berechnung der Abstrahlung bei Antennen oder durch parasitäre Effekte, wie sie beispielsweise in Form von Leckwellen auf Leitungen auftreten. Der letztgenannte Sachverhalt soll anhand von Bild 1.1 verdeutlicht werden, wo eine Koplanarleitung einen Teil des hochfrequenten Eingangssignals seitlich in das Substrat abstrahlt. Es sind

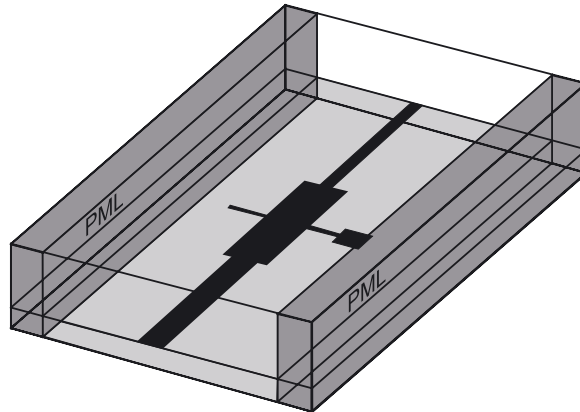


**Abbildung 1.1:** Elektrische Feldlinien einer Koplanarleitung mit unendlicher Masseausdehnung. ABC-Berandungen emulieren die unendliche Ausdehnung der Struktur.

die Feldlinien der Koplanarmode dargestellt, aufgrund der hohen Signalfrequenz (500 GHz) wird ein wesentlicher Anteil des Eingangssignals seitlich in das Substrat abgestrahlt.

Außerdem können mit ABC's Begrenzungen des Rechengebiets realisiert werden, derart dass die Einflüsse der Berandung auf das elektrische Verhalten der untersuchten Struktur unterdrückt werden. Diesen Aspekt soll die Darstellung 1.2 verdeutlichen. Die dargestellte „Phase-Bridge“ erfordert einen Berechnungsquerschnitt dessen Breite oberhalb der halben Wellenlänge der

Betriebsfrequenz liegt. Die Verwendung von elektrischen oder magnetischen Seitenwänden würde eine Art künstlichen Hohlraumresonator erzeugen, der unerwünschte Rückwirkungen auf das elektrische Übertragungsverhalten des Wellenleiters zur Folge hätte.



**Abbildung 1.2:** Typisches Streuproblem in der Mikrowellentechnik: „Phase-Bridge“ mit Signalzuleitungen. Die Abmessungen der Kurzschluss- und Leerlauf-Stubs liegen im Bereich der halben Länge der Betriebsfrequenz. Die Struktur wird mit seitlichen ABC's berandet.

Zur Generation absorbierender Randbedingungen existieren verschiedene Ansätze. Im Falle der sogenannten offenen Randbedingungen wird ein spezieller Randwertoperator definiert, der den Einfluss der Felder im Außenraum auf die Berandung projiziert. Die Bestimmung eines solchen Operators gestaltet sich jedoch, speziell im Falle rechteckförmiger Berandungen, schwierig. Des weiteren führt die Implementierung solch offener Ränder zu einem stark erhöhten Rechenaufwand bei der Lösung mit numerischen Verfahren, da alle Feldgrößen auf dem Rand miteinander verknüpft werden müssen. Daher hat sich mittlerweile die Verwendung absorbierender Randbedingungen, bei denen die einfallenden Wellen in einem speziellen, verlustbehafteten Gebiet absorbiert werden, durchgesetzt. Dieser Ansatz der Perfectly-Matched-Layer (PML) [1] erweist sich als derzeit (2003) effektivste absorbierende Randbedingung.

## 1.3 Ziel und inhaltliche Übersicht der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Eigenschaften und Grenzen der PML-Randbedingung bei Verwendung im Frequenzbereich, konkret im Rahmen der Finite-Differenzen Frequenzbereichs-Methode (Finite-Differences in Frequency-Domain, FDFD).

Einem einführenden Kapitel 2 über die Entwicklung und Herleitung absorbierender Randbedingungen im Allgemeinen und der verschiedenen PML-Ansätze im Besonderen schließt sich das Kapitel 3 mit einer Erläuterung der Grundlagen der verwendeten FDFD Methode an.

Insbesondere die Verwendung der PML-Randbedingung im Wellenleiter-Fall erweist sich als problemreich. Die laterale PML führt zu unerwarteten Veränderungen im Modenspektrum, was eine angepasste Eigenwertsuche nötig macht. Die Untersuchungen hierzu sind Bestandteil von Kapitel 4. Hier wird auch die Fragestellung gelöst, wie man die physikalischen Moden eines Wellenleiters von den unphysikalischen Moden, verursacht durch das PML berandete Rechengebiet, unterscheiden kann. Ein weiterer Aspekt ist die Genauigkeitsbetrachtung bei Berechnungen mit seitlichen PML's. Im Gegensatz zur, bereits hinlänglich untersuchten, Bestimmung der Dämpfung bei senkrechtem Welleneinfall, werden hier die PML-Eigenschaften bei streifendem Welleneinfall betrachtet.

Die erfolgreiche Implementierung der PML in den Eigenwertlöser, in Verbindung mit einem speziellen Kriterium zur Trennung physikalischer und unphysikalischer Moden, erlaubt eine genaue Untersuchung der Dispersions- und Abstrahlungseigenschaften koplanarer Wellenleiter im Terahertz-Frequenzbereich, dies wird im Kapitel 5 vorgestellt.

Das Kapitel 6 behandelt die Verwendung der PML in Verbindung mit dem dreidimensionalen FDFD-Verfahren zur Streumatrixberechnung. Es zeigt sich, dass die numerische Implementierung der Frequenzbereichs-PML Re-