

# Numerische Methoden zur Bestimmung der Einkopplungseffizienz in Multimode-Wellenleiter

S. Ziolkowski, K.-H. Brenner

Lehrstuhl für Optoelektronik, Universität Mannheim

[sz@oe.ti.uni-mannheim.de](mailto:sz@oe.ti.uni-mannheim.de)

Eine wichtige Aufgabe bei der Simulation von optischen Verbindungen ist die Abschätzung der Einkopplungseffizienz. Da das Modenfeld der betrachteten Wellenleiter nicht exakt bestimmbar ist, können modenbasierte Berechnungsverfahren nicht eingesetzt werden. In diesem Beitrag betrachten wir verschiedene numerische Verfahren zur Bestimmung der Einkopplungseffizienz und vergleichen die berechneten Ergebnisse mit den experimentell gewonnenen Daten.

## 1 Einführung

Die optische Verbindungstechnik spielt auch auf der Board-zu-Board- oder Chip-zu-Chip-Ebene eine wachsende Rolle. Hierzu werden passive Strukturen für die Kopplung von Halbleiterlasern an Multimode-Wellenleiter benötigt. Eine wichtige Aufgabe ist dabei die Abschätzung der Einkopplungseffizienz. Da das Modenfeld der betrachteten Wellenleiter nicht exakt bestimmbar ist, können modenbasierte Berechnungsverfahren nicht eingesetzt werden. Wegen der Dimensionen der Wellenleiter ist auch die Anwendung strahlenoptischer Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit nicht klar. In diesem Beitrag betrachten wir verschiedene numerische Verfahren zur Bestimmung der Einkopplungseffizienz und vergleichen die berechneten Ergebnisse mit experimentellen Daten.

## 2 Numerische Methoden zur Bestimmung der Einkopplungseffizienz

Um die Simulationen zu vereinfachen wird in diesem Beitrag eine gaussförmige Quelle mit dem Divergenzwinkel  $\mathbf{u}$  und der Wellenlänge  $I$  verwendet. Hiermit ist das elektrische Feld an der Stelle  $z$  mit folgender Gleichung beschrieben:

$$u(x, y, z) = \left( \frac{1}{s_z^2} - i \frac{1}{IR_z} \right) \cdot e^{-\frac{p}{s_z}(x^2+y^2)} \cdot e^{i \frac{p}{IR_z}(x^2+y^2)}$$

wobei  $s_0$  die Startbreite und  $s_z$  die Breite an der Stelle  $z$  einer Gaussfunktion darstellt.

Unter Anwendung dieser Quellenbeschreibung werden folgende Ansätze zur Berechnung der Einkopplungseffizienz untersucht:

### a) Clipping im Ortsraum

Hier ist die Berechnung der Einkopplungseffizienz durch einfache Ortsblende mit dem Blendenradius  $R$  ersetzt. Die eingekoppelte Energiemenge kann direkt bestimmt werden:

$$h(R, s_z) = 1 - e^{-2 \left( \frac{R}{s_z} \right)^2}$$

### b) Clipping im Orts- und Frequenzraum

Dies kann als Erweiterung der ersten Methode betrachtet werden. Hier ist zusätzlich die Anpassung der numerischen Aperturen der Quelle und Faser durch Einsatz einer Blende im Frequenzraum berücksichtigt. Zuerst wird die Frequenzfilterung durchgeführt, wobei der Blendendurchmesser wie folgt definiert ist:

$$d = \frac{2 \cdot NA}{I} \quad \text{mit dem Sampling: } dn = \frac{1}{N \cdot dx}$$

Danach wird die Ortsblende wie in der ersten Methode angewendet.

### c) Ausbreitung mit Beam Propagation Methode

Die BPM [1] gehört zu den typischen numerischen Verfahren zur Simulation der Ausbreitung innerhalb der Wellenleiter. Hier sind die Einkopplungsverluste direkt durch die Ausbreitung innerhalb der Wellenleiter berücksichtigt. Leider basiert diese Methode auf der paraxialen Näherung, was zum Berechnungsfehler im Fall größerer numerischer Aperturen führen kann.

### d) Ausbreitung mit Wave Propagation Methode

Die WPM ist ein strikt nicht-paraxiales numerisches Simulationsverfahren [2]. Hier wird das ankommende Wellenfeld in einzelne Planwellen zerlegt. Für eine Wellenkomponente kann die

Ausbreitung in dünnen Phasenelementen berücksichtigt werden. Dies kann für einen z-Schritt wie folgt ausgedrückt werden:

$$E(x, y) = \sum_n \sum_m \tilde{E}(\mathbf{n}, \mathbf{m}) \cdot e^{2\pi i(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{m} \cdot \mathbf{y})} \cdot e^{idz \sqrt{n(x,y)^2 k_0^2 - (2\pi \mathbf{n})^2 - (2\pi \mathbf{m})^2}}$$

Da diese Methode keine Kleinwinkelnäherung verwendet, wird die Lichtausbreitung viel genauer als mit der BPM berechnet.

### 3 Simulierter Aufbau

Um die Simulationsergebnisse mit den experimentell gewonnenen Daten zu vergleichen wurde folgender Aufbau vorbereitet:

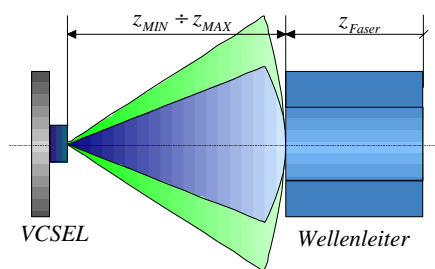


Abb. 1 Simulierter Aufbau.

Durch den Ansatz der verschiedenen numerischen Aperturen der Quelle sind verschiedene Aspekte der Anpassung zwischen der Quelle und Wellenleiter untersucht worden. Die gemessene bzw. simulierte Einkopplungseffizienz war als Funktion der Entfernung zwischen Quelle und Wellenleiter dargestellt. Als Wellenleiter wurde eine multimode GRIN-Faser mit der numerische Apertur  $NA_{Wellenleiter} = 0.27$  verwendet.

### 4 Vergleich der Simulationen mit den Messergebnissen

In folgenden Diagrammen wurden die Simulationsergebnisse mit den experimentell gewonnenen Daten zusammen gestellt.

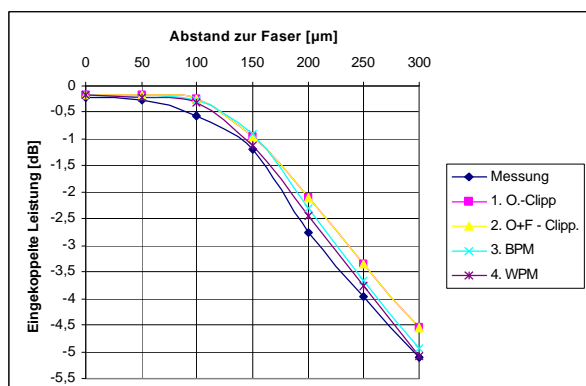


Abb. 2 Vergleich der Simulation mit den Messdaten für  $NA_{Quelle} = 0.14 < NA_{Wellenleiter} = 0.27$

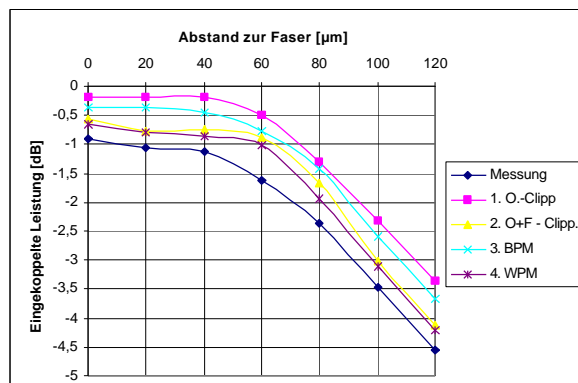


Abb. 3 Vergleich der Simulation mit den Messdaten für  $NA_{Quelle} = 0.25 \approx NA_{Wellenleiter} = 0.27$

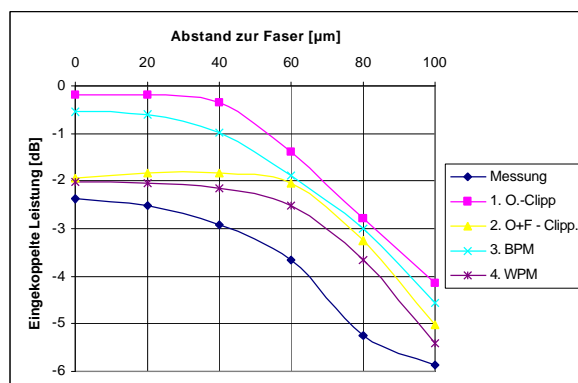


Abb. 4 Vergleich der Simulation mit den Messdaten für  $NA_{Quelle} = 0.4 > NA_{Wellenleiter} = 0.27$

### 5 Zusammenfassung

An Hand der durchgeführten Messungen und Simulationen wurde festgestellt, dass die Methode 2 (Clipping im Orts- und Frequenzraum) sowie die Methode 4 (WPM) die besten Übereinstimmungen mit den Messdaten liefern. Hier, vor Allem in Fall der hochgeöffneten Quelle, sind die Unterschiede zur paraxial basierten Methoden (1 und 3) sehr deutlich.

Einen anderen interessanten Aspekt stellt die Berücksichtigung des Rechenaufwands dar. Wegen der Komplexität der Berechnung bei der WPM ist diese am langsamsten. Clipping im Orts- und Frequenzraum ist um ein vielfaches schneller und liefert vergleichbare Ergebnisse. Damit kann diese Methode als sehr effizientes und schnelles Verfahren zur Bestimmung der Einkopplungseffizienz betrachtet werden.

### Literatur

- [1] M. D. Feit and J. A. , J. Fleck, "Light propagation in graded-index optical fibers (T)," Appl. Opt. 17, 3990- (1978)
- [2] K.-H. Brenner, W. Singer, „Light propagation through microlenses: a new simulation method“ in Appl. Opt- 32 (26): 4984-4988 (1993)