

Entwurf und Simulation eines optischen 3 dB-Richtkopplers für 1550 nm auf Glas mit CST Microwave Studio

Johannes Beyer, Jonas Gläsel, Philipp Wachholz
 Technische Universität Berlin, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
 Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, Einsteinufer 17, D-10587 Berlin, Germany

Zusammenfassung— In dieser Arbeit wird ein symmetrischer 3 dB-Richtkoppler für 1550 nm auf Glas mit dem CST MICROWAVE STUDIO entworfen und untersucht. Zur effizienten Ermittlung der Koppellänge wird zunächst ein Näherungsmodell auf Basis einer idealen Streifenleitung verwendet. Es kann gezeigt werden, dass die bei optischen Baugruppen sehr komplexe 3D-Simulation inzwischen auch auf gängigen PCs mit unter 10 GB RAM durchführbar, wenn auch sehr zeitaufwändig ist. [P. W.]

Index Terms— CST Microwave Studio, Numerische Simulation, Richtkoppler, Optische Kopplung

I. EINLEITUNG

Bis Ende 2017 wird der global auftretende IP-Datenverkehr in Rechenzentren auf 644 Exabyte pro Monat prognostiziert. Um aktuell und künftig notwendige Übertragungskapazitäten bereitzustellen, ist die Verwendung optischer Übertragungstechniken also unumgänglich [1].

Ein wichtiger Bestandteil optischer Übertragungssysteme sind u. A. optische Koppler, welche z. B. senderseitig die Überwachung des ausgesendeten optischen Signals ermöglichen, indem dieses durch Kopplung in einen zweiten Wellenleiter aufgeteilt wird.

In dieser Arbeit soll ein optischer 3 dB-Richtkoppler für 1550 nm dimensioniert und mit Hilfe der elektromagnetischen Feldsimulation in CST MICROWAVE STUDIO untersucht werden. Dazu werden in II. zunächst die theoretischen Grundlagen und Prinzipien dielektrischer Wellenleiter, Bends und optischer Koppler erläutert. Abschnitt III befasst sich anfänglich mit der Modellierung und Simulation der einzelnen Komponenten. Anschließend wird zur Auslegung der Koppellänge die Simulation mit Hilfe einer idealisierten Streifenleitung vorgestellt. Nachdem alle Parameter ermittelt sind, wird die volle 3D-Simulation des Kopplers vorgestellt. Eine abschließende Gegenüberstellung unterschiedlicher Simulations-Einstellungen wird ebenfalls gezeigt. [P. W.]

Johannes Beyer, Jonas Gläsel, Philipp Wachholz
 Technische Universität Berlin, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik,
 Einsteinufer 17, 10587 Berlin, Germany.

II. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

A. Dielektrische Wellenleiter

Zur Wellenführung kommen in der optischen Nachrichtentechnik dielektrische Wellenleiter zum Einsatz. Die Energieübertragung basiert hier auf dem physikalischen Prinzip der Totalreflexion. Diese tritt ein, wenn eine elektromagnetische Welle hinreichend flach auf ein Dielektrikum geringerer Permittivität trifft. Durch Verwendung vertikaler und lateraler Grenzflächen wird die Welle geführt. Ist der Kern, also das Dielektrikum höherer Permittivität, allseitig vom gleichen Material (Mantel/Substrat) umgeben, spricht man vom vergrabenen Streifenwellenleiter [2]. Das in das Substrat transmittierte Feld klingt exponentiell ab, es ist also evaneszent.

Im Streifenwellenleiter sind HE- und EH-Moden ausbreitungsfähig. Diese werden auch als TE- und TM-Polarisation bezeichnet. Die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden hängt von der Wellenlänge, den Brechungsindizes im Kern und Substrat, sowie von seinen geom. Abmessungen ab. Zur Auslegung werden normierte Phasen- und Frequenzparameter verwendet. Abb. 1 zeigt das entsprechende Dispersionsdiagramm der HE-Moden. Der Wellenleiter ist für $V < 3.9$ einmodig [2]. [P. W.]

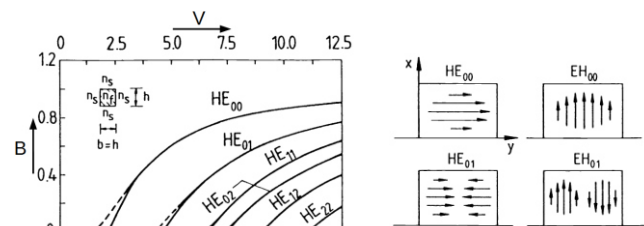


Abbildung 1. Dispersionsdiagramm der HE-Moden (Quasi-TE) für quadratische vergrabene Wellenleiter (links), Feldbilder von Moden niedriger Ordnung (rechts) [2].

B. Gekrümmte Wellenleiter – Bends

Ein wichtiger Bestandteil optischer Koppler ist die Zuführung der separaten dielektrischen Wellenleiter hin zur Koppelstrecke. Es handelt sich dabei um gekrümmte dielektrische Wellenleiter, wobei sich die Stärke der

Krümmung je nach Stärke der Führung V auf Störungen wie Abstrahlung, Streuung und Reflexionen, sowie Moden- und Polarisations-Modenkonzersion auswirkt [3, 4].

Umgesetzt werden solche Zuführungen als sog. S-Bends. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um zwei aufeinanderfolgende Kreisabschnitte. Es finden auch häufig Varianten Anwendung, bei denen der S-Bend einen Sinus- oder Kosinus-Verlauf beschreibt. Durch die kontinuierliche Krümmungs-Änderung können Störungen so i. A. minimiert werden [4].

Eine der gängigsten Varianten zur theoretischen Beschreibung von Bends ist die Methode der konformen Abbildung. Der Wellenleiter wird dabei als gerade, jedoch mit einem inhomogenen Verlauf der Permittivität betrachtet. Siehe hierzu auch [3, 4]. [J. B.]

C. Optische Richtkoppler

Der hier betrachtete optische Richtkoppler ist ein passives Viertor, bestehend aus zwei benachbarten vergrabenen dielektrischen Single-Mode Streifenwellenleitern. In einen Wellenleiter wird Energie eingespeist, welche aufgrund des evaneszenten Feldes in den benachbarten Wellenleiter übergekoppelt wird. Die Kopplung findet über einer kontinuierlichen Koppelstrecke L statt und ist periodisch.

In Abb. 2 ist links der Aufbau sowie die gewählte Portbelegung des hier beschriebenen Richtkopplers dargestellt. Tor 1 wird im Folgenden als Eingang gewählt. Es ist zu erkennen, dass der Durchgangspfad zwischen den Toren 1 und 3 und der Koppelpfad zwischen den Toren 1 und 4 verläuft. Das Tor 2 ist im Idealfall komplett von Tor 1 isoliert. Durch den S-Parameter S_{31} kann somit direkt auf die Durchgangsdämpfung und mit S_{41} auf die Koppeldämpfung geschlossen werden.

Um eine gewünschte Durchgangs- und Koppeldämpfung zu erreichen, können bei der Dimensionierung unterschiedliche Verhältnisse gewählt werden. Die wichtigsten Freiheitsgrade sind der Abstand s zwischen den Wellenleitern die Länge L des geraden Koppelabschnitts und die Stärke der Führung V im Wellenleiter, die die Stärke des evaneszenten Feldes bestimmt. In Abb. 2 rechts ist der Querschnitt eines Kopplers sowie die Verteilung des elektrischen Feldes dargestellt.

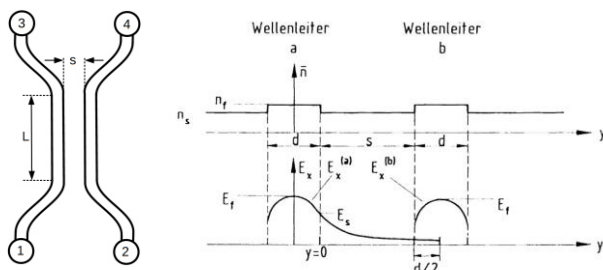


Abbildung 2. Richtkoppler mit gekrümmten Zuleitungen, Koppellänge L und Koppelabstand s (links), Querschnitt Richtkoppler, E-Feld [2] (rechts).

Die mathematische Beschreibung des Richtkopplers erfolgt anhand der Theorie gekoppelter Moden. Hierbei werden in

Lehrbüchern üblicherweise nur gerade Koppelabschnitte betrachtet, wodurch die Kopplung infolge der Bend-Abschnitte vernachlässigt wird [2, 5].

Die Beschreibung des Kopplers inklusive der Zuführungen ist analytisch, wenn überhaupt, nur sehr schwer zu realisieren. [J. G.]

III. MODELLIERUNG UND SIMULATION

Betrachtet wird eine Bandbreite von 1500 ... 1600 nm. Sofern nichts anderes angegeben ist, werden alle Simulationen mit dem Zeitbereichs-Löser bei einer Genauigkeit von -30 dB durchgeführt. Die Option *Inhomogeneous Port Accuracy Enhancement* (IPAE) wird aktiviert, um die Genauigkeit über die gesamte Bandbreite zu gewährleisten. Für das Rechengitter sind min. 10 Zellen/Wellenlänge vorgegeben. Der Koppler wird lediglich hinsichtlich der TE-Polarisation betrachtet, was die Einführung einer horizontalen Symmetrie-Ebene ermöglicht (PMCxy). Als Randbedingungen werden stets PMC für z min/max (vertikal) und PEC für x min/max (lateral) verwendet. Die Ausbreitungsrichtung ist y . [J. B.]

A. Streifenwellenleiter

Der vergrabene Streifenwellenleiter stellt die Grundlage des optischen Kopplers dar. Der Querschnitt des Wellenleiters wurde quadratisch gewählt, was eine effizientere Kopplung im Vergleich zu gängigeren Varianten mit z. B. der doppelten Kernbreite ermöglicht. Es wird ein Substrat mit der Brechzahl $n = 1.505$ verwendet. Die Brechzahldifferenz zwischen Kern und Substrat beträgt 4.75 %. Die Auslegung der Dimensionen wurde für einen Frequenzparameter $V = 3.6$ anhand von [2] durchgeführt.

In Abb. 3 sind links die resultierenden Wellenleiterdimensionen im Querschnitt dargestellt. Mittig zu sehen ist die E-Feld-Intensitätsverteilung, anhand derer der Abstand zum Rand als ausreichend groß angenommen werden kann, sodass keine Einflüsse durch die Randbedingungen auftreten sollten. Rechts zu sehen sind die beiden Polarisierungen der Grundmode (TE und TM). Moden höherer Ordnung wurden nicht gefunden. [P. W.]

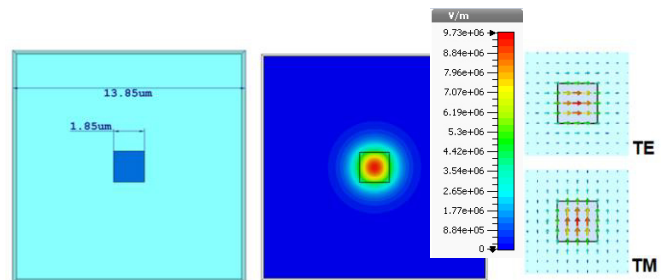


Abbildung 3. Wellenleiter-Querschnitt Abmessungen (links), Intensität (mitte) und ausbreitungsfähige Moden (rechts).

B. S-Bends

Da im Bend Polarisations-Modenkonzersion auftreten kann und die Zulässigkeit der Symmetrie-Ebene sichergestellt werden muss, werden hier TE- und TM-Polarisation (ohne

Symmetrie) betrachtet. Der S-Bend wird aus zwei aufeinanderfolgenden Kreisabschnitten modelliert. Um einen geeigneten Krümmungsradius zu ermitteln, wird bei fester Länge eine Simulation mit Sweep über einen Bereich von $R = 1000 \dots 70 \mu\text{m}$ durchgeführt. Abb. 4 zeigt den simulierten S-Bend.

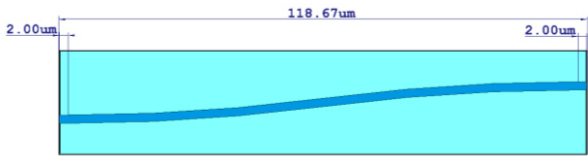


Abbildung 4. S-Bend Draufsicht mit Anfangs-Dimensionen.

Anschließend wird jeweils die Einfügedämpfung S_{21} (TE) für $\lambda = 1550 \text{ nm}$ in Abhängigkeit der Krümmung R^{-1} betrachtet. Wie in Abb. 5 links zu sehen ist, zeigt die Dämpfung einen exponentiellen Verlauf und steigt ab einer Krümmung von $R^{-1} = 0.005 / \mu\text{m}$ stark an.

Die max. Eingangsreflexionen S_{11} (TE) bewegen sich im Bereich $-41 \dots -30 \text{ dB}$ (Abb. 5 rechts).

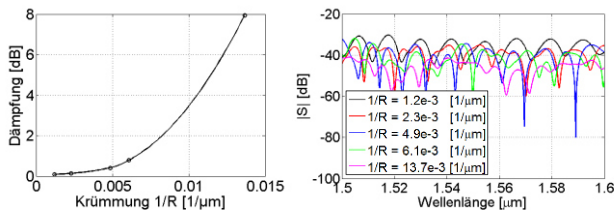


Abbildung 5. Krümmungsverluste (TE) im einzelnen S-Bend in Abhängigkeit der Krümmung $1/R$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (links) Eingangsreflexionen S_{11} (TE) im einzelnen S-Bend (rechts).

Über die S-Parameter wird auch die Polarisations-Modenkonversion ausgewertet. In Abb. 6 sind links $S_{21} \text{ TE} \rightarrow \text{TM}$ und rechts $S_{21} \text{ TM} \rightarrow \text{TE}$ aufgetragen. Diese zeigen die Stärke der TM-Mode am Ausgang, wenn am Eingang TE angeregt wurde und umgekehrt. Wie zu sehen ist, zeigen sich hier für alle Krümmungen niedrige Werte $< -128 \text{ dB}$.

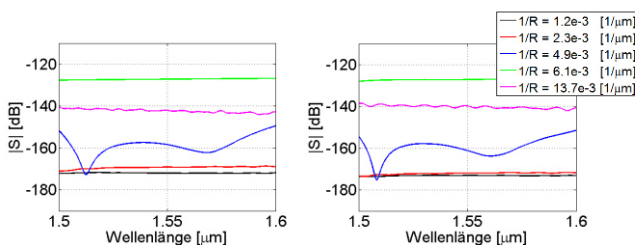


Abbildung 6. Polarisations-Modenkonversion $S_{21} \text{ TE} \rightarrow \text{TM}$ (links) und $S_{21} \text{ TM} \rightarrow \text{TE}$ (rechts).

Bei einer gewählten Krümmung von $R^{-1} = 0.0023 / \mu\text{m}$ zeigt sich eine noch sehr kleine Einfügedämpfung von $0,13 \text{ dB}$ und Eingangsreflexionen von max. -35 dB . Die Polarisations-Modenkonversion ist mit Werten um -170 dB vernachlässigbar klein. Damit ist auch die Verwendung der TM unterdrückenden Symmetrie-Ebene (PMCx_y) gerechtfertigt. [J. B.]

C. Optischer Richtkoppler – Schaltbild-Simulation

Zunächst werden die Dimensionen der geraden/gekrümmten Wellenleiter aus den vorherigen Kapiteln übernommen. Als Abstand s zwischen den geraden Wellenleitern wird $s = 1.2 \mu\text{m}$ gewählt. Um die Auslegung des Kopplers abzuschließen ist eine genaue Betrachtung der Koppellänge L notwendig. Dies gelingt über die Periodizität der Kopplung. Die Periodizität kann durch einen Sweep über die Koppellänge L grafisch dargestellt werden. Da ein solcher Längensweep in einer vollen 3D-Feldsimulation sehr zeitaufwendig ist, wird im Folgenden die genauere Betrachtung mit Hilfe einer Schaltbild-Simulation vorgestellt.

Hierzu wird zunächst eine 3D-Feldsimulation eines einzelnen Bend-Abschnitts durchgeführt. Auf der Seite der eng zusammenliegenden Wellenleiter ist die Beschreibung des Feldes, aufgrund der Kopplung zwischen den Wellenleitern physikalisch durch die Gleich- und Gegentaktmode gegeben. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Schaltbild-Simulation. Die Verbindung zwischen den Bend-Abschnitten wird für jede Mode durch jeweils eine ideale Übertragungsleitung realisiert. Diese entspricht dabei einer Phasenverschiebung von $e^{j\omega L}$. Die Länge L der idealen Leitung entspricht der Koppellänge. In Abb. 7 ist der Aufbau der Schaltbild-Simulation dargestellt.

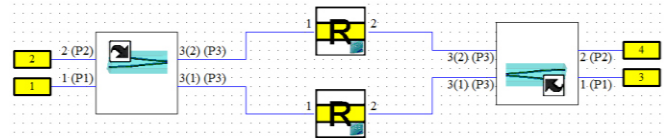


Abbildung 7. Aufbau der Schaltbild-Simulation.

Anschließend wird ein Sweep über die Koppellänge L ($0 \dots 500 \mu\text{m}$) durchgeführt. Die gesamte Simulationsdauer für diesen Sweep über 501 Punkte beträgt dabei ca. 5 Minuten. Als Ergebnis der Simulation sind in Abb. 8 die S-Parameter S_{31} und S_{41} in Abhängigkeit der Koppellänge dargestellt.

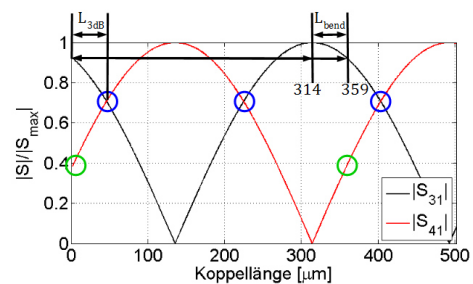


Abbildung 8. Periodizität der Kopplung.

Die grün markierten Punkte zeigen anhand des S-Parameters S_{41} die Kopplung infolge der Bend-Abschnitte, welche -8.68 dB beträgt. Aufgrund der signifikanten Kopplung infolge der Bends muss diese auf jeden Fall beachtet werden um ein bestimmtes vorgegebenes Koppelverhalten zu erreichen.

Die betrachtete Kopplung infolge des Bends kann ebenfalls in eine äquivalente gerade Koppelstrecke der Länge L_{bend} umgerechnet werden. Diese kann beispielsweise bei einer analytischen Betrachtung des Kopplers als Korrekturfaktor

eingesetzt werden. Die Wegdifferenz zwischen dem Punkt, an dem keine Kopplung stattfindet ($L = 314 \mu\text{m}$) zu dem Punkt, an dem die Kopplung aufgrund der Bends erreicht wird ($L = 359 \mu\text{m}$), entspricht der effektiven Koppellänge L_{bend} und beträgt $45 \mu\text{m}$.

Zuletzt sind in blauer Farbe jene Punkte markiert, an denen Leistungsteilung stattfindet. Diese tritt jeweils an den Schnittpunkten der Kurven auf. Für den in dieser Arbeit zu entwerfenden Koppler ist nur der erste Schnittpunkt von Bedeutung, welcher sich bei $L = 46.33 \mu\text{m}$ befindet. [J. G.]

D. Optischer Richtkoppler – 3D-Feldsimulation

Nachdem die Koppellänge für 3 dB-Leistungsteilung näherungsweise ermittelt wurde, wird nun ein Sweep über einen kleinen Bereich um diese Länge herum mit dem kompletten 3D-Modell durchgeführt. Hier ergibt sich ein $L_{3dB} = 45.95 \mu\text{m}$. Beide Simulationen stimmen mit $\Delta L_{3dB} = 0.38 \mu\text{m}$ also gut miteinander überein.

Damit ist die Dimensionierung für den 3 dB-Leistungsteiler gefunden. Das abschließende Koppler-Layout ist in Abb. 9 zu sehen.

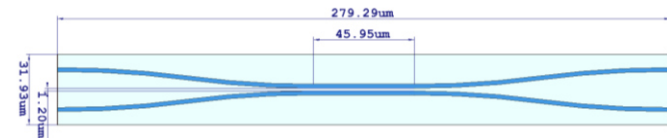


Abbildung 9. Draufsicht auf Koppler mit Dimensionen für 3dB-Leistungsteilung.

In Abb. 10 ist der Verlauf der S-Parameter in Abhängigkeit der Wellenlänge zu sehen. Die Abweichung $S_{41} \leftrightarrow S_{31}$ beträgt bei $\lambda = 1550 \text{ nm}$ nur 0.001 dB . Allerdings liegen die Eingangsreflexionen S_{11} mit max. -33 dB und mehr noch die Rückwärtskopplung S_{21} mit -37 dB höher als erwartet. Möglicherweise lassen sich durch eine Erhöhung der Gitterzellen/Wellenlänge bessere Ergebnisse erzielen. Auch ein geringer Einfluss durch die Randbedingungen ist denkbar. Dieser könnte durch einen noch größeren Abstand oder den Wechsel zu offenen Randbedingungen minimiert werden. Diese Maßnahmen gehen allerdings auch wieder mit einem größeren Rechenaufwand einher.

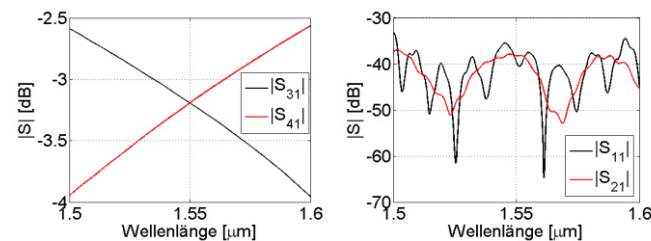


Abbildung 10. Transmission S_{31} , Vorwärtskopplung S_{41} (links); Eingangsreflexionen S_{11} und Rückwärtskopplung S_{21} (rechts) in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Eine Gegenüberstellung einiger Simulations-Einstellungen ist in Tabelle 1 zu finden. Deutlich erkennbar ist der nichtlineare Zusammenhang zwischen Anzahl an Gitter-Zellen und Rechenaufwand. Die doppelte Anzahl an Zellen

vervierfacht die Simulations-Dauer. Außerdem wird der dreifache RAM benötigt. Durch die erhöhte Breitband-Genauigkeit IPAE ist bei einer Simulation mit 4 Ports auch etwa die vierfache Simulations-Dauer zu beobachten.

Die Erhöhung der Löser-Genauigkeit von -30 auf -40 dB geht in etwa mit der dreifachen Simulations-Dauer einher. Ein derart starker Unterschied wäre hier nicht zu erwarten gewesen und ist auf einen ab -28 dB nur noch sehr flachen Abfall der Feld-Energie im Rechengebiet zurückzuführen. Vermutlich liegt hier die gleiche Ursache zugrunde, die auch für die hohen Werte von S_{11} und S_{21} sorgt. [J. B.]

Genauigk.	IPAE**	Moden	Zellen	RAM	Dauer
-30 dB	nein	TE*	71 mio	8.7	1h 35m
-30 dB	nein	TE+TM	142 mio	28.7	5h 21m
-30 dB	ja	TE*	71 mio	16.4	6h 09m
-40 dB	nein	TE*	71 mio	16.2	4h 48m
-40 dB	ja	TE*	71 mio	16.4	18h 38m

Tabelle 1 Abhängigkeiten mit unterschiedlichen Löser-Einstellungen.

* TE mit Symmetrie PMC(XY)

** IPAE – Inhomogenous Port Accuracy Enhancement

IV. FAZIT & AUSBLICK

In dieser Arbeit wird das Vorgehen beim Entwurf und der Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines optischen 3 dB-Richtkopplers gezeigt. Ausgehend von den Simulationsergebnissen ist festzuhalten, dass bei dem Entwurf unbedingt die Kopplung in den Bend-Abschnitten berücksichtigt werden muss, was eine analytische Dimensionierung sehr schwer macht. Der Entwurf mittels elektromagnetischer Feldsimulation gibt Aufschluss über die benötigten Parameter des Kopplers, um die gewünschte Leistungsteilung zu erreichen. Weiterhin ist zu beobachten, dass bei einer Erhöhung der Genauigkeit der Simulation von -30 auf -40 dB keine großen Unterschiede bei S-Parametern festzustellen sind.

Weiterführende Simulationen, aufbauend auf diesem Modell, können beispielsweise dispersive Materialien enthalten. Außerdem können durch Erweiterungen weitere Bauelemente wie Polarisations- oder Wellenlängenfilter simuliert werden. Anhand der durchgeführten Betrachtung der Kopplung infolge der Bend-Abschnitte ist es ebenfalls möglich, analytische Formeln, beispielsweise durch einen Korrekturfaktor zu verbessern. [J. G., P. W.]

LITERATUR

- [1] Cisco, „Cisco Global Cloud Index: Prognose und Methodik, 2012-2017,“ 2017.
- [2] K. J. Ebeling, Integrierte Optoelektronik, Ulm: Springer, 1992.
- [3] M. Heiblum und J. Harris, „Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation,“ in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 75-83, 1975.
- [4] S. Fischbach, „Theoretical and Experimental Analysis of Spatial and Polarization Modes in Bent Waveguides,“ TU Berlin, 2015.
- [5] C. R. Pollock und M. Lipson, Integrated Photonics, Cornell: Springer, 2003.