Wave-Matching-Simulationen integriert optischer Kopplerstrukturen

M. Lohmeyer[*], *N. Bahlmann, P. Hertel*

Fachbereich Physik, Universität Osnabrück

---

1. Motivation

2. Wave-Matching Methode

- **a.** Ansatz
- **b.** Stetigkeitsbedingungen
- **c.** Numerische Lösung

3. Ergebnisse

- **a.** Zwei-Wellenleiter-Koppler
- **b.** ARROW-Wellenleiter
- **c.** Dreidimensionaler Koppler
- **d.** Strahlungsgekoppelte Wellenleiter

4. Zusammenfassung

„Modellierung und Simulation integriert-optischer Schaltungen und mikrooptischer Systeme“

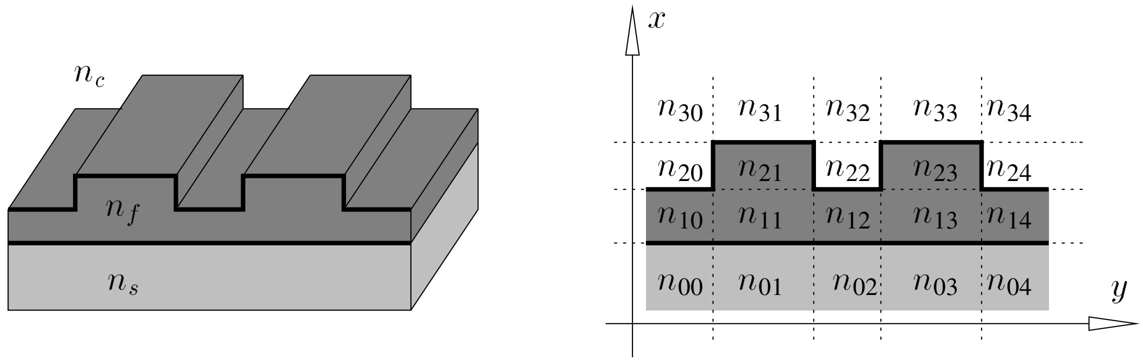
15 & 16 Januar 1998 *Heinrich-Hertz-Institut Berlin*

---

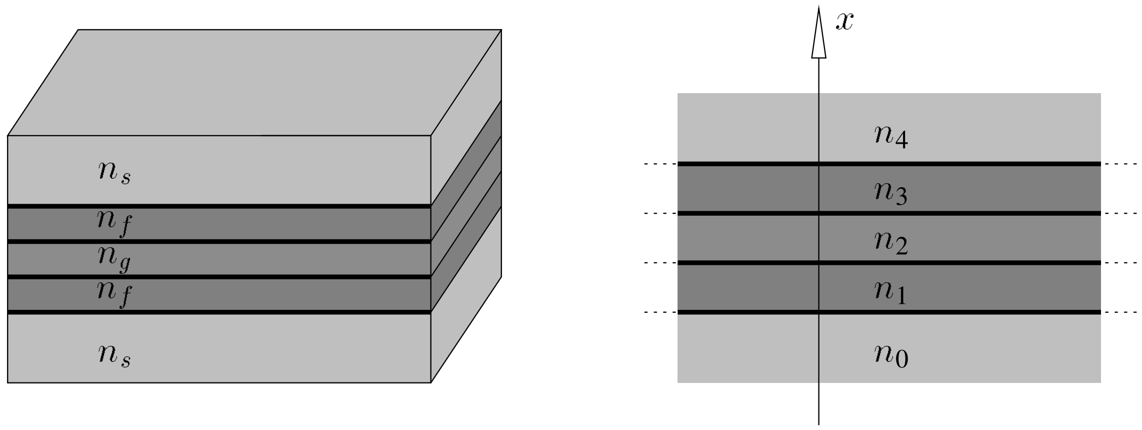
[*] *Fachbereich Physik, Universität Osnabrück* *Barbarastraße 7, D 49069 Osnabrück*

Tel.: 0541/969-2641 *Fax: 0541/969-2670* *e-mail: manfred.lohmeyer@physik.uni-osnabrueck.de*

Interferenz der geführten Moden eines zentralen, längshomogenen Kopplersegmentes; ein typischer Querschnitt:

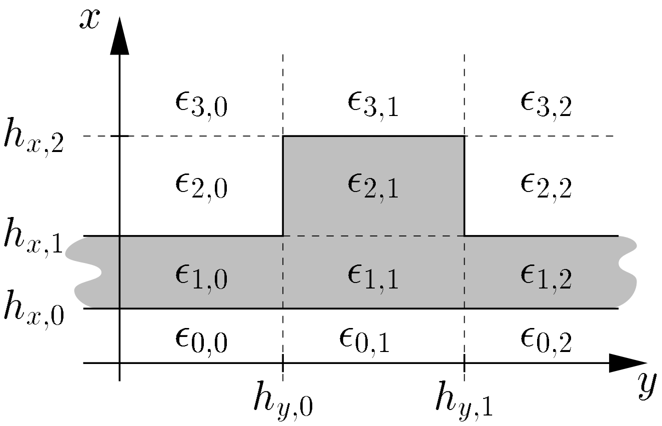


Modenberechnung im planaren Fall:



- Separater Ansatz auf jeder Schicht: Summe über physikalisch relevante Lösungen der Wellengleichung.
- Stetigkeitsbedingungen an den Schichtgrenzen führen auf ein Gleichungssystem in den unbekannten Koeffizienten.
- Für gültige Ausbreitungskonstanten ergeben sich daraus die gesuchten Modenfelder.

WMM: eine analoge Prozedur für zwei transversale Dimensionen . . .



- Geführte Moden: Felder der Form

$$F(x,y,z,t) = \Phi(x,y)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t - \beta z)}, \quad \omega = kc = 2\pi c/\lambda\,.$$

  mit

$$\int |\Phi(x,y)|^2 \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y < \infty.$$

- Innerhalb homogener Rechtecke gültige Wellengleichung:

$$\partial_x^2\Phi + \partial_y^2\Phi = (\beta^2 - k^2\epsilon)\Phi.$$

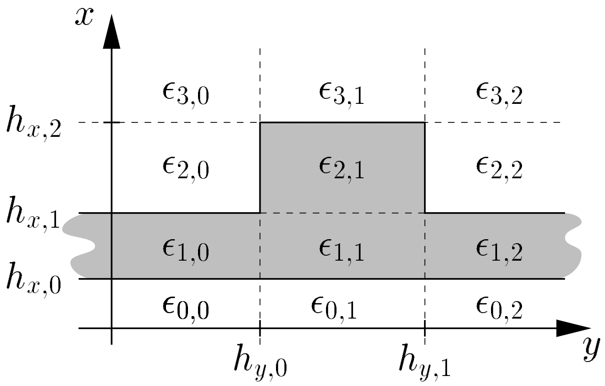
- Ansatz für die Komponenten Φ des Modenfeldes:

$$\Phi(x,y) = \sum_j a_j\, F_j(p_j x)\, G_j(q_j y).$$

  F, G $\in \{\sin, \cos, \exp\}$,
  p, q: transversale Wellenvektor-Komponenten mit
  $\pm p^2 \pm q^2 = \beta^2 - k^2\epsilon\,.$

- Spektrale Diskretisierung:
  Für jede Kombination von F, G, separat auf jedem Rechteck: Wähle eine Anzahl von Parametern p, q, sodaß die zugehörigen Grundfunktionen $F(px)\,G(qy)$
  - den gesamten zulässigen Bereich für p und q erfassen,
  - hinreichend verschieden sind.

- Auf den äußeren, unbeschränkten Rechtecken: Betrachte nur nach außen hin exponentiell abfallende Grundfunktionen.



	Stetige Größen auf	
	horizontalen	vertikalen
	Grenzen	
TE	E_y, $\partial_x E_y$	ϵE_y, $\partial_y E_y$
TM	H_y, $\epsilon^{-1}\partial_x H_y$	H_y, $\partial_y H_y$
VEC	ϵE_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z	E_x, ϵE_y, E_z, H_x, H_y, H_z

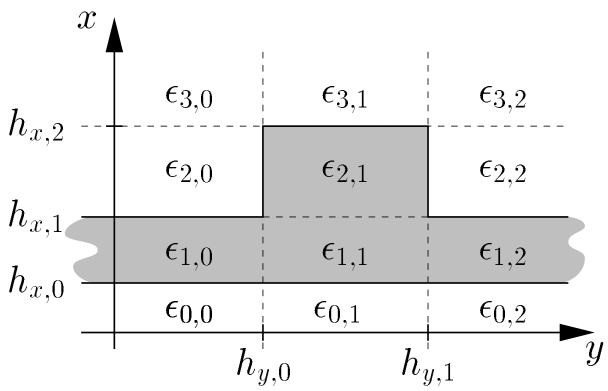
Quadratischer Fehler des Feldes auf den Rechteckgrenzen:

$$D_\beta(\vec{a}) = \sum_{\substack{\text{stetige}\\ \text{Größen}}} \; \sum_{\substack{\text{horizontale /}\\ \text{vertikale}\\ \text{Grenzen}}} \; \int_{\substack{\text{Grenz-}\\ \text{linie}}} \left(\begin{array}{c}\text{geeignete}\\ \text{Gewichte}\end{array}\right) \cdot \left| \begin{array}{c}\text{Differenz}\\ \text{in Feldern /}\\ \text{Ableitungen}\end{array} \right|^2 \mathrm{d}s$$

Nebenbedingung: Normierte Felder

$$N_\beta(\vec{a}) = \sum_{\text{Rechtecke}} \; \iint_{\substack{\text{Rechtecks-}\\ \text{bereich}}} \left(\begin{array}{c}\text{geeignete}\\ \text{Gewichte}\end{array}\right) \cdot \left| \;\; \text{Feld} \;\; \right|^2 \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$$

$$\boxed{\text{Geführte Moden: Gegeben durch } (\beta, \vec{a}) \text{ mit } D_\beta(\vec{a}) = 0 \text{ und } N_\beta(\vec{a}) = 1.}$$



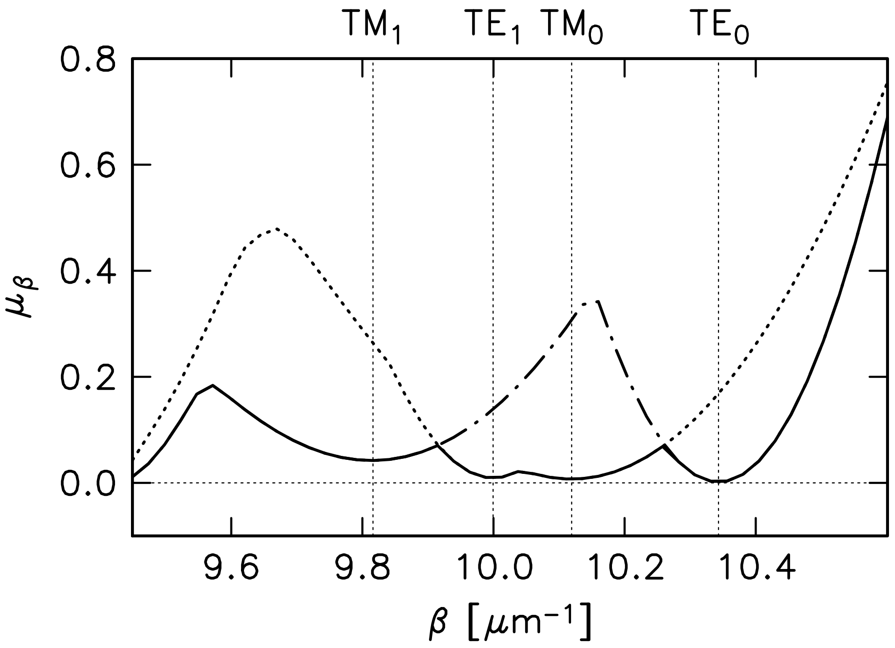
D_β und N_β sind quadratische Formen:

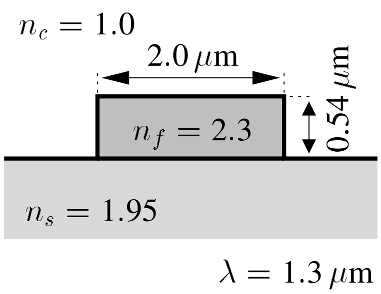
$$D_\beta(\vec{a}) = \vec{a}^{\mathsf{T}}\, \mathsf{D}_\beta\, \vec{a}, \qquad N_\beta(\vec{a}) = \vec{a}^{\mathsf{T}}\, \mathsf{N}_\beta\, \vec{a}.$$

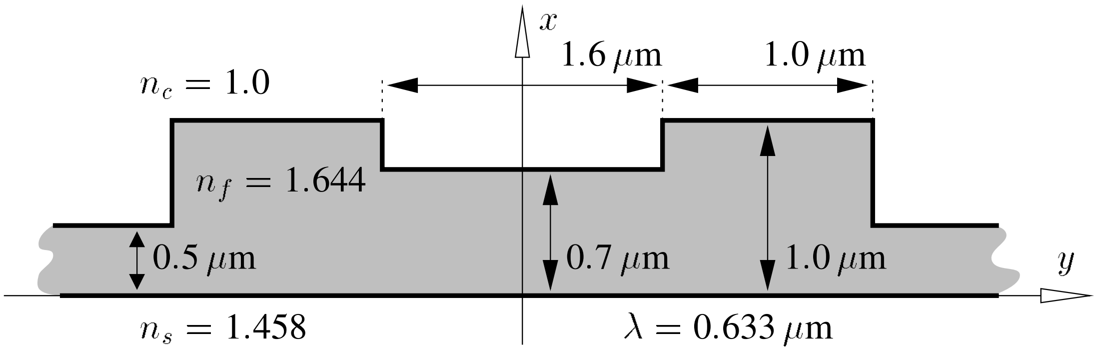
- Für festes β ist der Koeffizientensatz $\vec{a}$ mit dem kleinsten Fehler μ_β Lösung des Eigenwertproblems

$$\mathsf{D}_\beta\, \vec{a} = \mu_\beta\, \mathsf{N}_\beta \vec{a}\,.$$

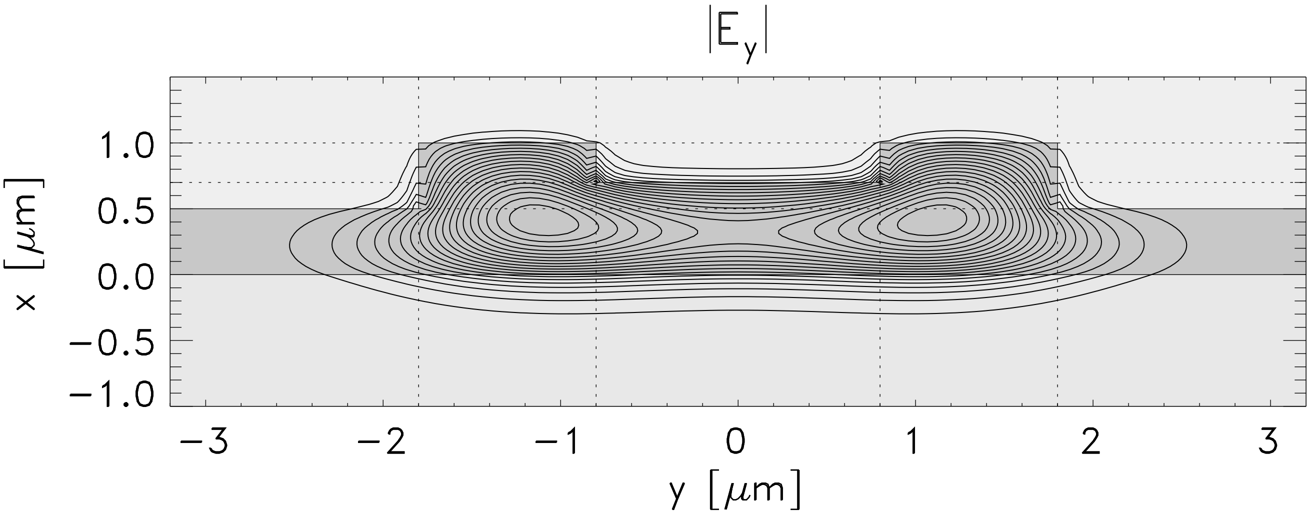
- Minima in μ_β bzgl. β ergeben Näherungen für gültige Ausbreitungskonstanten.

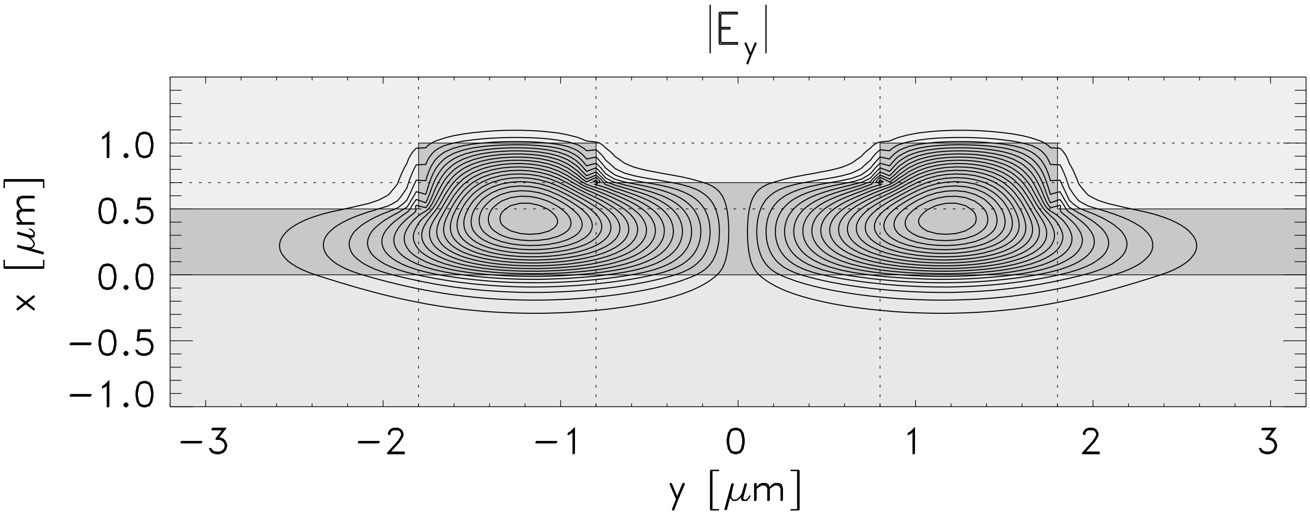






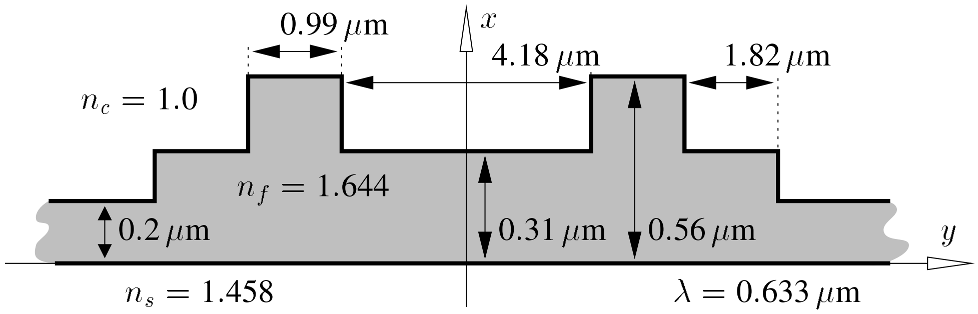
TE - Grundmoden:

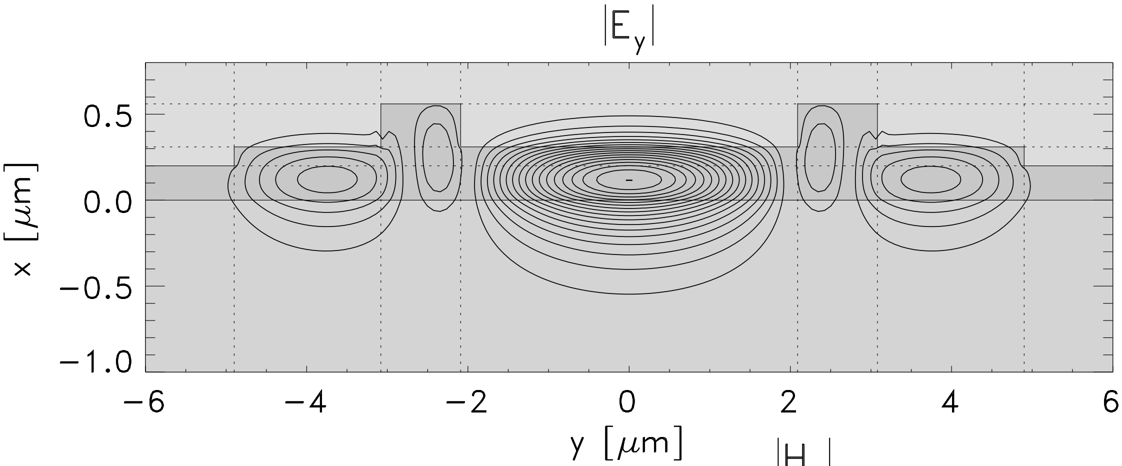


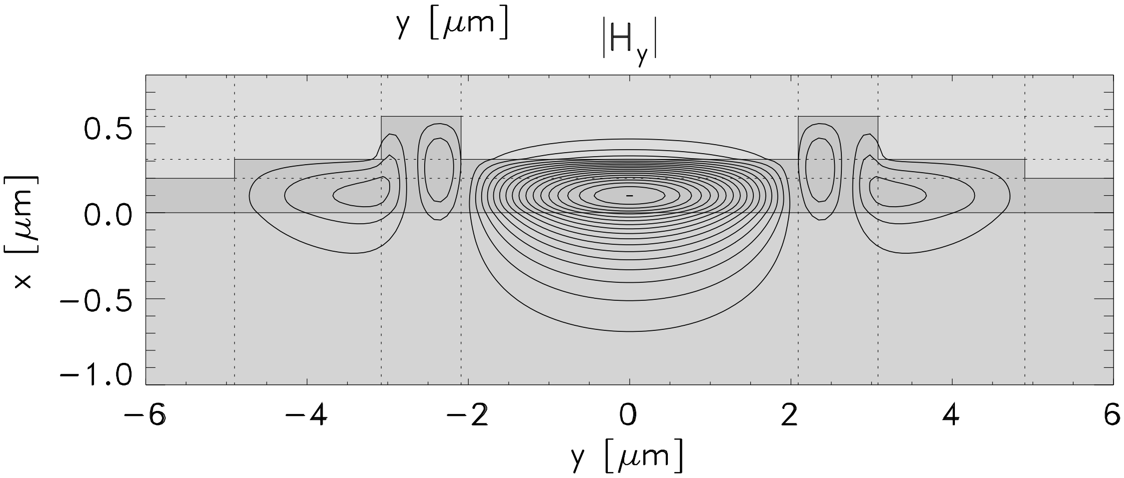


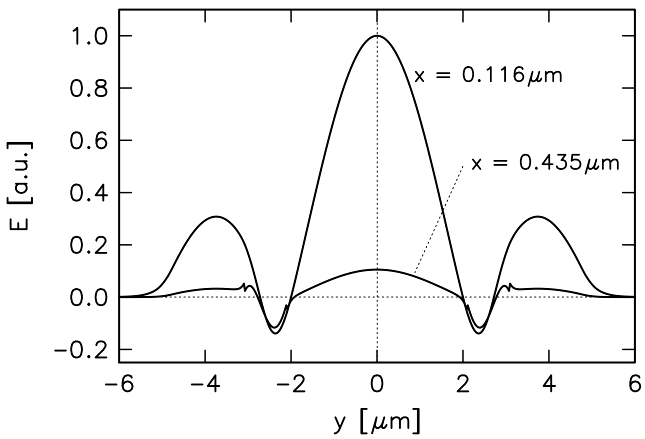
		EIM*	SIM*	FEM*	WMM
β/k	(s)	1.614021	1.611995	1.611412	1.610794
	(a)	1.612877	1.610369	1.609546	1.609100
$L_c = \pi/(\beta_s - \beta_a)$		276	194	170	187

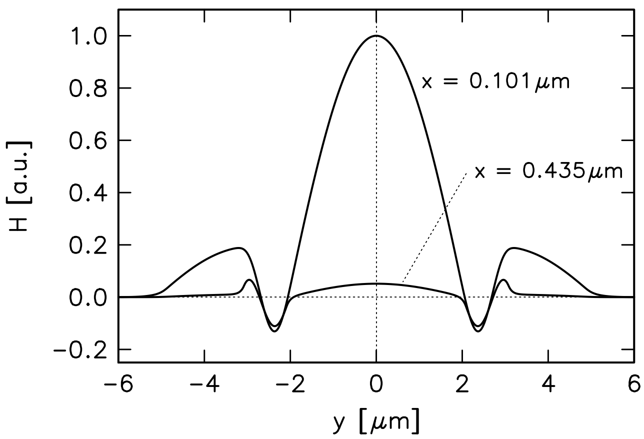
$*$: P. Pola, W. Biehlig, F. Lederer, *JLT* **14**, 1996





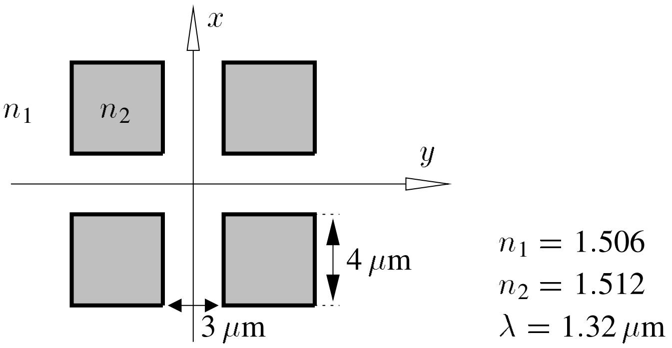


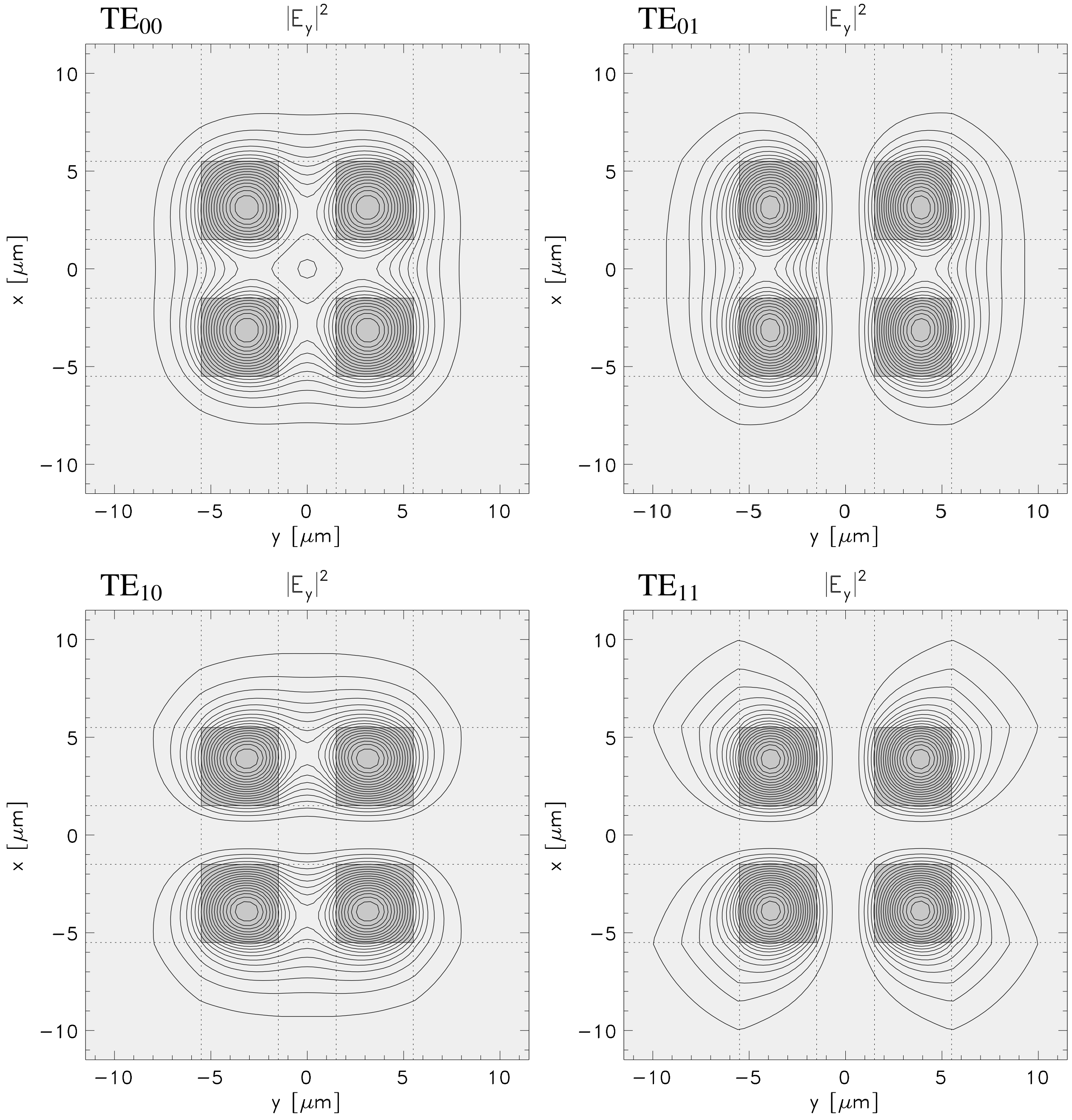




		EIM*	SIM*	FEM*	WMM
β/k	TE	1.534432	1.534115	1.533470	1.534142
	TM	1.507001	1.506904	1.506720	1.506945

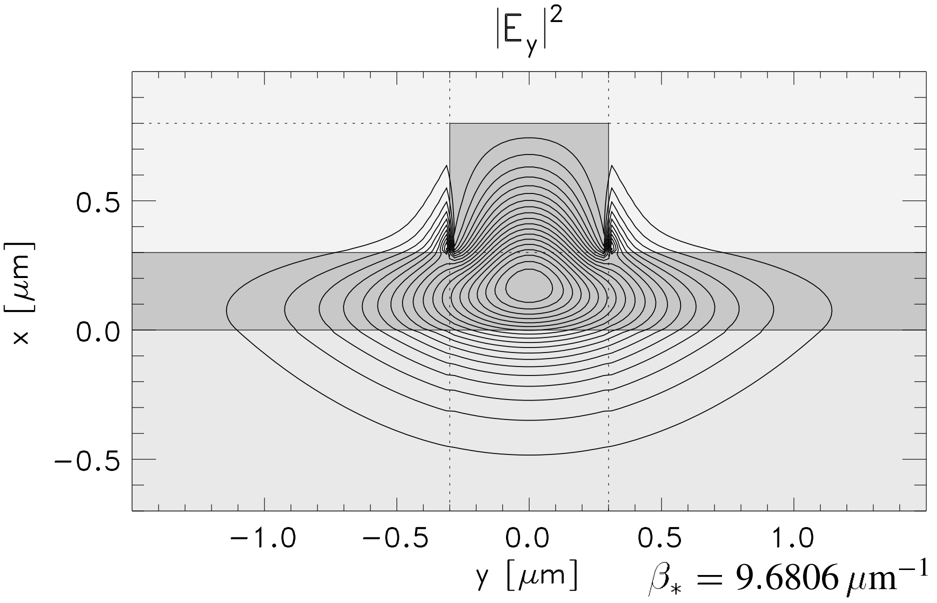
∗: P. Pola, W. Biehlig, F. Lederer, *JLT* **14**, 1996

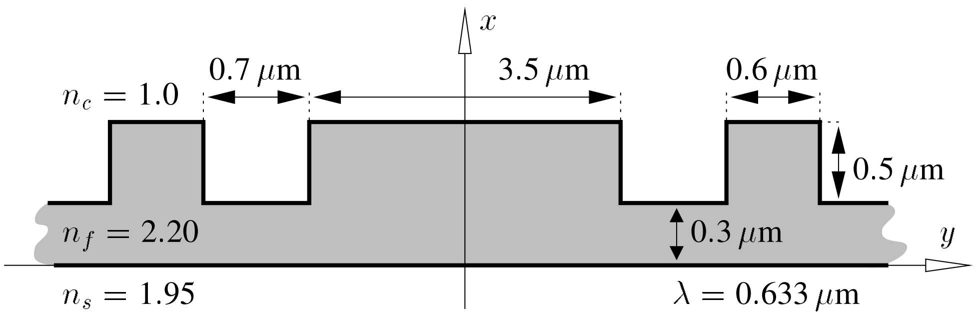




	β_{00}/k	β_{01}/k	β_{10}/k	β_{11}/k	L_c
VFEM*	1.5075807	1.5067966	1.5067966	1.5060266	850 μm
WMM	1.5078966	1.5071085	1.5071092	1.5064697	925 μm

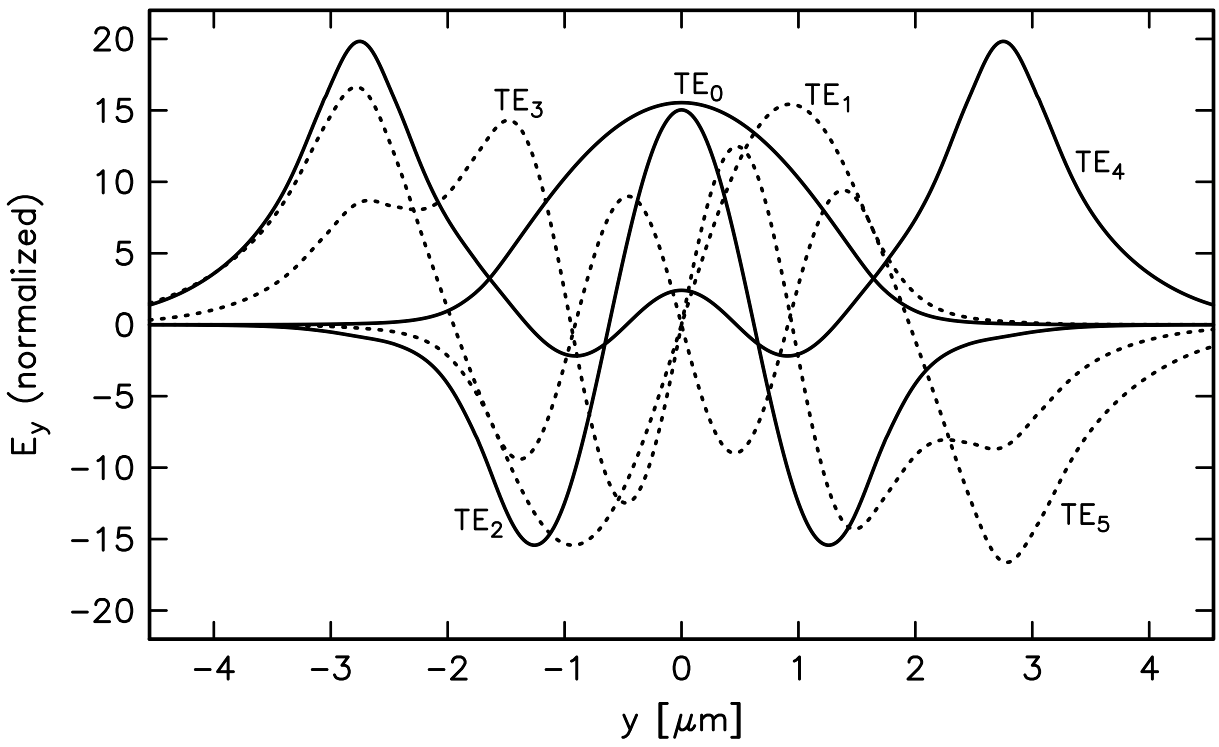
$*$: L. Friedrich, P. Dannberg, C. Wächter, Th. Hennig, A. Bräuer, W. Karthe, *Optics Communications* **137**, 1997

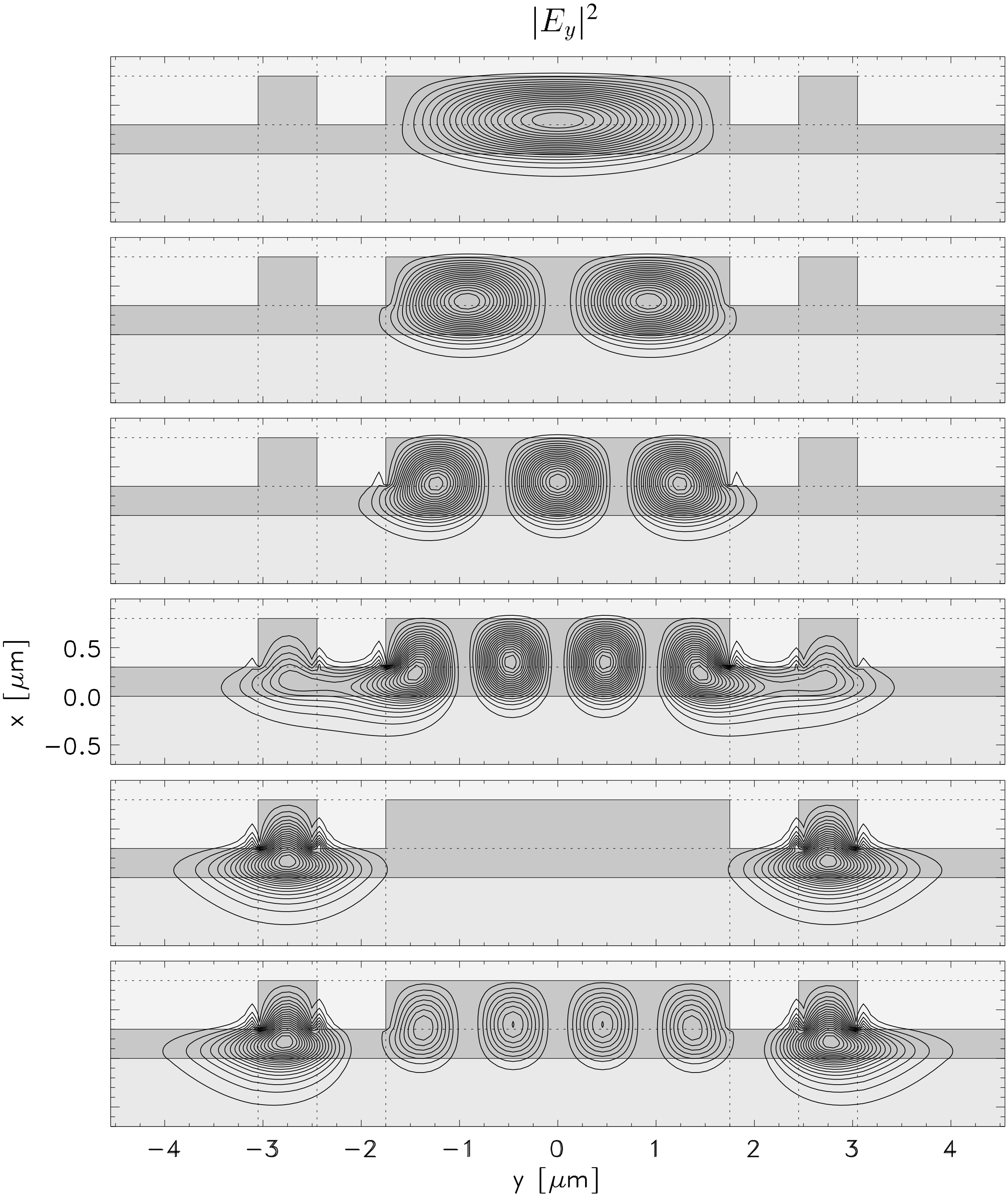


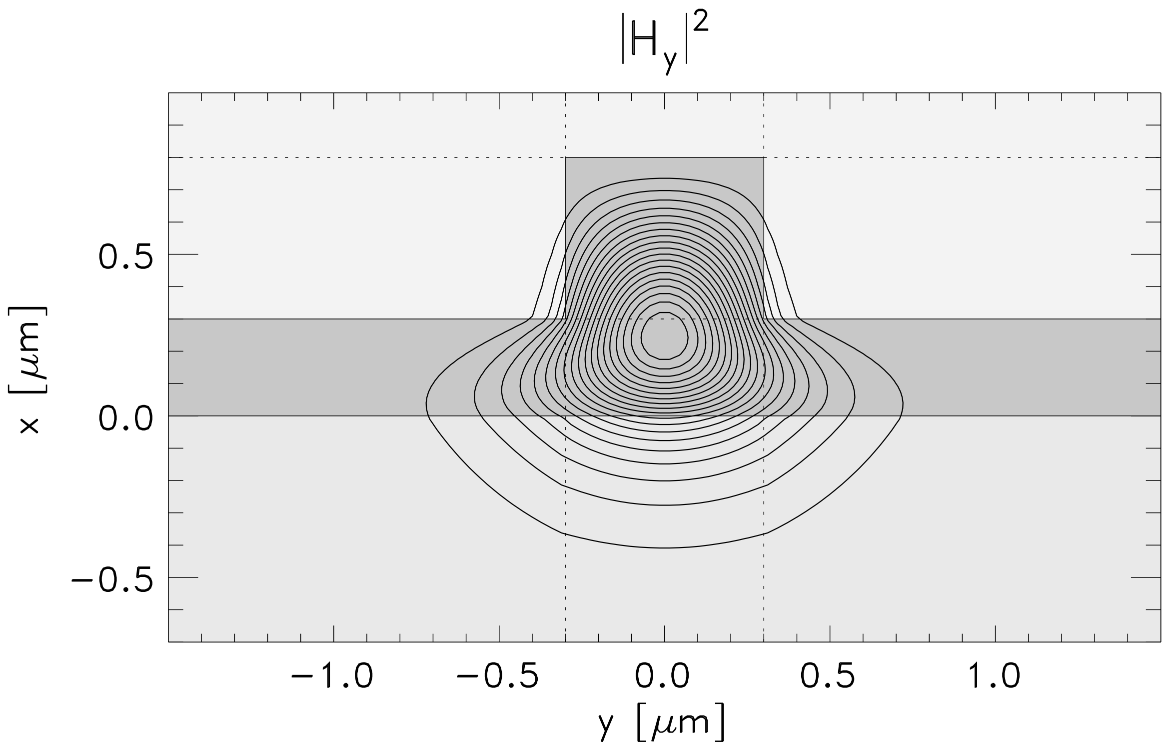


	TE_0	TE_1	TE_2	TE_3	TE_4	TE_5
$\beta/\mu\mathrm{m}^{-1}$	10.2232	10.1171	9.9417	9.7175	9.6785	9.6602

$\beta_* = 9.6806\,\mu\mathrm{m}^{-1}$




$|E_y|^2$
x [μm]
0.5
0.0
−0.5
−4
−3
−2
−1
0
1
2
3
4
y [μm]



Wave-Matching-Method:

- zur Berechnung der geführten Moden von Wellenleitern mit stückweise konstanten, rechteckigen Brechzahlprofilen,
- der einfache Ansatz faktorisierender Lösungen der Wellengleichung erlaubt gute Näherungen der Modenfelder,
- Ausbreitungskonstanten werden so bestimmt, daß der Fehler in den Stetigkeitsbedingungen auf den Rechteckgrenzen möglichst klein wird,
- zeigt gute Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Methoden, auch für komplexere Wellenleiterstrukturen.
- ist genügsam im Speicherplatzbedarf, auch voll-vektorielle Rechnungen sind noch mit vertretbarem Aufwand möglich,
- liefert quasianalytische Darstellungen der Modenfelder, die nicht auf ein räumliches Rechenfenster beschränkt sind,
- bildet demnach eine ideale Basis für weitere Simulationsschritte.