

Simulation der Vorläuferpulse bei Fokussierung ultrakurzer optischer Laserpulse

H. Dehne, F. Loosen, W. Iff, N. Lindlein

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Institut für Optik, Information und Photonik, Erlangen

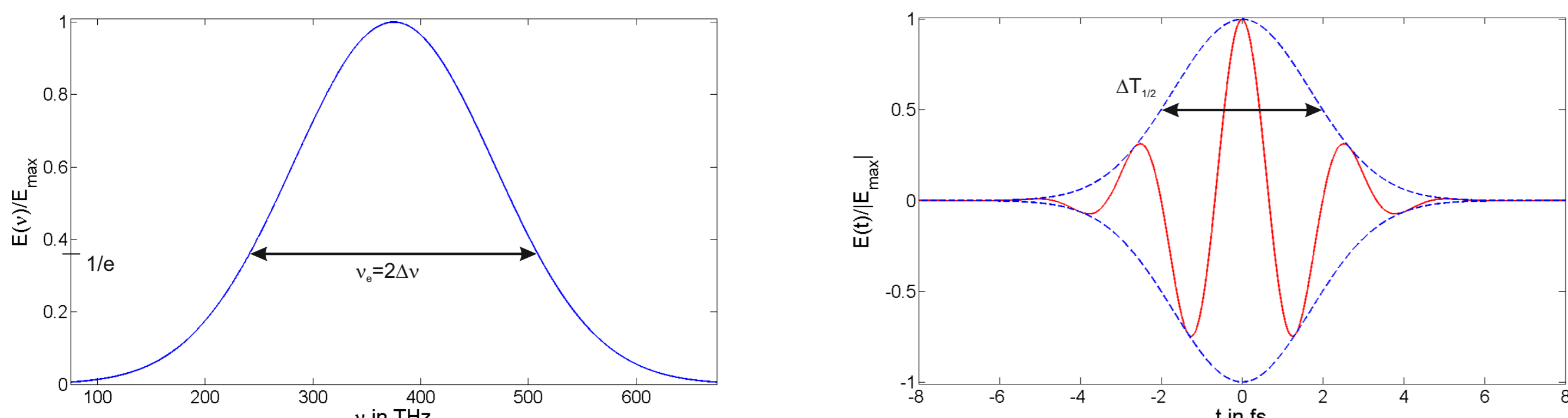
Henry.Dehne@biologie.stud.uni-erlangen.de

ÜBERBLICK

Bei der Fokussierung ultrakurzer optischer Pulse tritt ein sog. Vorläuferpuls auf, der sich außerhalb des Fokus vom Hauptpuls separiert und mit scheinbar Überlichtgeschwindigkeit ausbreitet. Dieser Vorläuferpuls entsteht durch die Beugung des Pulses an der Apertur. Der Einfluss von Parametern wie Aperturform und Polarisierung auf Geschwindigkeit, Form und Intensität wurde unter Verwendung des Debye-Integrals simuliert.

OPTISCHE PULSE

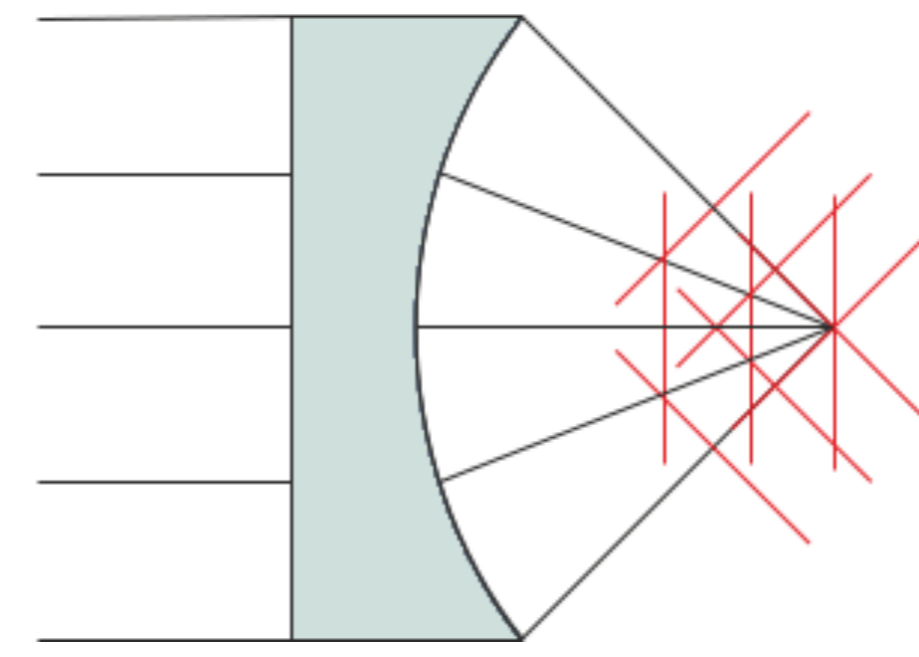
Ein gaussförmiges Frequenzspektrum erzeugt eine gaussförmige Einhüllende des Pulses in der Zeitdomäne. Dabei gilt ein reziproker Zusammenhang zwischen Pulsdauer und Frequenzbreite: $\Delta T_{1/2} = \frac{1,06}{\nu_e}$



Gaussförmiges Frequenzspektrum(links) mit Breite $\nu_e = 265 THz$ und Schwerpunktfrequenz $\nu_0 = 375 THz$, entsprechender Puls in der Zeitdomäne(rechts) mit $T_{1/2} = 4 fs$

SIMULATION

Die Simulationen beruhen auf der vektoriellen Erweiterung des Debye-Integrals. Hier werden die geometrisch-optischen Strahlen als Planwellen aufgefasst und die elektrischen Feldstärkevektoren bei Überlagerung summiert.



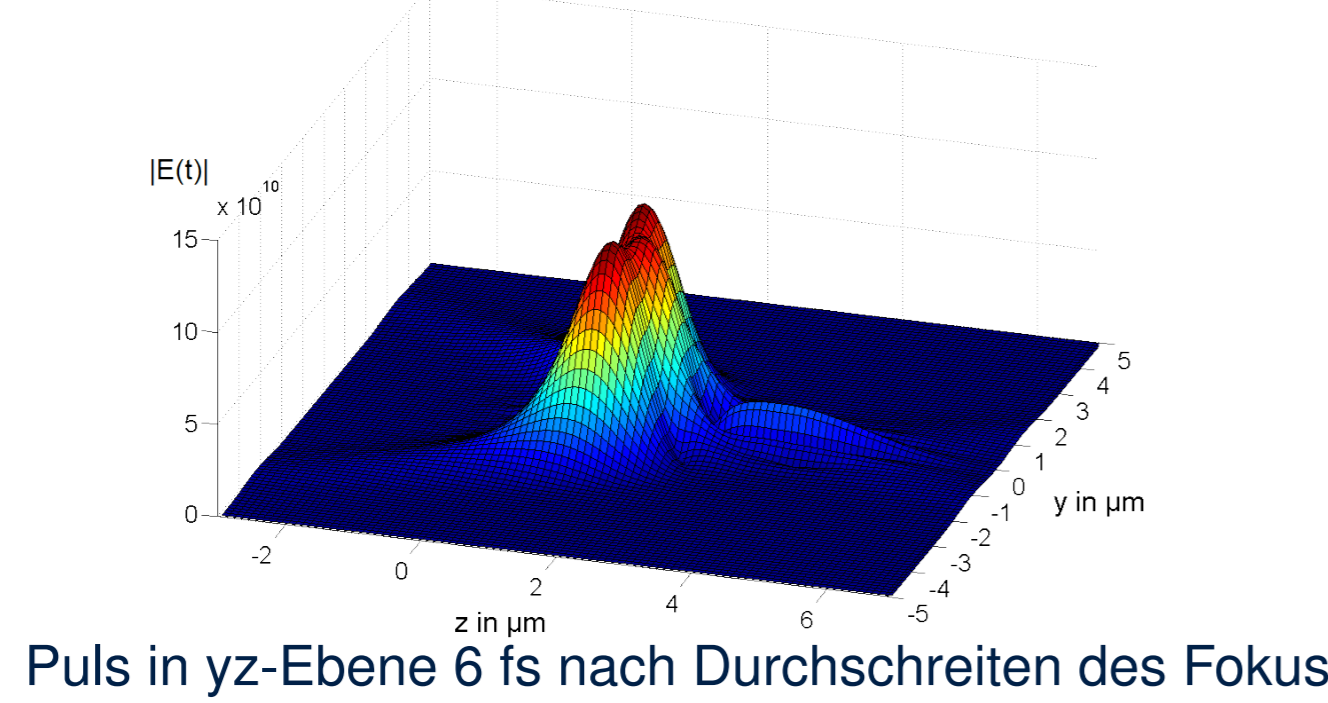
Debye-Methode: Überlagerung zum Fokus laufender Planwellen

Simulationsparameter
aplanatische Linse mit $NA = 0,9$, Breite des Pulses von $T_{1/2} = 4 fs$ bei Schwerpunktfrequenz $\nu_0 = 375 THz$ und lineare Polarisierung

Für die Ausbreitung von optischen Pulsen müssen die zeitabhängigen Feldstärkevektoren der einzelnen Frequenzkomponenten im Fokusbereich addiert/integriert werden.

VORLÄUFERPULS

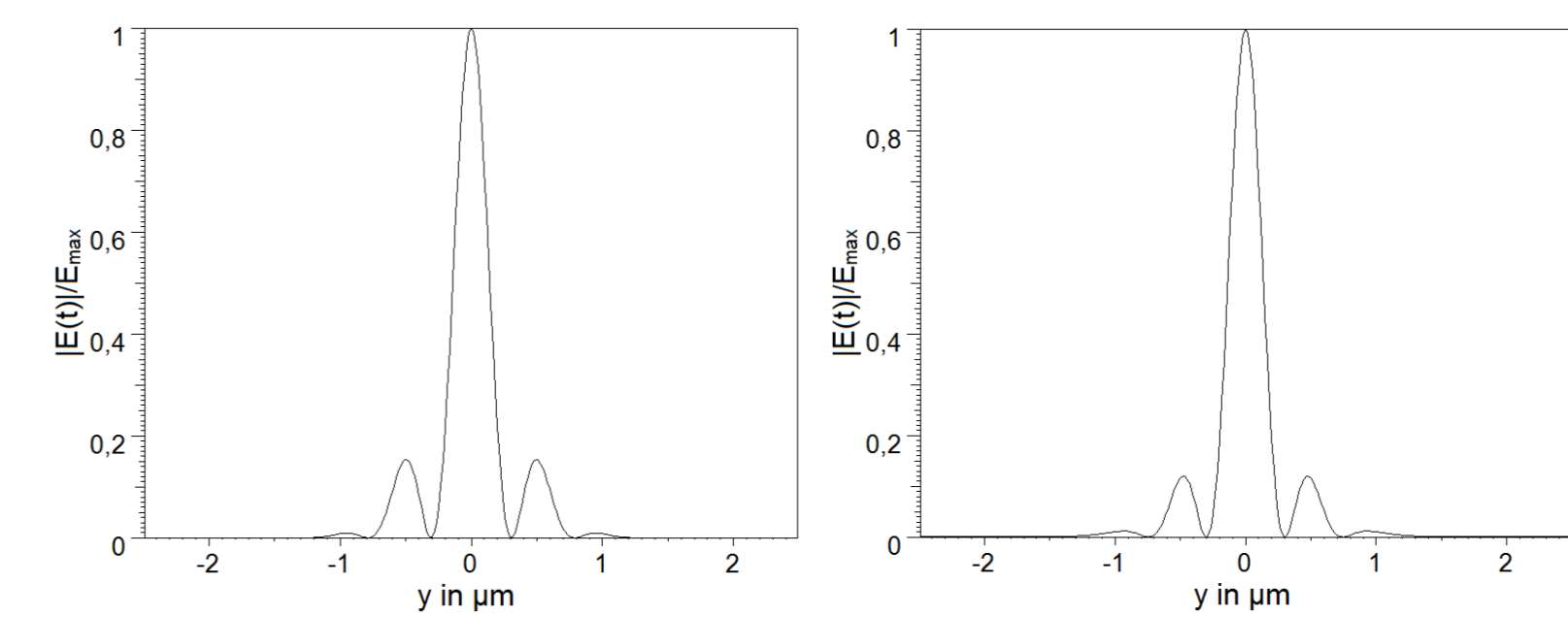
Der Vorläuferpuls tritt neben dem Hauptpuls im Fokusbereich auf und separiert sich von diesem aufgrund der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Dabei gilt: $v_B = \frac{c}{\cos(\varphi)}$, mit φ halber objektseitiger Öffnungswinkel und c Lichtgeschwindigkeit



Puls in yz-Ebene 6 fs nach Durchschreiten des Fokus

FORM

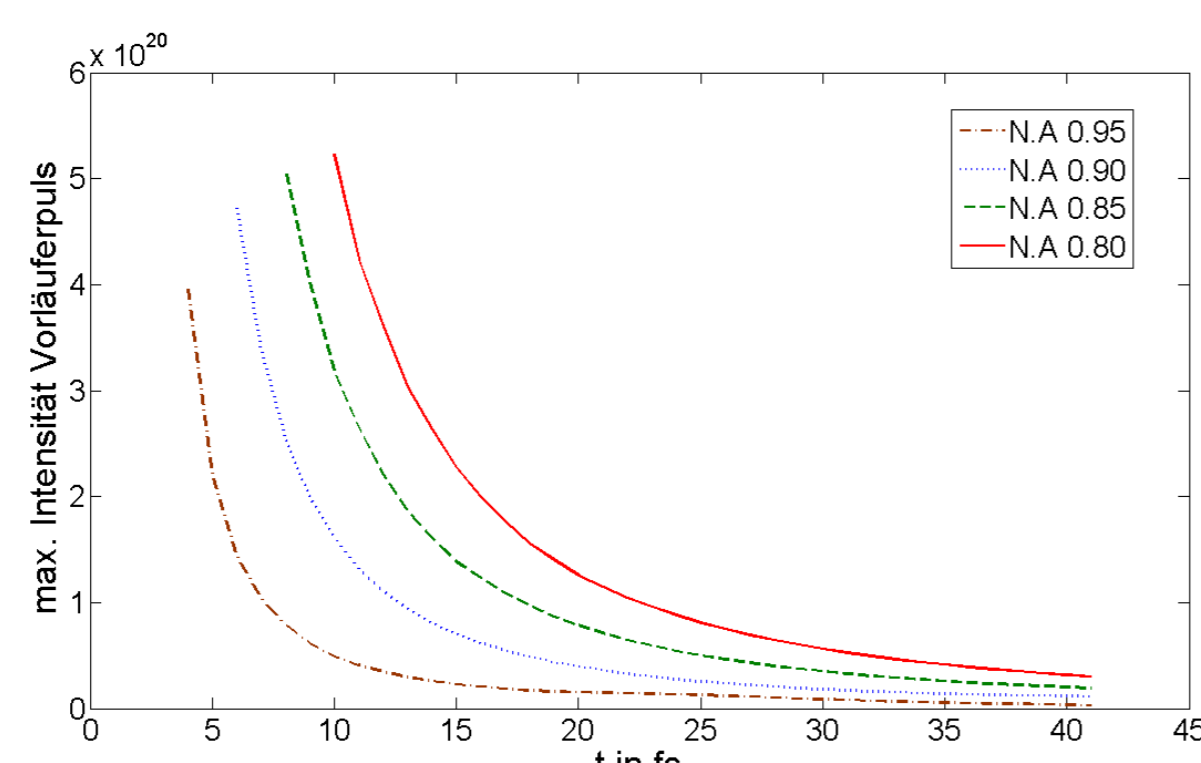
Die Form des Vorläuferpulses bleibt während der Ausbreitung nahezu konstant und beschränkt sich auf einen kleinen Bereich um die optische Achse.



Intensität des Vorläuferpulses im y-Querschnitt nach 20 fs(links) und 40 fs(rechts)

NUMERISCHE APERTUR

Der Vorläuferpuls breitet sich nur auf der optischen Achse aus und verliert während der Ausbreitung an Intensität.

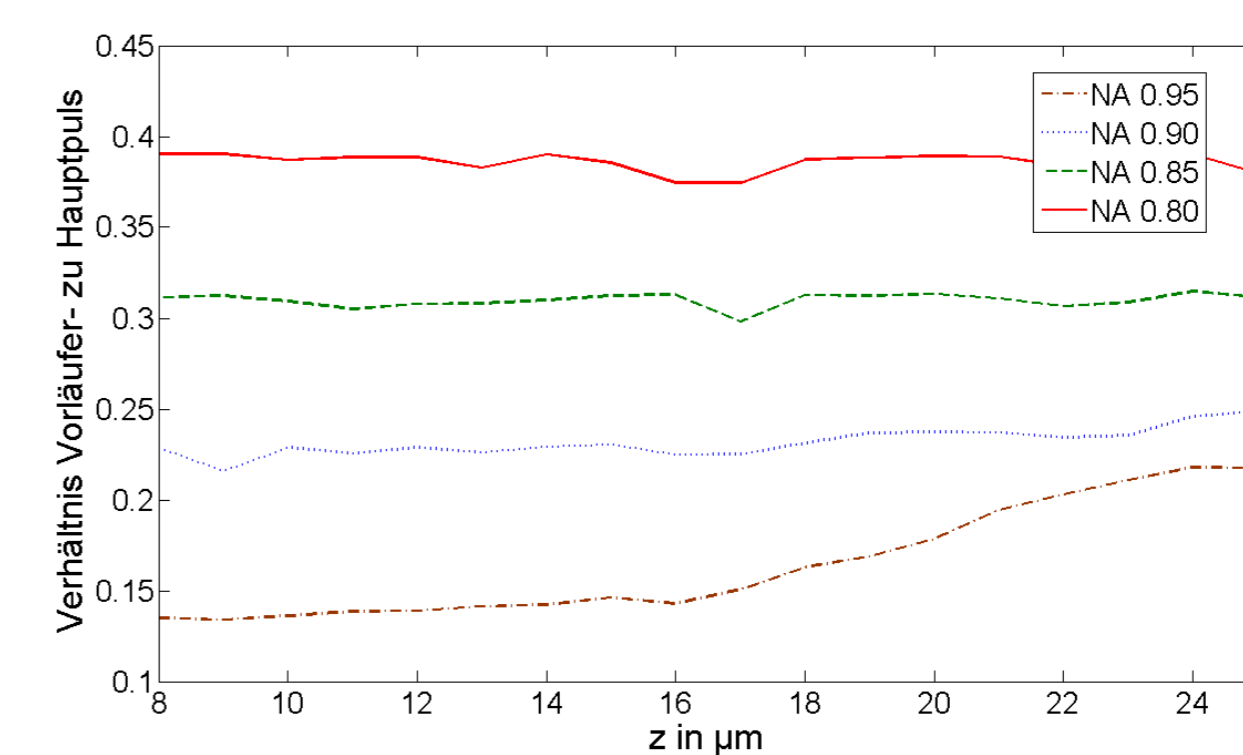


NA abhängiger Intensitätsverlust des Maximalwerts des Vorläuferpulses zu verschiedenen Zeitpunkten t

Aufgrund der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei großen NAs ist auch der Intensitätsverlust stärker ausgeprägt.

VERGLEICH VORLÄUFER- UND HAUPTPULS

Für die Bestimmung des Einflusses von Vorläufer- auf Hauptpuls wird das Verhältnis der Intensitäten im Fokusbereich verglichen.

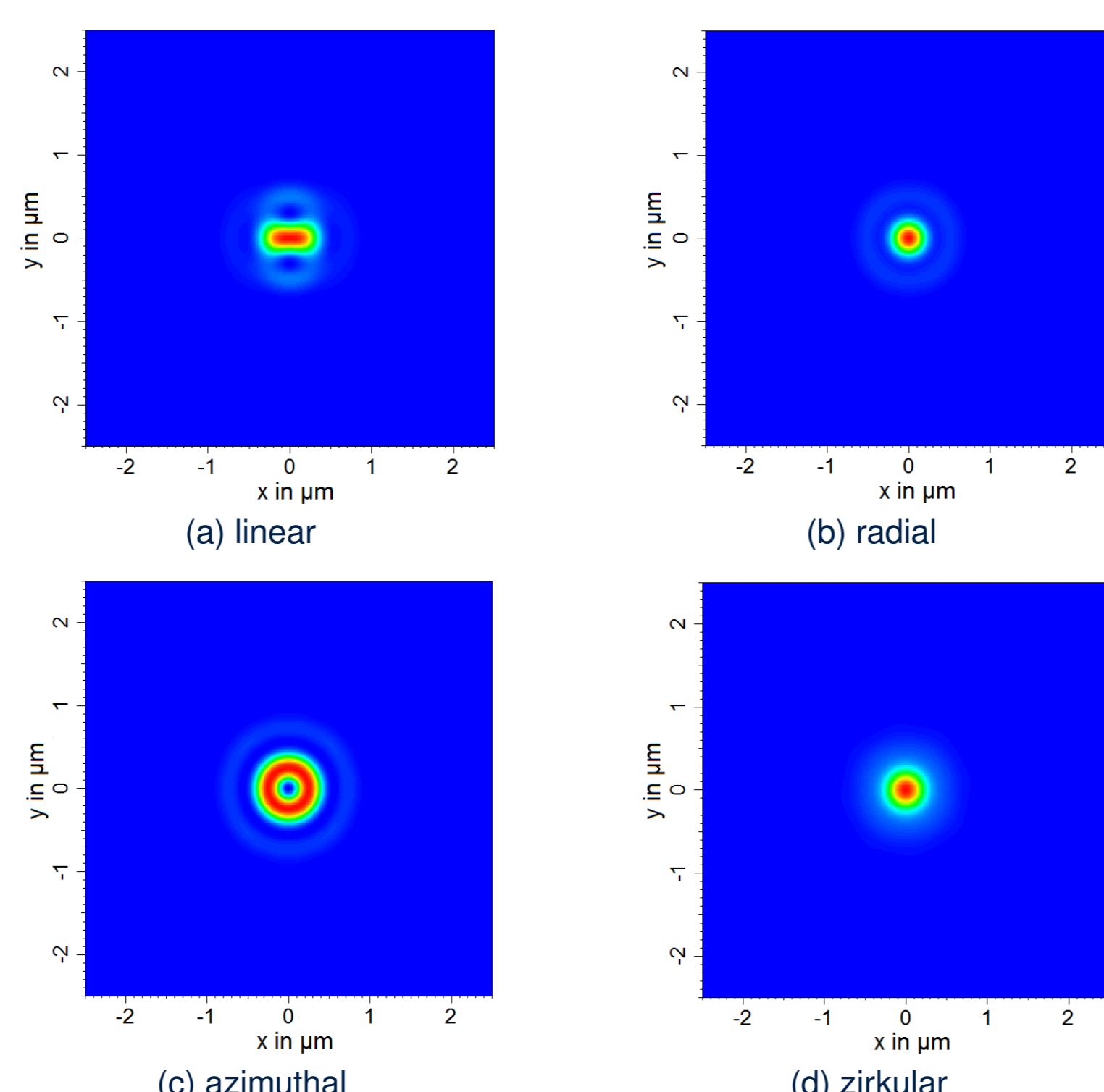


Verhältnis der Maxima von Haupt- und Vorläuferpuls auf der optischen Achse bei verschiedenen NAs

Der Einfluss des Vorläuferpulses im Fokusbereich ist bei niedrigen NAs am größten und unabhängig von der Distanz.

POLARISATION

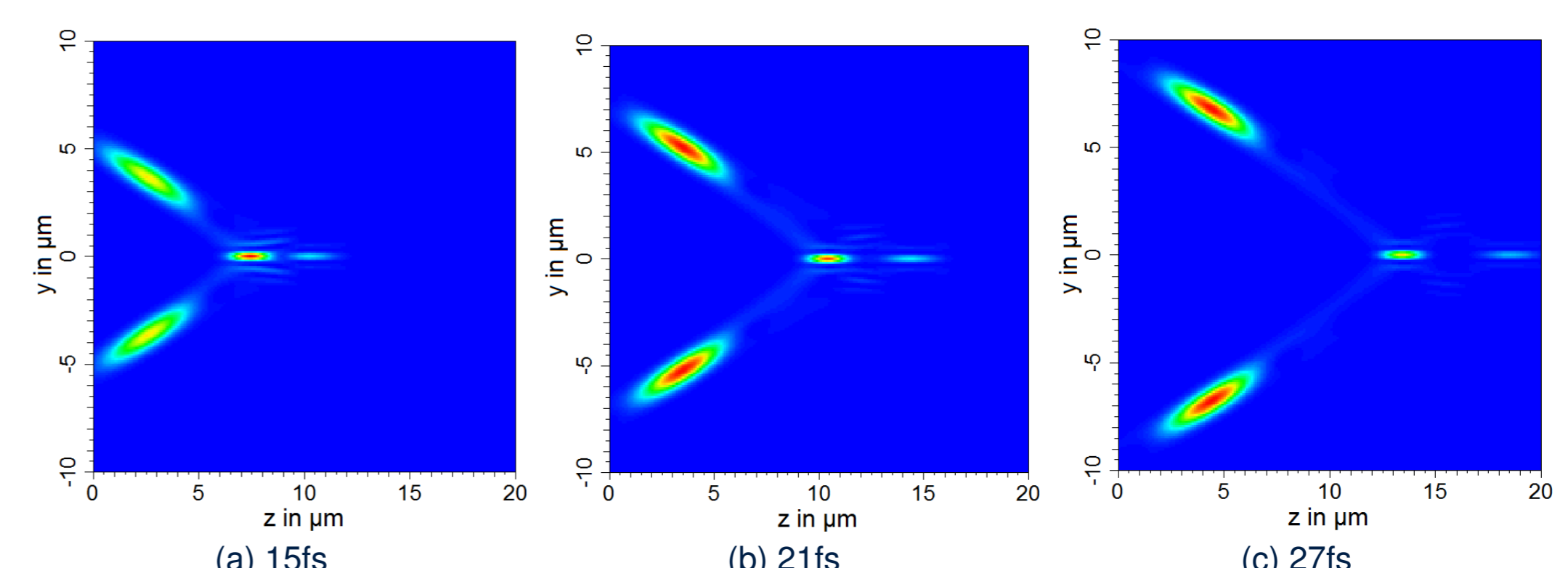
Die Auswirkungen der Polarisation des fokussierten Pulses auf die Form des Vorläuferpulses wurde für lineare, radiale, zirkulare und azimuthale Polarisation untersucht.



Vorläuferpulse in der xy-Ebene für unterschiedliche Polarisationszustände und Ausbreitungszeit $t = 20 fs$, mit $z = v_B t = 13,76 \mu m$

APERTURFORM

Ringförmige Blenden erzeugen durch die Beugung an innerer und äußerer Apertur zwei Vorläuferpulse.



Draufsicht auf Puls bei ringförmiger Apertur(9-8 mm Radius, $f=10 mm$) und verschiedenen Ausbreitungszeiten

Aufgrund der unterschiedlichen resultierenden NAs besitzen beide Vorläuferpulse verschiedene Geschwindigkeiten. Durch die ringförmige Apertur und der hufeisenförmigen Ausbreitung des Hauptpulses sind die beiden Vorläuferpulse und der Hauptpuls zeitlich und räumlich voneinander getrennt.

[1] Zs. Bor, Z.L. Horvath, *Distortion of femtosecond pulses in lenses. Wave optical description*, Optics Communication 94, 249 (1992)

[2] Z.L. Horvath, Zs. Bor, *Diffraction of short pulses with boundary diffraction wave theory*, Physical Review E 63, 026601 (2001)

[3] N. Lindlein, W. Iff, *Simulation of tightly focused ultrashort optical pulses taking into account polarization*, Proceedings of International Light Simulation Symposium (ILISIS), 355 (2012)