

Aspekte zum Design von THz-Optik

Claudia Brückner, Stefan Riehemann, Gunther Notni, Andreas Tünnermann

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena

<mailto:claudia.brueckner@iof.fraunhofer.de>

Die Anforderungen an das Optikdesign im THz-Bereich werden dargestellt. Es wird gezeigt, wie eine Optimierung nach dem geometrisch-optischen Modell zum Erreichen beugungsbegrenzter optischer Systeme eingesetzt werden kann.

1 Einführung

Als THz-Strahlung wird der Wellenlängenbereich von 30 μm bis 3 mm bezeichnet. Ein breites Spektrum dieser Strahlung umfassen THz-Pulse. Dies sind Einzelzyklusschwingungen elektromagnetischer Strahlung mit einem Spektrum im Bereich von etwa 0,1 bis 3 THz bzw. 0,1 bis 3 mm [1]. Auch in diesem Spektralbereich soll die Strahlendung „quasioptisch“ mit Freiraumkomponenten erfolgen. Um kompakte Systeme verwirklichen zu können, sind Komponenten in der Größenordnung der Wellenlänge erforderlich. Dadurch haben Beugungseffekte einen wesentlichen Einfluss auf die Strahlausbreitung. So ist bei Optiken mit einer Apertur von 50 mm deren Durchmesser 17 bis 500 mal größer als die Wellenlänge der THz-Pulse. Zudem muss die chromatische Aberration durch die Materialdispersion bei Ausbreitung dieser breitbandigen kohärenten Strahlung berücksichtigt werden [2]. Im zeitlichen Verlauf der THz-Pulse äußert sich die Beugung in einer Pulsverformung während der Ausbreitung.

2 Auflösungsvermögen von THz-Optiken

Die Bestimmung des Auflösungsvermögens soll am Beispiel einer paraxialen Linse mit einer Brennweite von 100 mm demonstriert werden. Der Abbildungsmaßstab beträgt -1 . Die numerische Apertur wurde auf 0,122 beschränkt, was einem Öffnungswinkel von ca. 7° entspricht. Für die Wellenlänge wurde 100 μm gewählt. Für den Fall inkohärent strahlender Objekte liefert das Rayleighkriterium ein Auflösungsvermögen von $\delta r = 500 \mu\text{m}$. Beim Sparrowkriterium gelten zwei Punkte als aufgelöst, wenn ihre gemeinsame Funktion entlang ihrer Verbindungslinie ein Minimum besitzt. Dies ergibt ein Auflösungsvermögen von $\delta r = 336 \mu\text{m}$. Im Fall kohärent strahlender Objekte kann nur das Sparrowkriterium angewendet werden. Dieses liefert hier eine Auflösung von $\delta r = 598 \mu\text{m}$.

3 Bewertung von THz-Optiken mit ZEMAX

Zur Bewertung der Beugungsbegrenztheit des Systems kann das Spotdiagramm verwendet werden. Dieses zeigt neben dem Zerstreuungskreis

durch geometrisch-optische Aberrationen auch das Airy-Scheibchen. Die MTF dient der Bestimmung der oberen Grenzfrequenz für den inkohärenten Fall. Hier wurde in ZEMAX die Funktion Huygens-MTF gewählt, da diese die größtmögliche Genauigkeit liefert und auch für stark aberrationsbehaftete Systeme angewendet werden kann [3]. Das Physical Optics Propagation (POP)-Tool in ZEMAX dient der kohärenten Durchrechnung von Feldverteilungen auf der Basis der Fresnelnäherung des Fresnel-Kirchhoffschen Beugungsintegrals. Die Berechnung des Beugungsintegrals erfolgt mithilfe einer FFT. Das Feld wird nach ebenen Wellen zerlegt [4]. Fresnelnäherung bedeutet paraxiale Näherung und gilt für Strukturdetails $|\delta r| \gg \lambda/n \approx 10 \cdot \lambda/n$. Für das gewählte Beispiel wird erwartet, dass ein Strukturdetail von ca. 600 μm aufgelöst werden kann, d.h. dieses ist nur 6 mal größer als die Wellenlänge. Daher stellt die paraxiale Näherung eine Idealisierung für den Fall des maximalen Auflösungsvermögens dar. Als Eingangsfeldverteilung wurde ein Sinusamplitudengitter gewählt (Abb. 1). Dessen Ortsfrequenz wurde nun so lange reduziert, bis das Gitter im Bildraum wieder aufgelöst werden konnte. Für die paraxiale Linse ergibt sich eine Auflösung von 1,7 LP/mm (Abb. 2).

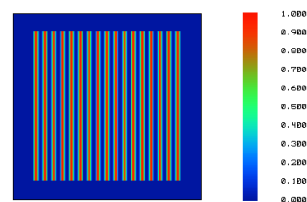


Abb. 1 Intensitätsverteilung des Sinusamplitudengitters für die Durchrechnung mit dem ZEMAX-POP-Tool.

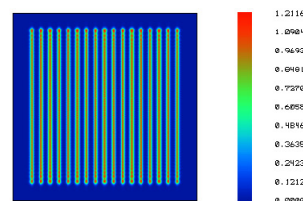


Abb. 2 Bild des Sinusamplitudengitters nach Durchrechnung durch die paraxiale Linse am paraxialen Bildort mit dem POP-Tool.

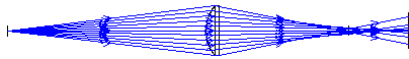


Abb. 3 Strahldurchrechnung an der plan-konvexen Linse.

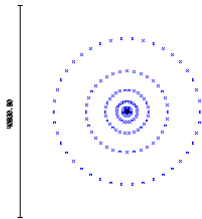


Abb. 4 Spotdiagramm: Das Airy-Scheibchen ist der schwarze Punkt in der Mitte (Durchmesser 311,2 μm).

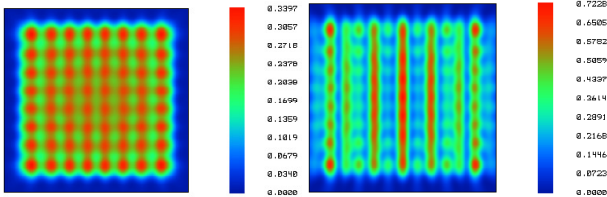


Abb. 5 Intensitätsverteilung am paraxialen Bildort bei Abbildung der Ortsfrequenzen 1,7 LP/mm (links) und 0,6 LP/mm (rechts) mit dem POP-Tool.

Nun wurde für die paraxiale Linse eine plan-konvexe Kataloglinse für den THz-Bereich eingesetzt (Abb. 3). Die Brennweite beträgt ebenfalls 100 mm. Das Linsenmaterial ist Teflon und besitzt im THz-Bereich einen frequenzunabhängigen Brechungsindex von 1,4. Das Bild wurde am paraxialen Bildort aufgefangen, da hier das Fernfeldbeugungsmuster entsteht, das nun durch geometrisch-optische Aberrationen gestört ist. Die numerische Apertur betrug auch hier 0,122. Das Spotdiagramm zeigt, dass der Zerstreuungskreis durch geometrisch-optische Aberrationen deutlich größer ist als das Airy-Scheibchen (Abb. 4). Das System ist also nicht beugungsbegrenzt. Entsprechend lieferte die Huygens-MTF eine reduzierte Auflösung von 0,9 LP/mm. Mit dem POP-Tool wurde zunächst eine Ortsfrequenz von 1,7 LP/mm durchgerechnet. Durch die Aberrationen kann diese nicht aufgelöst werden. Die Ortsfrequenz wurde nun solange reduziert bis das Gitter wieder im Bildraum aufgelöst werden konnte. Dies ist bei 0,6 LP/mm der Fall (Abb. 5).

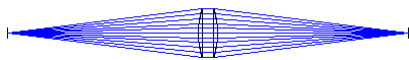


Abb. 6 Optimiertes Linsendesign.

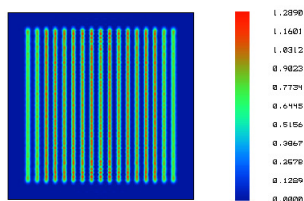


Abb. 7 Abbildung des Sinusamplitudengitters mit dem POP-Tool für eine Ortsfrequenz von 1,7 LP/mm.

Mithilfe höherer Asphärenkoeffizienten wurde die Linse nun so korrigiert, dass das System wieder beugungsbegrenzt ist (Abb. 6). Mit diesem System kann auch eine Ortsfrequenz von 1,7 LP/mm wieder aufgelöst werden (Abb. 7).

4 Talbot-Imaging im Bildraum

Bei der kohärenten Ausbreitung einer einzelnen Ortsfrequenz f kommt es nach einer charakteristischen Ausbreitungslänge von $\Delta z_{\text{char}} = 1/(2\lambda f^2)$ zu einem reinen Phasenkontrast und nach einer weiteren charakteristischen Ausbreitungslänge zu einer Umkehr des Amplitudenkontrasts [4]. Für das oben gewählte Beispiel beträgt die charakteristische Ausbreitungslänge 1,73 mm. Bei einer Wellenlänge von 50 μm ist diese 3,46 mm. Versetzt man nun die Bildebene um diesen Betrag so kommt es für eine Wellenlänge von 100 μm zu einer Kontrastumkehr und für eine Wellenlänge von 50 μm zu einem Kontrast von 0 (Abb. 8). Dieser Effekt hängt mit der Kohärenz der Strahlung zusammen und ist unabhängig von Aberrationen.

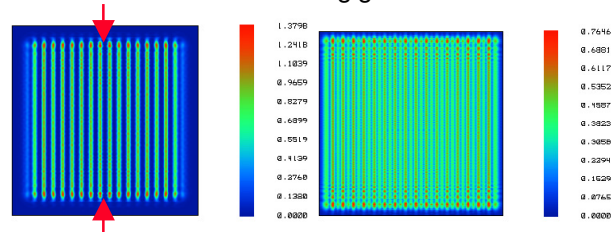


Abb. 8 Intensitätsverteilung bei Abbildung einer Ortsfrequenz von 1,7 LP/mm mit Versatz der Bildebene um 3,46 mm für die Wellenlängen 100 μm (links) und 50 μm (rechts).

5 Zusammenfassung

Dieses Beispiel demonstriert, dass eine Optimierung der Form von THz-Komponenten nach dem geometrisch-optischen Modell notwendig ist, um zu einer beugungsbegrenzten Abbildung zu gelangen. Weiterhin wurde in Abschnitt 4 gezeigt, dass das Bild am paraxialen Bildort der (korrigierten) Linse detektiert werden muss. So sind alle Ortsfrequenzen, die durch das System abgebildet werden können, im Bild mit enthalten.

Literatur

- [1] P. U. Jepsen, R. H. Jacobsen, S. R. Keiding: „Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas“ in *J. Opt. Soc. Am B* **13**(11): 2424 - 2436 (1996)
- [2] D. You, P. H. Bucksbaum: „Propagation of half-cycle far infrared pulses“ in *J. Opt. Soc. Am B* **14**(7): 1651-1655 (1997)
- [3] ZEMAX Development Corporation (Hrsg.): *ZEMAX® User's Guide* (March 2004)
- [4] G. N. Lawrence: „Optical Modeling“ in: *Applied Optics and Optical Engineering XI*, R. R. Shannon, J. C. Wyant (Hrsg.), Academic Press: 125-200 (1992)