

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen optischer Komponenten</b>                           | <b>4</b>  |
| 2.1      | Strahlenoptik . . . . .   | 4         |
| 2.1.1    | Reflexion und Brechung . . . . .                                  | 5         |
| 2.1.2    | Matrixschreibweise . . . . .                                      | 6         |
| 2.1.3    | Strahlenoptik im Raytracing-Programm . . . . .                    | 7         |
| 2.2      | Wellenoptik . . . . .   | 8         |
| 2.2.1    | Mathematische Beschreibung . . . . .                              | 8         |
| 2.2.2    | Gaußstrahlen . . . . .  | 9         |
| 2.2.3    | Beugung und Auflösungsgrenze . . . . .                            | 10        |
| 2.2.4    | Quasioptik . . . . .  | 11        |
| 2.2.5    | Wellenoptik im Raytracing-Programm . . . . .                      | 12        |
| 2.3      | Abbildende Bauelemente . . . . .                                  | 12        |
| 2.3.1    | Sphärische Linsenformen . . . . .                                 | 13        |
| 2.3.2    | Abbildungsfehler . . . . .  | 14        |
| 2.3.3    | Optimierte Linsenformen . . . . .                                 | 15        |
| 2.4      | Dielektrische Wellenleiter . . . . .                              | 17        |
| 2.4.1    | Dispersion und Dämpfung . . . . .                                 | 17        |
| 2.4.2    | Kreisförmige Wellenleiter und Koppler . . . . .                   | 18        |
| 2.4.3    | Rechteckförmige Wellenleiter und Mehr-Moden-Interferenz . . . . . | 20        |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen der Terahertz-Messtechnik</b>                       | <b>22</b> |
| 3.1      | Terahertz-Systeme . . . . .                                       | 22        |
| 3.1.1    | Dauerstrichstrahlung aus elektronischen Quellen . . . . .         | 23        |
| 3.1.2    | Gepulste Strahlung aus optoelektronischen Quellen . . . . .       | 24        |
| 3.2      | Photoleitende Antennen . . . . .                                  | 25        |
| 3.2.1    | Aufbau der Antennen . . . . .                                     | 26        |
| 3.2.2    | Erzeugung von THz-Pulsen . . . . .                                | 27        |
| 3.2.3    | Detektion von THz-Pulsen . . . . .                                | 29        |
| 3.3      | Quasioptische Komponenten . . . . .                               | 31        |
| 3.3.1    | Substratlinsen . . . . .  | 31        |
| 3.3.2    | Linsen und Hohlspiegel . . . . .                                  | 33        |
| 3.3.3    | Herstellung und Materialien quasioptischer Komponenten . . . . .  | 35        |
| 3.3.4    | Entwurfsprogramme . . . . .                                       | 35        |
| 3.4      | Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie . . . . .                     | 38        |
| 3.4.1    | Auswertung im Zeitbereich . . . . .                               | 38        |
| 3.4.2    | Auswertung im Frequenzbereich . . . . .                           | 39        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.5      | Bildgebende Messungen mit THz-Wellen . . . . .                          | 42        |
| 3.5.1    | Darstellungsformen von THz-Bildern . . . . .                            | 43        |
| 3.5.2    | Zerstörungsfreie Messungen mit THz-Wellen . . . . .                     | 44        |
| <b>4</b> | <b>Optimierung von Terahertz-Systemen</b>                               | <b>45</b> |
| 4.1      | Halbleiterdiodenlaser zur Erzeugung gepulster THz-Strahlung . . . . .   | 45        |
| 4.1.1    | Erzeugung von Femtosekunden-Laserpulsen . . . . .                       | 46        |
| 4.1.2    | Berechnung der erzielbaren THz-Bandbreite . . . . .                     | 47        |
| 4.1.3    | Generation gepulster THz-Strahlung . . . . .                            | 49        |
| 4.2      | Weiterentwicklung quasioptischer Komponenten . . . . .                  | 51        |
| 4.3      | Aufbau eines Mehrkanal-Systems . . . . .                                | 52        |
| 4.3.1    | Abbildungskonzepte . . . . .  | 52        |
| 4.3.2    | Linsendesign . . . . .  | 54        |
| 4.3.3    | Berücksichtigung von Beugungseffekten . . . . .                         | 55        |
| 4.3.4    | Vergleich: Simulation versus Messung . . . . .                          | 57        |
| 4.3.5    | Zylinderlinsen . . . . .  | 58        |
| 4.3.6    | Parallele Messungen . . . . .   | 59        |
| 4.4      | Leistungsaufteilung auf mehrere Empfänger . . . . .                     | 60        |
| 4.4.1    | Freistrahlfunktion . . . . .  | 61        |
| 4.4.2    | Wellenleiter . . . . .  | 62        |
| 4.4.3    | 3 dB-Koppler und Splitter . . . . .                                     | 64        |
| 4.4.4    | Exkurs: Endoskop . . . . .  | 67        |
| 4.5      | Entwicklung eines THz-Scannersystems . . . . .                          | 68        |
| 4.5.1    | Aufbau des Linsensystems . . . . .                                      | 68        |
| 4.5.2    | Erprobung des Scannersystems . . . . .                                  | 69        |
| 4.6      | Ausblick: Neuartige Linsenkonzepte . . . . .                            | 71        |
| 4.6.1    | Linse mit variabler Brennweite . . . . .                                | 71        |
| 4.6.2    | Linse mit erhöhter numerischer Apertur . . . . .                        | 73        |
| <b>5</b> | <b>Weiterentwicklung der Messdatenaufnahme und -auswertung</b>          | <b>76</b> |
| 5.1      | Erhöhung der Messgeschwindigkeit (Fastscan) . . . . .                   | 76        |
| 5.1.1    | Linienscans bei fester Zeitverzögerung . . . . .                        | 77        |
| 5.1.2    | Zweipunkt-Messungen zu zwei Zeitpunkten . . . . .                       | 78        |
| 5.1.3    | Fastscans bei fester Zeitverzögerung . . . . .                          | 79        |
| 5.2      | Bestimmung der lokalen Extremwerte des Signals . . . . .                | 80        |
| 5.2.1    | Minimierung des Rauschens . . . . .                                     | 82        |
| 5.2.2    | Auffinden der Extrema . . . . .   | 83        |
| 5.2.3    | Beurteilung / Qualifizierung der Extrema . . . . .                      | 84        |
| 5.2.4    | Zwei Beispiele für die Anwendung des Algorithmus . . . . .              | 86        |
| <b>6</b> | <b>Terahertz-Systeme in der zerstörungsfreien Messtechnik</b>           | <b>88</b> |
| 6.1      | Detektion nichtmetallischer Fremdkörper . . . . .                       | 88        |
| 6.1.1    | Intensitätstransmissionsbilder von Einschlüssen in Schokolade . . . . . | 89        |
| 6.1.2    | Ausbreitung des THz-Signals durch einen Fremdkörper . . . . .           | 90        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.1.3    | Detektion von Fremdkörpern in Schokolade . . . . .                     | 94         |
| 6.2      | Orientierungsanalyse in verstärkten Kunststoffen . . . . .             | 96         |
| 6.2.1    | Beispiele für doppelbrechende Materialien im THz-Bereich . . . . .     | 97         |
| 6.2.2    | Feldtheoretische Betrachtung . . . . .                                 | 98         |
| 6.2.3    | Doppelbrechung zur Orientierungsanalyse . . . . .                      | 101        |
| 6.2.4    | Faserorientierung in Kunststoffen . . . . .                            | 105        |
| 6.2.5    | Exkurs: Bestimmung des Fasergehaltes und Orientierungsgrades . . . . . | 107        |
| 6.3      | Bestimmung der Materialfeuchte . . . . .                               | 110        |
| 6.3.1    | Einfluss der Materialfeuchte auf den THz-Puls . . . . .                | 111        |
| 6.3.2    | Dielektrische Funktion von freiem Wasser . . . . .                     | 111        |
| 6.3.3    | Dielektrische Eigenschaften von Mischungen . . . . .                   | 113        |
| 6.3.4    | Pflanzenphysiologische Untersuchungen . . . . .                        | 113        |
| 6.3.5    | Einlagerung von Wasser in Kunststoffen . . . . .                       | 119        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                    | <b>126</b> |
| <b>A</b> | <b>Linsenkoeffizienten</b>   | <b>129</b> |
| <b>B</b> | <b>Verzeichnis häufig verwendeter Abkürzungen</b>                      | <b>130</b> |
| <b>C</b> | <b>Aufstellung der Formelzeichen</b>                                   | <b>131</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>133</b> |
|          | <b>Liste der Veröffentlichungen</b>                                    | <b>143</b> |

