

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                            | <b>1</b>  |
| 1.1      | Sichtprüfung . . . . .                                       | 3         |
| 1.2      | Optische Erfassung von Prüfobjekten . . . . .                | 9         |
| 1.3      | Entstehung und Definition eines Bildes . . . . .             | 11        |
| 1.4      | Automatische Sichtprüfung . . . . .                          | 13        |
| 1.5      | Praktische Durchführung von Sichtprüfungsprojekten . . . . . | 19        |
| 1.6      | Literatur . . . . .                                          | 19        |
| <b>I</b> | <b>Bildgewinnung</b>                                         | <b>21</b> |
| <b>2</b> | <b>Licht</b>                                                 | <b>23</b> |
| 2.1      | Phänomen Licht . . . . .                                     | 27        |
| 2.1.1    | Das elektromagnetische Spektrum . . . . .                    | 28        |
| 2.2      | Licht als elektromagnetische Welle . . . . .                 | 28        |
| 2.2.1    | Maxwell'sche Gleichungen . . . . .                           | 28        |
| 2.2.1.1  | Wellengleichung des elektrischen Felds . . . . .             | 31        |
| 2.2.2    | Polarisation . . . . .                                       | 37        |
| 2.2.2.1  | Die Polarisationsellipse . . . . .                           | 38        |
| 2.2.2.2  | Stokes-Vektoren . . . . .                                    | 39        |
| 2.2.2.3  | Die Poincaré-Kugel . . . . .                                 | 43        |
| 2.2.2.4  | Müller-Matrizen . . . . .                                    | 44        |
| 2.2.2.5  | Messung des Polarisationszustands . . . . .                  | 50        |
| 2.2.2.6  | Jones-Kalkül . . . . .                                       | 51        |
| 2.2.3    | Huygens'sches Prinzip . . . . .                              | 53        |
| 2.2.4    | Kohärenz . . . . .                                           | 53        |
| 2.2.5    | Interferenz . . . . .                                        | 56        |
| 2.2.6    | Beugung . . . . .                                            | 59        |
| 2.2.6.1  | Auflösung abbildender Systeme . . . . .                      | 71        |
| 2.2.7    | Speckle . . . . .                                            | 74        |
| 2.3      | Licht als Quantenphänomen . . . . .                          | 76        |
| 2.4      | Das Strahlenmodell der geometrischen Optik . . . . .         | 80        |
| 2.5      | Zusammenfassung . . . . .                                    | 81        |
| 2.6      | Wechselwirkung von Licht und Materie . . . . .               | 82        |
| 2.6.1    | Absorption . . . . .                                         | 82        |
| 2.6.2    | Reflexionsgesetz . . . . .                                   | 83        |
| 2.6.3    | Brechungsgesetz . . . . .                                    | 84        |

|          |                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.4    | Streuung . . . . .                                                     | 86         |
| 2.6.5    | Die Fresnel'schen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten . . . . . | 88         |
| 2.6.6    | Elektromagnetische Wellen in leitfähigen Medien . . . . .              | 94         |
| 2.6.6.1  | Der komplexe Brechungsindex . . . . .                                  | 94         |
| 2.6.6.2  | Reflexion an leitfähigen Medien . . . . .                              | 96         |
| 2.7      | Lichtquellen . . . . .                                                 | 99         |
| 2.7.1    | Temperaturstrahler . . . . .                                           | 99         |
| 2.7.1.1  | Physikalische Grundlagen . . . . .                                     | 99         |
| 2.7.1.2  | Glüh- und Halogenlampen . . . . .                                      | 101        |
| 2.7.2    | Gasentladungslampen . . . . .                                          | 103        |
| 2.7.3    | Leuchtdioden . . . . .                                                 | 108        |
| 2.7.3.1  | Organische Leuchtdioden . . . . .                                      | 111        |
| 2.7.4    | Laser . . . . .                                                        | 112        |
| 2.7.5    | Zusammenfassung . . . . .                                              | 115        |
| 2.8      | Literatur . . . . .                                                    | 118        |
| <b>3</b> | <b>Optische Abbildung</b>                                              | <b>123</b> |
| 3.1      | Einleitung . . . . .                                                   | 125        |
| 3.2      | Abbildung mit einer Lochkamera, Zentralprojektion . . . . .            | 127        |
| 3.3      | Kameramodell und Kamerakalibrierung . . . . .                          | 130        |
| 3.4      | Abbildung mit einer Linse (Objektiv) . . . . .                         | 134        |
| 3.4.1    | Paraxiale Näherung und Gauß'sche Optik . . . . .                       | 135        |
| 3.4.2    | Abbildungsgesetz . . . . .                                             | 137        |
| 3.4.3    | Bündelbegrenzung . . . . .                                             | 144        |
| 3.4.4    | Schärfentiefe . . . . .                                                | 150        |
| 3.4.5    | Telezentrische Abbildung . . . . .                                     | 155        |
| 3.4.5.1  | Abbildungsunschärfe bei der telezentrischen Optik . . . . .            | 158        |
| 3.4.5.2  | Beidseitige Telezentrie . . . . .                                      | 159        |
| 3.4.6    | Perspektive . . . . .                                                  | 160        |
| 3.4.7    | Abbildung bei verkippten Ebenen . . . . .                              | 163        |
| 3.4.8    | Abbildungsfehler . . . . .                                             | 167        |
| 3.4.8.1  | Seidel'sche Aberrationen sphärischer Linsen . . . . .                  | 168        |
| 3.4.8.2  | Chromatische Aberration . . . . .                                      | 172        |
| 3.5      | Optische Instrumente mit mehreren Linsen . . . . .                     | 173        |
| 3.5.1    | Projektionsapparat . . . . .                                           | 173        |
| 3.5.2    | Mikroskop . . . . .                                                    | 174        |
| 3.6      | Literatur . . . . .                                                    | 177        |
| <b>4</b> | <b>Radiometrie</b>                                                     | <b>179</b> |

- 4.1 Radiometrische Größen . . . . . 181
- 4.2 Das Lichtfeld eines Prüfobjekts . . . . . 187
- 4.3 Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) . . . . . 190
  - 4.3.1 BRDF und Streulicht . . . . . 194
- 4.4 Bildwertentstehung bei der optischen Abbildung mit einer dünnen Linse . . . . . 197
- 4.5 Literatur . . . . . 200
- 5 Farbe 203**
- 5.1 Photometrie . . . . . 205
- 5.2 Farbwahrnehmung und Farbräume . . . . . 207
  - 5.2.1 Farbwahrnehmung des menschlichen Auges . . . . . 208
  - 5.2.2 Farbmischung . . . . . 213
  - 5.2.3 Die CIE-Farbräume . . . . . 216
  - 5.2.4 Spektralphotometrische Farbmessung und Farbabstandsbestimmung . . . . . 231
  - 5.2.5 Farbordnungssysteme . . . . . 239
  - 5.2.6 Weitere Farbräume . . . . . 240
    - 5.2.6.1 Gamma-Korrektur . . . . . 240
    - 5.2.6.2 RGB-Farbräume . . . . . 242
    - 5.2.6.3 HSI und HSV . . . . . 244
    - 5.2.6.4 YUV und  $Y C_B C_R$  . . . . . 246
    - 5.2.6.5 Farbdruck und CMYK . . . . . 247
- 5.3 Filter . . . . . 248
- 5.4 Aufnahme und Verarbeitung von Farbbildern . . . . . 251
- 5.5 Literatur . . . . . 252
- 6 Sensoren zur Bildgewinnung 255**
- 6.1 Punkt-, Zeilen- und Flächensensoren . . . . . 258
- 6.2 Röhrenkameras . . . . . 258
- 6.3 Photomultiplier . . . . . 258
  - 6.3.1 Restlichtverstärker . . . . . 259
- 6.4 Photodioden . . . . . 260
- 6.5 PSD-Sensoren . . . . . 263
- 6.6 CCD-Sensoren . . . . . 265
- 6.7 CMOS-Sensoren . . . . . 269
- 6.8 Infrarotkameras . . . . . 271
  - 6.8.1 Bolometer-Kameras . . . . . 271

- 6.8.2 Infrarot-Quantendetektorkameras . . . . . 273
  - 6.8.3 Quantenpunkt-Sensoren . . . . . 274
- 6.9 Zeilenkameras . . . . . 275
- 6.10 Farbsensoren und Farbkameras . . . . . 276
- 6.11 Multispektral- und Hyperspektralsensorik . . . . . 277
- 6.12 Lichtlaufzeitkameras . . . . . 279
- 6.13 Ereignisbasierte Sensoren . . . . . 279
- 6.14 Qualitätskriterien für Bildsensoren . . . . . 280
- 6.15 Literatur . . . . . 281
- 7 Bildaufnahmeverfahren 285**
- 7.1 Einleitung . . . . . 289
- 7.2 Erfassung der optischen Eigenschaften . . . . . 292
  - 7.2.1 Messung des komplexen Brechungsindexes . . . . . 292
    - 7.2.1.1 Reflektometrie . . . . . 292
    - 7.2.1.2 Ellipsometrie . . . . . 297
  - 7.2.2 Fluoreszenz . . . . . 307
  - 7.2.3 Verfahren zur Reflektanzerfassung . . . . . 310
    - 7.2.3.1 Diffuse Beleuchtung . . . . . 311
    - 7.2.3.2 Hellfeldbeleuchtung . . . . . 311
    - 7.2.3.3 Dunkelfeldbeleuchtung . . . . . 313
    - 7.2.3.4 Laserscanner . . . . . 314
    - 7.2.3.5 Flachbettscanner . . . . . 317
  - 7.2.4 Erfassung der spektralen Reflektanz . . . . . 318
  - 7.2.5 Streulichtverfahren und Prüfung der Oberflächenrauheit . . . 321
- 7.3 Erfassung der räumlichen Gestalt (3D-Form) . . . . . 324
  - 7.3.1 Triangulation (punktweise Abtastung) . . . . . 325
  - 7.3.2 Lichtschnittverfahren (Linienabtastung) . . . . . 330
  - 7.3.3 Messunsicherheit der Triangulation . . . . . 332
  - 7.3.4 Strukturierte Beleuchtung (Flächenabtastung) . . . . . 334
    - 7.3.4.1 Streifenprojektion . . . . . 336
  - 7.3.5 Deflektometrie . . . . . 341
    - 7.3.5.1 Offene Forschungsfragen der Deflektometrie . . . . 351
    - 7.3.5.2 Wahrnehmbarkeit von Defekten . . . . . 352
    - 7.3.5.3 Infrarotdeflektometrie . . . . . 352
  - 7.3.6 Moiré-Verfahren . . . . . 354
    - 7.3.6.1 Der Moiré-Effekt . . . . . 354
    - 7.3.6.2 Mathematisches Modell des Moiré-Effekts . . . . . 356
    - 7.3.6.3 Telezentrische Streifenprojektion . . . . . 357

|          |                                                                  |     |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.6.4  | Schattenmoiré . . . . .                                          | 362 |
| 7.3.6.5  | Projektionsmoiré . . . . .                                       | 363 |
| 7.3.7    | Schlussbetrachtung zur strukturierten Beleuchtung . . . . .      | 364 |
| 7.3.8    | Stereoaufnahmen . . . . .                                        | 364 |
| 7.3.8.1  | Herleitung der Fundamentalmatrix . . . . .                       | 366 |
| 7.3.8.2  | Stereokorrespondenzalgorithmen . . . . .                         | 369 |
| 7.3.8.3  | Stereorekonstruktion . . . . .                                   | 370 |
| 7.3.8.4  | Mehrkamerasysteme . . . . .                                      | 371 |
| 7.3.8.5  | Monokulares Stereo . . . . .                                     | 372 |
| 7.3.9    | Lichtfeldkamera . . . . .                                        | 372 |
| 7.3.10   | Silhouettenerfassung . . . . .                                   | 378 |
| 7.3.10.1 | Telezentrische Silhouettenerfassung . . . . .                    | 381 |
| 7.3.10.2 | Beleuchtung für die telezentrische Abbildung . . . . .           | 381 |
| 7.3.10.3 | Retroreflektoren . . . . .                                       | 381 |
| 7.3.11   | Shape from Shading . . . . .                                     | 385 |
| 7.3.12   | Autofokussensoren . . . . .                                      | 387 |
| 7.3.13   | Konfokale Mikroskopie . . . . .                                  | 388 |
| 7.3.14   | Konfokale chromatische Triangulation . . . . .                   | 393 |
| 7.3.15   | Lichtlaufzeitsensoren . . . . .                                  | 394 |
| 7.3.16   | Phasenbasierte Verfahren . . . . .                               | 395 |
| 7.3.16.1 | Interferometrie . . . . .                                        | 395 |
| 7.3.16.2 | Speckleinterferometrie für die Materialprüfung . . . . .         | 402 |
| 7.3.16.3 | Scherographie . . . . .                                          | 402 |
| 7.3.16.4 | Holographie . . . . .                                            | 405 |
| 7.4      | Erfassung innerer Objektstrukturen . . . . .                     | 409 |
| 7.4.1    | Thermographie . . . . .                                          | 409 |
| 7.4.2    | Bildgebung mit Röntgenstrahlung . . . . .                        | 415 |
| 7.4.3    | Optische Kohärenztomographie . . . . .                           | 421 |
| 7.4.4    | Schlierenmessverfahren und Schlierentomographie . . . . .        | 424 |
| 7.4.5    | Lichtfeldmethoden zur Inspektion transparenter Objekte . . . . . | 424 |
| 7.4.6    | Bildaufnahme mit Terahertz-Strahlung . . . . .                   | 428 |
| 7.4.7    | Spannungsoptik . . . . .                                         | 436 |
| 7.5      | Spezielle Bildaufnahmeverfahren . . . . .                        | 445 |
| 7.5.1    | Bildaufnahmesystem mit variabler Beleuchtungsrichtung . . . . .  | 450 |
| 7.5.2    | Endoskopie . . . . .                                             | 451 |
| 7.6      | Allgemeine Prinzipien . . . . .                                  | 452 |
| 7.6.1    | Fremdlichtunterdrückung . . . . .                                | 452 |
| 7.6.2    | Inverse Beleuchtung . . . . .                                    | 454 |
| 7.6.3    | Planungsalgorithmen für Sichtprüfungsaufgaben . . . . .          | 459 |

- 7.6.3.1 Planungsverfahren für die triangulationsbasierte 3D-Erfassung . . . . . 462
  - 7.6.3.2 Planungsverfahren für die deflektometrische Oberflächeninspektion . . . . . 464
- 7.7 Zusammenfassung . . . . . 465
- 7.8 Literatur . . . . . 467

**II Bildauswertung 481**

- 8 Bildsignale 483**
  - 8.1 Mathematische Beschreibung von Bildsignalen . . . . . 487
  - 8.2 Systeme und Signale . . . . . 488
    - 8.2.1 Systemeigenschaften . . . . . 491
    - 8.2.2 Dirac-Impuls . . . . . 493
      - 8.2.2.1 Definition des Dirac-Impulses . . . . . 493
      - 8.2.2.2 Eigenschaften des Dirac-Impulses . . . . . 495
    - 8.2.3 Der Faltungsoperator . . . . . 497
  - 8.3 Die Fourier-Transformation . . . . . 499
    - 8.3.1 Eindimensionale Fourier-Transformation . . . . . 499
      - 8.3.1.1 Definition der Fourier-Transformation . . . . . 499
      - 8.3.1.2 Eigenschaften der Fourier-Transformation . . . . . 502
      - 8.3.1.3 Korrespondenzen der Fourier-Transformation . . . . . 509
      - 8.3.1.4 Zusammenhang zwischen Glattheit im Ortsbereich und Abklingverhalten im Frequenzbereich . . . . . 513
    - 8.3.2 Das eindimensionale Abtasttheorem . . . . . 515
    - 8.3.3 Diskrete Fourier-Transformation (DFT) . . . . . 518
      - 8.3.3.1 Definition der DFT . . . . . 518
      - 8.3.3.2 Eigenschaften der DFT . . . . . 521
      - 8.3.3.3 Leckeffekt . . . . . 521
      - 8.3.3.4 Schnelle Fourier-Transformation (FFT) . . . . . 524
      - 8.3.3.5 Faltungstheorem der DFT . . . . . 524
    - 8.3.4 Die zweidimensionale Fourier-Transformation . . . . . 526
      - 8.3.4.1 Definition der zweidimensionalen Fourier-Transformation . . . . . 526
      - 8.3.4.2 Eigenschaften der zweidimensionalen Fourier-Transformation . . . . . 527
    - 8.3.5 Delta-Funktionen im Zweidimensionalen . . . . . 533
    - 8.3.6 Sprungfunktion im Zweidimensionalen . . . . . 535
    - 8.3.7 Abtastung zweidimensionaler Signale . . . . . 537

|          |                                                                  |            |
|----------|------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.8    | Abtasttheorem für zweidimensionale Signale . . . . .             | 540        |
| 8.3.9    | Die zweidimensionale DFT . . . . .                               | 543        |
| 8.3.9.1  | Praktische Berechnung der 2D-DFT . . . . .                       | 544        |
| 8.3.9.2  | Faltungstheorem der 2D-DFT . . . . .                             | 544        |
| 8.3.9.3  | Bedeutung von Betrag und Phase . . . . .                         | 544        |
| 8.3.9.4  | Beispiele zur zweidimensionalen DFT . . . . .                    | 545        |
| 8.4      | Anwendungsbeispiele zur Systemtheorie und Fourier-Transformation | 554        |
| 8.5      | Bildsignale als stochastische Prozesse . . . . .                 | 562        |
| 8.5.1    | Momente stochastischer Prozesse . . . . .                        | 564        |
| 8.5.2    | Stationarität und Ergodizität . . . . .                          | 568        |
| 8.5.3    | Übertragung stochastischer Prozesse durch LSI-Systeme . .        | 572        |
| 8.6      | Quantisierung . . . . .                                          | 579        |
| 8.6.1    | Optimale Quantisierung . . . . .                                 | 580        |
| 8.6.2    | Quantisierungstheorem . . . . .                                  | 583        |
| 8.6.3    | Modellierung der Quantisierung . . . . .                         | 589        |
| 8.7      | Rauschen digitaler Bildsensoren . . . . .                        | 591        |
| 8.8      | Karhunen-Loève-Transformation . . . . .                          | 595        |
| 8.8.1    | Definition der Karhunen-Loève-Transformation . . . . .           | 596        |
| 8.8.2    | Eigenschaften der Karhunen-Loève-Transformation . . . . .        | 597        |
| 8.8.3    | Anwendungsbeispiele zur Karhunen-Loève-Transformation .          | 601        |
| 8.9      | Literatur . . . . .                                              | 605        |
| <b>9</b> | <b>Neuronale Faltungsnetzwerke</b>                               | <b>607</b> |
| 9.1      | Grundlagen neuronaler Netze . . . . .                            | 610        |
| 9.1.1    | Aufbau einer Neuronenschicht . . . . .                           | 612        |
| 9.1.2    | Faltungsnetze . . . . .                                          | 613        |
| 9.1.2.1  | Poolingschichten . . . . .                                       | 614        |
| 9.1.2.2  | Faltungsschichten . . . . .                                      | 615        |
| 9.1.2.3  | Randbehandlung bei Faltungsschichten . . . . .                   | 617        |
| 9.1.2.4  | Schichten zur Erhöhung der örtlichen Auflösung . .               | 619        |
| 9.2      | Lernen der Netzwerkparameter . . . . .                           | 620        |
| 9.2.1    | Lernverfahren . . . . .                                          | 620        |
| 9.2.2    | Batch-Normalisierung . . . . .                                   | 622        |
| 9.2.3    | Trainingsdaten . . . . .                                         | 623        |
| 9.2.3.1  | Augmentierung von Trainingsdaten . . . . .                       | 624        |
| 9.2.3.2  | Generierung synthetischer Trainingsdaten . . . . .               | 625        |
| 9.2.3.3  | Transferlernen . . . . .                                         | 625        |
| 9.2.3.4  | Bewertung von Trainingsdaten und Erklärbarkeit . .               | 626        |
| 9.3      | Netzwerkarchitekturen für die Bildverarbeitung . . . . .         | 627        |

- 9.3.1 Tiefe Faltungsnetze zur Bildklassifikation . . . . . 627
  - 9.3.2 Residuale neuronale Netze . . . . . 628
  - 9.3.3 Encoder-/Decoder-Architekturen . . . . . 629
  - 9.3.4 U-Net-Architekturen für pixelweise Operationen . . . . . 630
  - 9.3.5 Diffusionsmodelle . . . . . 631
- 9.4 Literatur . . . . . 633
- 10 Vorverarbeitung und Bildverbesserung . . . . . 639**
  - 10.1 Einfache Bildverbesserungsmaßnahmen . . . . . 641
    - 10.1.1 Kontrasterhöhung durch Histogrammspreizung . . . . . 641
    - 10.1.2 Histogrammanipulation . . . . . 643
    - 10.1.3 Pseudo- und Falschfarbendarstellung . . . . . 647
      - 10.1.3.1 Pseudofarbendarstellung . . . . . 647
      - 10.1.3.2 Falschfarbendarstellung . . . . . 648
    - 10.1.4 Bildverschärfung . . . . . 650
  - 10.2 Verminderung systematischer Störeinflüsse . . . . . 651
    - 10.2.1 Geometrische Entzerrung . . . . . 651
      - 10.2.1.1 Bilineare Interpolation . . . . . 654
      - 10.2.1.2 Systemtheoretische Deutung der Interpolation . . . 655
    - 10.2.2 Ausgleich von Inhomogenitäten . . . . . 657
      - 10.2.2.1 Signalmodell . . . . . 657
      - 10.2.2.2 Homogenität . . . . . 658
      - 10.2.2.3 Homomorphe Filterung . . . . . 660
      - 10.2.2.4 Homogenisierung . . . . . 662
  - 10.3 Verminderung zufälliger Störungen . . . . . 670
    - 10.3.1 Lineare Filter . . . . . 671
      - 10.3.1.1 Tiefpassfilter zur Störungsunterdrückung . . . . . 677
      - 10.3.1.2 Gleitende Mittelung . . . . . 677
      - 10.3.1.3 Kegel-Tiefpass . . . . . 681
      - 10.3.1.4 Gauß-Tiefpass . . . . . 681
      - 10.3.1.5 Idealer Tiefpass . . . . . 687
      - 10.3.1.6 Erzeugung von Hochpässen, Bandsperren und  
Bandpässen aus gegebenem Tiefpass . . . . . 688
      - 10.3.1.7 Exkurs: Z-Transformation . . . . . 688
    - 10.3.2 Störungsunterdrückung mit nichtlinearen Filtern . . . . . 692
      - 10.3.2.1 Medianfilter . . . . . 693
      - 10.3.2.2 Filter auf Basis von Ordnungsstatistiken . . . . . 698
      - 10.3.2.3 Bilateralfilter . . . . . 698
    - 10.3.3 Störungsunterdrückung mit neuronalen Faltungsnetzen . . . 701
  - 10.4 Registrierung . . . . . 705

- 10.5 Literatur . . . . . 706
- 11 Bildrestauration 709**
  - 11.1 Signalmodell . . . . . 711
  - 11.2 Inverses Filter . . . . . 716
  - 11.3 Wiener-Filter . . . . . 722
  - 11.4 Geometrisches Mittelwertfilter . . . . . 729
  - 11.5 Optimales Constraint-Filter . . . . . 731
  - 11.6 Restaurationsprobleme in Matrixnotation . . . . . 734
  - 11.7 Restauration bei partizipierenden Medien . . . . . 738
  - 11.8 Ortsvariante Bildrestauration . . . . . 742
  - 11.9 Literatur . . . . . 744
- 12 Segmentierung 745**
  - 12.1 Bereichsorientierte Segmentierung . . . . . 748
    - 12.1.1 Segmentierung durch merkmalsbasierte Klassifikation . . . . 748
    - 12.1.2 Bereichswachstumsverfahren . . . . . 755
  - 12.2 Kantenorientierte Verfahren . . . . . 756
    - 12.2.1 Gradientenfilter . . . . . 758
      - 12.2.1.1 Konstruktion symmetrischer linearer Ableitungsfilter 760
      - 12.2.1.2 Differentiation mittels DFT . . . . . 763
      - 12.2.1.3 Differenzierter Gauß-Tiefpass . . . . . 765
      - 12.2.1.4 Einfache Kantenoperatoren . . . . . 767
    - 12.2.2 Kantendetektion mit Hilfe der zweiten Ableitung . . . . . 768
    - 12.2.3 Wasserscheidentransformation . . . . . 774
  - 12.3 Diffusionsfilter . . . . . 775
    - 12.3.1 Lineare, homogene, isotrope Bilddiffusion . . . . . 777
    - 12.3.2 Lineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion . . . . . 778
    - 12.3.3 Nichtlineare, inhomogene, isotrope Bilddiffusion . . . . . 778
    - 12.3.4 Nichtlineare, inhomogene, anisotrope Bilddiffusion . . . . . 779
  - 12.4 Aktive Konturen . . . . . 786
    - 12.4.1 Gradient Vector Flow . . . . . 791
    - 12.4.2 Vector Field Convolution . . . . . 793
  - 12.5 Segmentierung nach Mumford und Shah . . . . . 795
  - 12.6 Minimaler Netzwerkschnitt (Graph-Cut-Verfahren) . . . . . 797
  - 12.7 Segmentierung mit neuronalen Faltungsnetzen . . . . . 807
  - 12.8 Literatur . . . . . 808

|           |                                                               |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------|------------|
| <b>13</b> | <b>Morphologische Bildverarbeitung</b>                        | <b>813</b> |
| 13.1      | Binärmorphologie . . . . .                                    | 815        |
| 13.1.1    | Punktmengen und strukturierende Elemente . . . . .            | 815        |
| 13.1.2    | Erosion und Dilatation . . . . .                              | 818        |
| 13.1.2.1  | Dualität von Erosion und Dilatation . . . . .                 | 826        |
| 13.1.3    | Öffnung und Schließung . . . . .                              | 829        |
| 13.1.4    | Randextraktion . . . . .                                      | 832        |
| 13.1.5    | Regionen ausfüllen . . . . .                                  | 833        |
| 13.1.6    | Komponentenmarkierung und Zusammenhangsanalyse . . .          | 834        |
| 13.1.7    | Alles-oder-Nichts-Operator (Hit-or-Miss) . . . . .            | 836        |
| 13.1.7.1  | Verdünnung . . . . .                                          | 837        |
| 13.1.7.2  | Verdickung . . . . .                                          | 840        |
| 13.1.8    | Skelettierung . . . . .                                       | 841        |
| 13.1.9    | Entbartung . . . . .                                          | 843        |
| 13.2      | Grauwertmorphologie . . . . .                                 | 846        |
| 13.2.1    | Punktmenge eines Grauwertbildes . . . . .                     | 846        |
| 13.2.2    | Erosion und Dilatation . . . . .                              | 849        |
| 13.2.3    | Öffnung und Schließung . . . . .                              | 854        |
| 13.2.4    | Kantendetektion . . . . .                                     | 858        |
| 13.3      | Literatur . . . . .                                           | 861        |
| <b>14</b> | <b>Texturanalyse</b>                                          | <b>863</b> |
| 14.1      | Texturtypen . . . . .                                         | 866        |
| 14.1.1    | Struktureller Texturtyp . . . . .                             | 867        |
| 14.1.2    | Strukturell-statistischer Texturtyp . . . . .                 | 868        |
| 14.1.3    | Statistischer Texturtyp . . . . .                             | 869        |
| 14.2      | Sichtprüfungsaufgaben bezüglich Texturen . . . . .            | 870        |
| 14.3      | Modellbasierte Texturanalyse . . . . .                        | 871        |
| 14.3.1    | Analyse struktureller Texturen . . . . .                      | 871        |
| 14.3.2    | Analyse strukturell-statistischer Texturen . . . . .          | 878        |
| 14.3.3    | Autoregressive Modelle zur Analyse statistischer Texturen . . | 881        |
| 14.3.4    | Separation von Linientexturen . . . . .                       | 884        |
| 14.4      | Merkmalsbasierte Texturanalyse . . . . .                      | 890        |
| 14.4.1    | Wichtige statistische Texturmerkmale . . . . .                | 891        |
| 14.4.2    | Grauwertübergangsmatrix . . . . .                             | 893        |
| 14.4.3    | Richtungshistogramm zur Analyse der Anisotropie von Texturen  | 897        |
| 14.4.4    | Laufängenanalyse . . . . .                                    | 898        |
| 14.4.5    | Textur-Energiemaße nach Laws . . . . .                        | 899        |
| 14.4.6    | Local Binary Patterns . . . . .                               | 901        |

14.5 Texturanalyse mit neuronalen Faltungsnetzen . . . . . 903

14.6 Literatur . . . . . 906

**15 Detektion 909**

15.1 Detektion bekannter Objekte mittels linearer Filter . . . . . 912

15.1.1 Unbekannter Hintergrund . . . . . 913

15.1.2 Weißes Rauschen als Hintergrund . . . . . 915

15.1.3 Korreliertes, schwach stationäres Rauschen als Hintergrund . 917

15.1.4 Diskret formuliertes Matched Filter . . . . . 919

15.2 Detektion unbekannter Objekte (Defekte) . . . . . 923

15.3 Geradendetektion . . . . . 924

15.3.1 Die Radon-Transformation . . . . . 925

15.3.1.1 Definition . . . . . 926

15.3.1.2 Das Zentralschnitt-Theorem . . . . . 930

15.3.1.3 Effiziente Berechnung der Radon-Transformation . 932

15.3.2 Detektion geradenhafter Strukturen . . . . . 933

15.3.2.1 Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) . . . . . 933

15.3.2.2 Detektion mittels Korrelationsfilter . . . . . 935

15.3.2.3 Anwendungsbeispiele . . . . . 936

15.3.3 Die Hough-Transformation zur Geradendetektion . . . . . 939

15.4 Kurven- und Strukturdetektion . . . . . 941

15.4.1 Die Hough-Transformation zur Detektion von Kurven . . . . . 941

15.4.2 Die verallgemeinerte Hough-Transformation . . . . . 943

15.4.3 Implicit Shape Models . . . . . 945

15.5 Eckendetektion . . . . . 946

15.6 Literatur . . . . . 950

**16 Bildpyramiden, Wavelet-Transformation und Multiskalenanalyse 953**

16.1 Bildpyramiden . . . . . 955

16.1.1 Gauß-Pyramide . . . . . 958

16.1.2 Laplace-Pyramide . . . . . 958

16.1.3 Pyramid-Linking . . . . . 960

16.2 Wavelets . . . . . 961

16.2.1 Kontinuierliche Wavelet-Transformation . . . . . 962

16.2.2 Diskretisierung der Wavelet-Transformation . . . . . 965

16.3 Multiskalenanalyse . . . . . 967

16.4 Die schnelle Wavelet-Transformation . . . . . 974

16.5 Die zweidimensionale Wavelet-Transformation . . . . . 978

16.6 Skaleninvariante Merkmale . . . . . 981

16.7 Literatur . . . . . 987

**III Anhänge 989**

**A Mathematische Grundlagen 991**

A.1 Strahlensatz . . . . . 993

A.2 Inverse Probleme . . . . . 995

A.3 Literatur . . . . . 996

**B Die Fourier-Transformation 997**

B.1 Die eindimensionale Fourier-Transformation . . . . . 999

B.1.1 Definition . . . . . 999

B.1.2 Gesetze . . . . . 1000

B.1.3 Korrespondenzen . . . . . 1001

B.2 Die n-dimensionale Fourier-Transformation . . . . . 1003

B.2.1 Definition . . . . . 1003

B.2.2 Korrespondenzen der zweidimensionalen Fourier-  
Transformation . . . . . 1003

B.3 Die diskrete Fourier-Transformation . . . . . 1004

**Symbolverzeichnis 1007**

**Abkürzungsverzeichnis 1023**

**Index 1027**