

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Crunching Pixels</b>	<b>1</b>
1.1	Programmieren mit Bildern	2
1.2	Bildanalyse und „intelligente“ Verfahren	2
<b>2</b>	<b>Digitale Bilder</b>	<b>5</b>
2.1	Arten von digitalen Bildern	5
2.2	Bildaufnahme	5
2.2.1	Das Modell der Lochkamera	5
2.2.2	Die „dünne“ Linse	8
2.2.3	Übergang zum Digitalbild	9
2.2.4	Bildgröße und Auflösung	11
2.2.5	Bildkoordinaten	12
2.2.6	Pixelwerte	12
2.3	Dateiformate für Bilder	14
2.3.1	Raster- vs. Vektordaten	15
2.3.2	Tagged Image File Format (TIFF)	16
2.3.3	Graphics Interchange Format (GIF)	17
2.3.4	Portable Network Graphics (PNG)	17
2.3.5	JPEG	18
2.3.6	Windows Bitmap (BMP)	21
2.3.7	Portable Bitmap Format (PBM)	22
2.3.8	Weitere Dateiformate	22
2.3.9	Bits und Bytes	23
2.4	Aufgaben	25
<b>3</b>	<b>ImageJ</b>	<b>27</b>
3.1	Software für digitale Bilder	27
3.1.1	Software zur Bildbearbeitung	28
3.1.2	Software zur Bildverarbeitung	28
3.2	Eigenschaften von ImageJ	28
3.2.1	Features	29

3.2.2	Fertige Werkzeuge .....	30
3.2.3	ImageJ-Plugins .....	31
3.2.4	Beispiel-Plugin: „inverter“ .....	32
3.3	Weitere Informationen zu ImageJ und Java .....	35
3.3.1	Ressourcen für ImageJ .....	35
3.3.2	Programmieren mit Java .....	35
3.4	Aufgaben .....	36
<b>4</b>	<b>Histogramme .....</b>	<b>37</b>
4.1	Was ist ein Histogramm? .....	37
4.2	Was ist aus Histogrammen abzulesen? .....	39
4.2.1	Belichtung, Kontrast und Dynamik .....	40
4.2.2	Bildfehler .....	42
4.3	Berechnung von Histogrammen .....	44
4.4	Histogramme für Bilder mit mehr als 8 Bit .....	46
4.4.1	Binning .....	47
4.4.2	Beispiel .....	47
4.4.3	Implementierung .....	47
4.5	Histogramme von Farbbildern .....	48
4.5.1	Luminanzhistogramm .....	49
4.5.2	Histogramme der Farbkomponenten .....	49
4.5.3	Kombinierte Farbhistogramme .....	49
4.6	Das kumulative Histogramm .....	51
4.7	Aufgaben .....	51
<b>5</b>	<b>Punktoperationen .....</b>	<b>53</b>
5.1	Änderung der Bildintensität .....	54
5.1.1	Kontrast und Helligkeit .....	54
5.1.2	Beschränkung der Ergebniswerte ( <i>clamping</i> ) .....	54
5.1.3	Automatische Kontrastanpassung .....	55
5.1.4	Invertieren von Bildern .....	57
5.1.5	Schwellwertoperation ( <i>thresholding</i> ) .....	58
5.1.6	Punktoperationen und Histogramme .....	58
5.2	Linearer Histogrammausgleich .....	60
5.2.1	Histogramm-Spezifikation .....	63
5.3	Gammakorrektur .....	64
5.3.1	Warum Gamma? .....	64
5.3.2	Die Gammafunktion .....	64
5.3.3	Reale Gammawerte .....	66
5.3.4	Anwendung der Gammakorrektur .....	66
5.3.5	Implementierung .....	68
5.3.6	Gammafunktion mit Offset .....	68
5.4	Punktoperationen in ImageJ .....	72
5.4.1	Punktoperationen mit Lookup-Tabellen .....	72
5.4.2	Arithmetische Standardoperationen .....	73

5.4.3	Punktoperationen mit mehreren Bildern .....	73
5.4.4	ImageJ-Plugins für mehrere Bilder .....	74
5.5	Aufgaben .....	75
<b>6</b>	<b>Filter .....</b>	<b>79</b>
6.1	Was ist ein Filter? .....	79
6.2	Lineare Filter .....	81
6.2.1	Die Filtermatrix .....	81
6.2.2	Anwendung des Filters .....	82
6.2.3	Berechnung der Filteroperation .....	83
6.2.4	Beispiele für Filter-Plugins .....	84
6.2.5	Ganzzahlige Koeffizienten .....	86
6.2.6	Filter beliebiger Größe .....	88
6.2.7	Arten von linearen Filtern .....	90
6.3	Formale Eigenschaften linearer Filter .....	92
6.3.1	Lineare Faltung .....	92
6.3.2	Eigenschaften der linearen Faltung .....	93
6.3.3	Separierbarkeit von Filtern .....	95
6.3.4	Impulsantwort eines Filters .....	96
6.4	Nichtlineare Filter .....	98
6.4.1	Minimum- und Maximum-Filter .....	99
6.4.2	Medianfilter .....	100
6.4.3	Das gewichtete Medianfilter .....	101
6.4.4	Andere nichtlineare Filter .....	104
6.5	Implementierung von Filtern .....	105
6.5.1	Effizienz von Filterprogrammen .....	105
6.5.2	Behandlung der Bildränder .....	105
6.6	Filteroperationen in ImageJ .....	106
6.6.1	Lineare Filter .....	106
6.6.2	Gauß-Filter .....	107
6.6.3	Nichtlineare Filter .....	108
6.7	Aufgaben .....	108
<b>7</b>	<b>Kanten und Konturen .....</b>	<b>111</b>
7.1	Wie entsteht eine Kante? .....	111
7.2	Gradienten-basierte Kantendetektion .....	112
7.2.1	Partielle Ableitung und Gradient .....	113
7.2.2	Ableitungsfilter .....	114
7.3	Filter zur Kantendetektion .....	114
7.3.1	Prewitt- und Sobel-Operator .....	116
7.3.2	Roberts-Operator .....	118
7.3.3	Kompass-Operatoren .....	118
7.3.4	Kantenoperatoren in ImageJ .....	120
7.4	Weitere Kantenoperatoren .....	120
7.4.1	Kantendetektion mit zweiten Ableitungen .....	120

7.4.2	Kanten auf verschiedenen Skalenebenen	121
7.4.3	Canny-Filter	121
7.5	Von Kanten zu Konturen	122
7.5.1	Konturen verfolgen	122
7.5.2	Kantenbilder	122
7.6	Kantenschärfung	125
7.6.1	Kantenschärfung mit dem Laplace-Filter	125
7.6.2	Unschärfe Maskierung ( <i>unsharp masking</i> )	128
7.7	Aufgaben	133
8	<b>Auffinden von Eckpunkten</b>	135
8.1	„Points of interest“	135
8.2	Harris-Detektor	136
8.2.1	Lokale Strukturmatrix	136
8.2.2	<i>Corner Response Function</i> (CRF)	137
8.2.3	Bestimmung der Eckpunkte	138
8.2.4	Beispiele	138
8.3	Implementierung	138
8.3.1	Schritt 1 – Berechnung der <i>corner response function</i>	142
8.3.2	Schritt 2 – Bestimmung der Eckpunkte	144
8.3.3	Anzeigen der Eckpunkte	148
8.3.4	Zusammenfassung	149
8.4	Aufgaben	149
9	<b>Detektion einfacher Kurven</b>	151
9.1	Auffällige Strukturen	151
9.2	Hough-Transformation	152
9.2.1	Parameterraum	154
9.2.2	Akkumulator-Array	155
9.2.3	Eine bessere Geradenparametrisierung	156
9.3	Implementierung der Hough-Transformation	157
9.3.1	Füllen des Akkumulator-Arrays	158
9.3.2	Auswertung des Akkumulator-Arrays	158
9.3.3	Erweiterungen der Hough-Transformation	161
9.4	Hough-Transformation für Kreise und Ellipsen	164
9.4.1	Kreise und Kreisbögen	164
9.4.2	Ellipsen	166
9.5	Aufgaben	167
10	<b>Morphologische Filter</b>	169
10.1	Schrumpfen und wachsen lassen	170
10.1.1	Nachbarschaft von Bildelementen	171
10.2	Morphologische Grundoperationen	172
10.2.1	Das Strukturelement	172
10.2.2	Punktmengen	172

10.2.3	Dilation .....	173
10.2.4	Erosion .....	174
10.2.5	Eigenschaften von Dilation und Erosion .....	174
10.2.6	Design morphologischer Filter .....	176
10.2.7	Anwendungsbeispiel: <i>Outline</i> .....	179
10.3	Zusammengesetzte Operationen .....	180
10.3.1	<i>Opening</i> .....	180
10.3.2	<i>Closing</i> .....	181
10.3.3	Eigenschaften von Opening und Closing .....	181
10.4	Morphologische Filter für Grauwert- und Farbbilder .....	181
10.4.1	Strukturelemente .....	183
10.4.2	Grauwert-Dilation und -Erosion .....	183
10.4.3	Grauwert-Opening und -Closing .....	183
10.5	Implementierung morphologischer Filter .....	189
10.5.1	Binäre Bilder in ImageJ .....	189
10.5.2	Dilation und Erosion .....	189
10.5.3	Opening und Closing .....	190
10.5.4	<i>Outline</i> .....	191
10.5.5	Morphologische Operationen in ImageJ .....	191
10.6	Aufgaben .....	193
<b>11</b>	<b>Regionen in Binärbildern .....</b>	<b>195</b>
11.1	Auffinden von Bildregionen .....	195
11.1.1	Regionenmarkierung durch <i>Flood Filling</i> .....	196
11.1.2	Sequentielle Regionenmarkierung .....	200
11.1.3	Regionenmarkierung – Zusammenfassung .....	206
11.2	Konturen von Regionen .....	206
11.2.1	Äußere und innere Konturen .....	207
11.2.2	Kombinierte Regionenmarkierung und Konturfindung .....	208
11.2.3	Implementierung .....	210
11.2.4	Beispiele .....	213
11.3	Repräsentation von Bildregionen .....	214
11.3.1	Matrix-Repräsentation .....	214
11.3.2	Laufängenkodierung .....	215
11.3.3	<i>Chain Codes</i> .....	217
11.4	Eigenschaften binärer Bildregionen .....	219
11.4.1	Formmerkmale ( <i>Features</i> ) .....	220
11.4.2	Geometrische Eigenschaften .....	220
11.4.3	Statistische Formeigenschaften .....	224
11.4.4	Momentenbasierte geometrische Merkmale .....	226
11.4.5	Projektionen .....	230
11.4.6	Topologische Merkmale .....	231
11.5	Aufgaben .....	232

<b>12 Farbbilder</b>	235
12.1 RGB-Farbbilder	235
12.1.1 Aufbau von Farbbildern	238
12.1.2 Farbbilder in ImageJ	240
12.2 Farbräume und Farbkonversion	252
12.2.1 Umwandlung in Grauwertbilder	252
12.2.2 Desaturierung von Farbbildern	255
12.2.3 HSV/HSB- und HLS-Farbraum	255
12.2.4 TV-Komponentenfarbräume – YUV, YIQ und $YC_bC_r$	268
12.2.5 Farbräume für den Druck – CMY und CMYK	273
12.3 Colorimetrische Farbräume	276
12.3.1 CIE-Farbräume	277
12.3.2 CIE $L^*a^*b^*$	282
12.3.3 sRGB	285
12.3.4 Adobe RGB	288
12.3.5 Farben und Farbräume in Java	289
12.4 Statistiken von Farbbildern	295
12.4.1 Wie viele Farben enthält ein Bild?	295
12.4.2 Histogramme	295
12.5 Farbquantisierung	297
12.5.1 Skalare Farbquantisierung	300
12.5.2 Vektorquantisierung	300
12.6 Aufgaben	305
<b>13 Einführung in Spektraltechniken</b>	309
13.1 Die Fouriertransformation	310
13.1.1 Sinus- und Kosinusfunktionen	310
13.1.2 Fourierreihen als Darstellung periodischer Funktionen	314
13.1.3 Fourierintegral und Fourierspektrum	314
13.1.4 Die Fouriertransformation	315
13.1.5 Fourier-Transformationspaare	316
13.1.6 Wichtige Eigenschaften der Fouriertransformation	317
13.2 Übergang zu diskreten Daten	321
13.2.1 Abtastung	321
13.2.2 Diskrete und periodische Funktionen	327
13.3 Die diskrete Fouriertransformation (DFT)	329
13.3.1 Definition der DFT	329
13.3.2 Diskrete Basisfunktionen	330
13.3.3 Schon wieder Aliasing!	331
13.3.4 Einheiten im Orts- und Spektralraum	335
13.3.5 Das Leistungsspektrum	336
13.4 Implementierung der DFT	337
13.4.1 Direkte Implementierung	337
13.4.2 Fast Fourier Transform (FFT)	337
13.5 Aufgaben	339

<b>14 Die diskrete Fouriertransformation in 2D</b>	341
14.1 Definition der 2D-DFT	341
14.1.1 2D-Basisfunktionen	342
14.1.2 Implementierung der zweidimensionalen DFT	342
14.2 Darstellung der Fouriertransformierten in 2D	343
14.2.1 Wertebereich	346
14.2.2 Zentrierte Darstellung	346
14.3 Frequenzen und Orientierung in 2D	346
14.3.1 Effektive Frequenz	348
14.3.2 Frequenzlimits und Aliasing in 2D	348
14.3.3 Orientierung	349
14.3.4 Geometrische Korrektur des 2D-Spektrums	350
14.3.5 Auswirkungen der Periodizität	350
14.3.6 <i>Windowing</i>	351
14.3.7 Fensterfunktionen	353
14.4 Beispiele für Fouriertransformierte in 2D	358
14.5 Anwendungen der DFT	362
14.5.1 Lineare Filteroperationen im Spektralraum	362
14.5.2 Lineare Faltung und Korrelation	363
14.5.3 Inverse Filter	364
14.6 Aufgaben	364
<b>15 Die diskrete Kosinustransformation (DCT)</b>	367
15.1 Eindimensionale DCT	367
15.1.1 Basisfunktionen der DCT	368
15.1.2 Implementierung der eindimensionalen DCT	368
15.2 Zweidimensionale DCT	371
15.2.1 Separierbarkeit	371
15.2.2 Beispiele	372
15.3 Andere Spektraltransformationen	372
15.4 Aufgaben	372
<b>16 Geometrische Bildoperationen</b>	375
16.1 Koordinatentransformation in 2D	377
16.1.1 Einfache Abbildungen	377
16.1.2 Homogene Koordinaten	377
16.1.3 Affine Abbildung (Dreipunkt-Abbildung)	378
16.1.4 Projektive Abbildung (Vierpunkt-Abbildung)	380
16.1.5 Bilineare Abbildung	385
16.1.6 Weitere nichtlineare Bildverzerrungen	387
16.1.7 Lokale Transformationen	389
16.2 Resampling	390
16.2.1 <i>Source-to-Target Mapping</i>	391
16.2.2 <i>Target-to-Source Mapping</i>	392
16.3 Interpolation	392

16.3.1	Einfache Interpolationsverfahren	393
16.3.2	Ideale Interpolation	394
16.3.3	Interpolation durch Faltung	397
16.3.4	Kubische Interpolation	398
16.3.5	Interpolation in 2D	399
16.3.6	Aliasing	405
16.4	Java-Implementierung	408
16.4.1	Geometrische Abbildungen	408
16.4.2	Pixel-Interpolation	419
16.4.3	Anwendungsbeispiele	422
16.5	Aufgaben	423
<b>17</b>	<b>Bildvergleich</b>	425
17.1	<i>Template Matching</i> in Intensitätsbildern	426
17.1.1	Abstand zwischen Bildmustern	427
17.1.2	Umgang mit Drehungen und Größenänderungen	434
17.1.3	Implementierung	434
17.2	Vergleich von Binärbildern	437
17.2.1	Direkter Vergleich von Binärbildern	437
17.2.2	Die Distanztransformation	438
17.2.3	<i>Chamfer Matching</i>	441
17.3	Aufgaben	445
<b>A</b>	<b>Mathematische Notation</b>	447
A.1	Häufig verwendete Symbole	447
A.2	Komplexe Zahlen $\mathbb{C}$	449
A.3	Algorithmische Komplexität und $\mathcal{O}$ -Notation	450
<b>B</b>	<b>Java-Notizen</b>	451
B.1	Arithmetik	451
B.1.1	Ganzzahlige Division	451
B.1.2	Modulo-Operator	453
B.1.3	Unsigned Bytes	453
B.1.4	Mathematische Funktionen ( <b>Math</b> -Klasse)	454
B.1.5	Runden	455
B.1.6	Inverse Tangensfunktion	455
B.1.7	<b>Float</b> und <b>Double</b> (Klassen)	455
B.2	Arrays in Java	456
B.2.1	Arrays erzeugen	456
B.2.2	Größe von Arrays	456
B.2.3	Zugriff auf Array-Elemente	457
B.2.4	Zweidimensionale Arrays	457



<b>C</b>	<b>ImageJ-Kurzreferenz</b>	461
C.1	Installation und Setup	461
C.2	ImageJ-API	463
C.2.1	Bilder (Package <code>ij</code> )	463
C.2.2	Bildprozessoren (Package <code>ij.process</code> )	463
C.2.3	Plugins (Packages <code>ij.plugin</code> , <code>ij.plugin.filter</code> )	464
C.2.4	GUI-Klassen (Package <code>ij.gui</code> )	464
C.2.5	Window-Management (Package <code>ij</code> )	464
C.2.6	Utility-Klassen (Package <code>ij</code> )	465
C.2.7	Input-Output (Package <code>ij.io</code> )	465
C.3	Bilder und Bildfolgen erzeugen	465
C.3.1	<code>ImagePlus</code> (Klasse)	465
C.3.2	<code>ImageStack</code> (Klasse)	465
C.3.3	<code>NewImage</code> (Klasse)	466
C.3.4	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	466
C.4	Bildprozessoren erzeugen	466
C.4.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	466
C.4.2	<code>ByteProcessor</code> (Klasse)	467
C.4.3	<code>ColorProcessor</code> (Klasse)	467
C.4.4	<code>FloatProcessor</code> (Klasse)	467
C.4.5	<code>ShortProcessor</code> (Klasse)	468
C.5	Bildparameter	468
C.5.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	468
C.6	Zugriff auf Pixel	468
C.6.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	468
C.7	Konvertieren von Bildern	471
C.7.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	471
C.7.2	<code>ImagePlus</code> , <code>ImageConverter</code> (Klassen)	472
C.8	Histogramme und Bildstatistiken	473
C.8.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	473
C.9	Punktoperationen	473
C.9.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	473
C.9.2	<code>Blitter</code> (Interface)	474
C.10	Filter	475
C.10.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	475
C.11	Geometrische Operationen	475
C.11.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	475
C.12	Grafische Operationen in Bildern	476
C.12.1	<code>ImageProcessor</code> (Klasse)	476
C.13	Bilder darstellen	477
C.13.1	<code>ImagePlus</code> (Klasse)	477
C.14	Operationen auf Bildfolgen (Stacks)	478
C.14.1	<code>ImagePlus</code> (Klasse)	478
C.14.2	<code>ImageStack</code> (Klasse)	478
C.14.3	Stack-Beispiel	479

C.15 <i>Region of Interest</i> (ROI) .....	480
C.15.1 <i>ImageProcessor</i> (Klasse) .....	480
C.15.2 <i>ImageStack</i> (Klasse) .....	484
C.15.3 <i>ImagePlus</i> (Klasse) .....	484
C.15.4 <i>Roi</i> , <i>Line</i> , <i>OvalRoi</i> , <i>PolygonRoi</i> (Klassen) .....	484
C.16 <i>Image Properties</i> .....	485
C.16.1 <i>ImagePlus</i> (Klasse) .....	485
C.17 Interaktion .....	487
C.17.1 <i>IJ</i> (Klasse) .....	487
C.17.2 <i>ImageProcessor</i> (Klasse) .....	487
C.17.3 <i>GenericDialog</i> (Klasse) .....	487
C.18 Plugins .....	489
C.18.1 <i>PlugIn</i> (Interface) .....	489
C.18.2 <i>PlugInFilter</i> (Interface) .....	489
C.18.3 Plugins ausführen – <i>IJ</i> (Klasse) .....	490
C.19 Window-Management .....	491
C.19.1 <i>WindowManager</i> (Klasse) .....	491
C.20 Weitere Funktionen .....	491
C.20.1 <i>ImagePlus</i> (Klasse) .....	491
C.20.2 <i>IJ</i> (Klasse) .....	492
<b>D Source Code</b> .....	495
D.1 Harris Corner Detector .....	496
D.1.1 File <i>Corner.java</i> .....	496
D.1.2 File <i>HarrisCornerDetector.java</i> .....	497
D.1.3 File <i>HarrisCornerPlugin.java</i> .....	502
D.2 Kombinierte Regionenmarkierung-Konturverfolgung .....	504
D.2.1 File <i>ContourTracingPlugin.java</i> .....	504
D.2.2 File <i>Node.java</i> .....	505
D.2.3 File <i>Contour.java</i> .....	505
D.2.4 File <i>OuterContour.java</i> .....	506
D.2.5 File <i>InnerContour.java</i> .....	507
D.2.6 File <i>ContourSet.java</i> .....	507
D.2.7 File <i>ContourTracer.java</i> .....	509
D.2.8 File <i>ContourOverlay.java</i> .....	512
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	515
<b>Sachverzeichnis</b> .....	519