

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
|          | <b>Einleitung</b> .....   | 13 |
|          | <b>Über den Autor</b> .....   | 18 |
| <b>1</b> | <b>Mehr als normales Python: IPython</b> .....                                  | 19 |
| 1.1      | Shell oder Notebook? .....  | 19 |
| 1.1.1    | Die IPython-Shell starten .....   | 20 |
| 1.1.2    | Das Jupyter-Notebook starten .....  | 20 |
| 1.2      | Hilfe und Dokumentation in IPython .....  | 21 |
| 1.2.1    | Mit ? auf die Dokumentation zugreifen .....                                     | 22 |
| 1.2.2    | Mit ?? auf den Quellcode zugreifen .....  | 23 |
| 1.2.3    | Module mit der Tab-Vervollständigung erkunden .....                             | 24 |
| 1.3      | Tastaturkürzel in der IPython-Shell .....                                       | 26 |
| 1.3.1    | Tastaturkürzel zum Navigieren .....   | 27 |
| 1.3.2    | Tastaturkürzel bei der Texteingabe .....  | 27 |
| 1.3.3    | Tastaturkürzel für den Befehlsverlauf .....                                     | 28 |
| 1.3.4    | Sonstige Tastaturkürzel .....   | 29 |
| 1.4      | Magische Befehle in IPython .....   | 29 |
| 1.4.1    | Einfügen von Codeblöcken mit %paste und %cpaste .....                           | 29 |
| 1.4.2    | Externen Code ausführen mit %run .....  | 31 |
| 1.4.3    | Messung der Ausführungszeit von Code mit %timeit .....                          | 31 |
| 1.4.4    | Hilfe für die magischen Funktionen anzeigen mit ?,<br>%magic und %lsmagic ..... | 32 |
| 1.5      | Verlauf der Ein- und Ausgabe .....  | 32 |
| 1.5.1    | Die IPython-Objekte In und Out .....  | 33 |
| 1.5.2    | Der Unterstrich als Abkürzung und vorhergehende Ausgaben .....                  | 34 |
| 1.5.3    | Ausgaben unterdrücken .....   | 34 |
| 1.5.4    | Weitere ähnliche magische Befehle .....   | 35 |
| 1.6      | IPython und Shell-Befehle .....   | 35 |
| 1.6.1    | Kurz vorgestellt: die Shell .....   | 36 |
| 1.6.2    | Shell-Befehle in IPython .....  | 37 |
| 1.6.3    | Werte mit der Shell austauschen .....   | 37 |
| 1.7      | Magische Befehle für die Shell .....  | 38 |
| 1.8      | Fehler und Debugging .....  | 39 |
| 1.8.1    | Exceptions handhaben: %xmode .....  | 39 |
| 1.8.2    | Debugging: Wenn das Lesen von Tracebacks nicht ausreicht .....                  | 41 |
| 1.9      | Profiling und Timing von Code .....   | 44 |
| 1.9.1    | Timing von Codeschnipseln: %timeit und %time .....                              | 45 |
| 1.9.2    | Profiling kompletter Skripte: %prun .....                                       | 46 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 1.9.3  | Zeilenweises Profiling mit %lprun . . . . .                     | 47  |
| 1.9.4  | Profiling des Speicherbedarfs: %memit und %mprun . . . . .      | 48  |
| 1.10   | Weitere IPython-Ressourcen . . . . .                            | 50  |
| 1.10.1 | Quellen im Internet . . . . .                                   | 50  |
| 1.10.2 | Bücher . . . . .  | 50  |
| 2      | <b>Einführung in NumPy</b> . . . . .                            | 51  |
| 2.1    | Die Datentypen in Python. . . . .                               | 52  |
| 2.1.1  | Python-Integers sind mehr als nur ganzzahlige Werte . . . . .   | 53  |
| 2.1.2  | Python-Listen sind mehr als nur einfache Listen. . . . .        | 54  |
| 2.1.3  | Arrays feststehenden Typs in Python . . . . .                   | 56  |
| 2.1.4  | Arrays anhand von Listen erzeugen . . . . .                     | 56  |
| 2.1.5  | Neue Arrays erzeugen . . . . .                                  | 57  |
| 2.1.6  | NumPys Standarddatentypen . . . . .                             | 58  |
| 2.2    | Grundlagen von NumPy-Arrays. . . . .                            | 59  |
| 2.2.1  | Attribute von NumPy-Arrays . . . . .                            | 60  |
| 2.2.2  | Indizierung von Arrays: Zugriff auf einzelne Elemente . . . . . | 61  |
| 2.2.3  | Slicing: Teilmengen eines Arrays auswählen. . . . .             | 62  |
| 2.2.4  | Arrays umformen . . . . .                                       | 65  |
| 2.2.5  | Arrays verketten und aufteilen. . . . .                         | 66  |
| 2.3    | Berechnungen mit NumPy-Arrays: universelle Funktionen . . . . . | 68  |
| 2.3.1  | Langsame Schleifen . . . . .                                    | 68  |
| 2.3.2  | Kurz vorgestellt: UFuncs . . . . .                              | 70  |
| 2.3.3  | NumPys UFuncs im Detail . . . . .                               | 70  |
| 2.3.4  | UFunc-Features für Fortgeschrittene . . . . .                   | 75  |
| 2.3.5  | UFuncs: mehr erfahren . . . . .                                 | 77  |
| 2.4    | Aggregationen: Minimum, Maximum und alles dazwischen . . . . .  | 77  |
| 2.4.1  | Summieren der Werte eines Arrays . . . . .                      | 77  |
| 2.4.2  | Minimum und Maximum . . . . .                                   | 78  |
| 2.4.3  | Beispiel: Durchschnittliche Größe der US-Präsidenten . . . . .  | 80  |
| 2.5    | Berechnungen mit Arrays: Broadcasting. . . . .                  | 82  |
| 2.5.1  | Kurz vorgestellt: Broadcasting . . . . .                        | 82  |
| 2.5.2  | Für das Broadcasting geltende Regeln . . . . .                  | 84  |
| 2.5.3  | Broadcasting in der Praxis . . . . .                            | 87  |
| 2.6    | Vergleiche, Maskierungen und boolesche Logik . . . . .          | 88  |
| 2.6.1  | Beispiel: Regentage zählen. . . . .                             | 89  |
| 2.6.2  | Vergleichsoperatoren als UFuncs . . . . .                       | 90  |
| 2.6.3  | Boolesche Arrays verwenden . . . . .                            | 91  |
| 2.6.4  | Boolesche Arrays als Maskierungen . . . . .                     | 94  |
| 2.7    | Fancy Indexing . . . . .  | 97  |
| 2.7.1  | Fancy Indexing im Detail. . . . .                               | 97  |
| 2.7.2  | Kombinierte Indizierung. . . . .                                | 98  |
| 2.7.3  | Beispiel: Auswahl zufälliger Punkte . . . . .                   | 99  |
| 2.7.4  | Werte per Fancy Indexing modifizieren . . . . .                 | 101 |
| 2.7.5  | Beispiel: Daten gruppieren . . . . .                            | 102 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.8      | Arrays sortieren .....                                      | 104        |
| 2.8.1    | Schnelle Sortierung in NumPy: np.sort und np.argsort.....   | 105        |
| 2.8.2    | Teilsortierungen: Partitionierung .....                     | 107        |
| 2.8.3    | Beispiel: k nächste Nachbarn .....                          | 107        |
| 2.9      | Strukturierte Daten: NumPys strukturierte Arrays.....       | 112        |
| 2.9.1    | Strukturierte Arrays erzeugen .....                         | 113        |
| 2.9.2    | Erweiterte zusammengesetzte Typen .....                     | 114        |
| 2.9.3    | Record-Arrays: strukturierte Arrays mit Pfiff .....         | 115        |
| 2.9.4    | Weiter mit Pandas.....                                      | 115        |
| <b>3</b> | <b>Datenbearbeitung mit Pandas .....</b>                    | <b>117</b> |
| 3.1      | Pandas installieren und verwenden .....                     | 117        |
| 3.2      | Kurz vorgestellt: Pandas-Objekte .....                      | 118        |
| 3.2.1    | Das Pandas-Series-Objekt.....                               | 118        |
| 3.2.2    | Das Pandas-DataFrame-Objekt .....                           | 122        |
| 3.2.3    | Das Pandas-Index-Objekt .....                               | 126        |
| 3.3      | Daten indizieren und auswählen .....                        | 127        |
| 3.3.1    | Series-Daten auswählen .....                                | 127        |
| 3.3.2    | DataFrame-Daten auswählen.....                              | 131        |
| 3.4      | Mit Pandas-Daten arbeiten .....                             | 135        |
| 3.4.1    | UFuncs: Indexerhaltung.....                                 | 136        |
| 3.4.2    | UFuncs: Indexanpassung .....                                | 137        |
| 3.4.3    | UFuncs: Operationen mit DataFrame und Series .....          | 139        |
| 3.5      | Handhabung fehlender Daten .....                            | 140        |
| 3.5.1    | Überlegungen zu fehlenden Daten .....                       | 141        |
| 3.5.2    | Fehlende Daten in Pandas .....                              | 141        |
| 3.5.3    | Mit null-Werten arbeiten .....                              | 145        |
| 3.6      | Hierarchische Indizierung .....                             | 149        |
| 3.6.1    | Mehrfach indizierte Series .....                            | 149        |
| 3.6.2    | Methoden zum Erzeugen eines MultiIndex .....                | 153        |
| 3.6.3    | Indizierung und Slicing eines MultiIndex .....              | 156        |
| 3.6.4    | Multi-Indizes umordnen .....                                | 159        |
| 3.6.5    | Datenaggregationen mit Multi-Indizes .....                  | 162        |
| 3.7      | Datenmengen kombinieren: concat und append .....            | 164        |
| 3.7.1    | Verkettung von NumPy-Arrays .....                           | 165        |
| 3.7.2    | Einfache Verkettungen mit pd.concat .....                   | 165        |
| 3.8      | Datenmengen kombinieren: Merge und Join .....               | 169        |
| 3.8.1    | Relationale Algebra .....                                   | 170        |
| 3.8.2    | Join-Kategorien .....                                       | 170        |
| 3.8.3    | Angabe der zu verknüpfenden Spalten .....                   | 173        |
| 3.8.4    | Mengenarithmetik bei Joins.....                             | 176        |
| 3.8.5    | Konflikte bei Spaltennamen: das Schlüsselwort suffixes..... | 177        |
| 3.8.6    | Beispiel: Daten von US-Bundesstaaten .....                  | 178        |
| 3.9      | Aggregation und Gruppierung .....                           | 183        |
| 3.9.1    | Planetendaten .....   | 183        |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 3.9.2  | Einfache Aggregationen in Pandas .....                                | 184 |
| 3.9.3  | GroupBy: Aufteilen, Anwenden und Kombinieren .....                    | 186 |
| 3.10   | Pivot-Tabellen .....  | 195 |
| 3.10.1 | Gründe für Pivot-Tabellen .....                                       | 195 |
| 3.10.2 | Pivot-Tabellen von Hand erstellen .....                               | 196 |
| 3.10.3 | Die Syntax von Pivot-Tabellen .....                                   | 197 |
| 3.10.4 | Beispiel: Geburtenraten .....   | 199 |
| 3.11   | Vektorisierte String-Operationen .....                                | 204 |
| 3.11.1 | Kurz vorgestellt: String-Operationen in Pandas .....                  | 204 |
| 3.11.2 | Liste der Pandas-Stringmethoden .....                                 | 206 |
| 3.11.3 | Beispiel: Rezeptdatenbank .....                                       | 211 |
| 3.12   | Zeitreihen verwenden .....  | 215 |
| 3.12.1 | Kalenderdaten und Zeiten in Python .....                              | 215 |
| 3.12.2 | Zeitreihen in Pandas: Indizierung durch Zeitangaben .....             | 219 |
| 3.12.3 | Datenstrukturen für Zeitreihen in Pandas .....                        | 220 |
| 3.12.4 | Häufigkeiten und Abstände .....                                       | 222 |
| 3.12.5 | Resampling, zeitliches Verschieben und geglättete Statistik .....     | 224 |
| 3.12.6 | Mehr erfahren .....   | 229 |
| 3.12.7 | Beispiel: Visualisierung von Fahrradzählungen in Seattle .....        | 229 |
| 3.13   | Leistungsstarkes Pandas: eval() und query() .....                     | 236 |
| 3.13.1 | Der Zweck von query() und eval(): zusammengesetzte<br>Ausdrücke ..... | 236 |
| 3.13.2 | Effiziente Operationen mit pandas.eval() .....                        | 237 |
| 3.13.3 | DataFrame.eval() für spaltenweise Operationen .....                   | 239 |
| 3.13.4 | Die DataFrame.query()-Methode .....                                   | 241 |
| 3.13.5 | Performance: Verwendung von eval() und query() .....                  | 242 |
| 3.14   | Weitere Ressourcen .....  | 242 |
| 4      | <b>Visualisierung mit Matplotlib</b> .....                            | 245 |
| 4.1    | Allgemeine Tipps zu Matplotlib .....                                  | 246 |
| 4.1.1  | Matplotlib importieren .....  | 246 |
| 4.1.2  | Stil einstellen .....   | 246 |
| 4.1.3  | show() oder kein show()? – Anzeige von Diagrammen .....               | 246 |
| 4.1.4  | Grafiken als Datei speichern .....                                    | 248 |
| 4.2    | Zwei Seiten derselben Medaille .....                                  | 250 |
| 4.3    | Einfache Liniendiagramme .....  | 251 |
| 4.3.1  | Anpassen des Diagramms: Linienfarben und -stile .....                 | 254 |
| 4.3.2  | Anpassen des Diagramms: Begrenzungen .....                            | 256 |
| 4.3.3  | Diagramme beschriften .....   | 258 |
| 4.4    | Einfache Streudiagramme .....   | 260 |
| 4.4.1  | Streudiagramme mit plt.plot() erstellen .....                         | 260 |
| 4.4.2  | Streudiagramme mit plt.scatter() erstellen .....                      | 263 |
| 4.4.3  | plot kontra scatter: eine Anmerkung zur Effizienz .....               | 265 |
| 4.5    | Visualisierung von Fehlern .....                                      | 265 |
| 4.5.1  | Einfache Fehlerbalken .....   | 265 |
| 4.5.2  | Stetige Fehler .....  | 267 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.6    | Dichtediagramme und Konturdiagramme . . . . .  | 268 |
| 4.6.1  | Visualisierung einer dreidimensionalen Funktion. . . . .                             | 268 |
| 4.7    | Histogramme, Binnings und Dichte . . . . .   | 272 |
| 4.7.1  | Zweidimensionale Histogramme und Binnings . . . . .                                  | 274 |
| 4.8    | Anpassen der Legende. . . . .  | 277 |
| 4.8.1  | Legendenelemente festlegen . . . . .   | 279 |
| 4.8.2  | Legenden mit Punktgrößen . . . . .   | 280 |
| 4.8.3  | Mehrere Legenden . . . . .   | 282 |
| 4.9    | Anpassen von Farbskalen . . . . .  | 283 |
| 4.9.1  | Farbskala anpassen . . . . .   | 284 |
| 4.9.2  | Beispiel: Handgeschriebene Ziffern . . . . .   | 288 |
| 4.10   | Untergeordnete Diagramme. . . . .  | 290 |
| 4.10.1 | plt.axes: Untergeordnete Diagramme von Hand erstellen. . . . .                       | 290 |
| 4.10.2 | plt.subplot: Untergeordnete Diagramme in einem<br>Raster anordnen . . . . .          | 292 |
| 4.10.3 | plt.subplots: Das gesamte Raster gleichzeitig ändern . . . . .                       | 293 |
| 4.10.4 | plt.GridSpec: Kompliziertere Anordnungen . . . . .                                   | 294 |
| 4.11   | Text und Beschriftungen. . . . .   | 296 |
| 4.11.1 | Beispiel: Auswirkungen von Feiertagen auf die<br>Geburtenzahlen in den USA . . . . . | 296 |
| 4.11.2 | Transformationen und Textposition . . . . .  | 299 |
| 4.11.3 | Pfeile und Beschriftungen . . . . .  | 300 |
| 4.12   | Achsenmarkierungen anpassen . . . . .  | 303 |
| 4.12.1 | Vorrangige und nachrangige Achsenmarkierungen . . . . .                              | 304 |
| 4.12.2 | Markierungen oder Beschriftungen verbergen. . . . .                                  | 305 |
| 4.12.3 | Anzahl der Achsenmarkierungen verringern oder erhöhen . . . . .                      | 306 |
| 4.12.4 | Formatierung der Achsenmarkierungen. . . . .   | 307 |
| 4.12.5 | Zusammenfassung der Formatter- und Locator-Klassen. . . . .                          | 310 |
| 4.13   | Matplotlib anpassen: Konfigurationen und Stylesheets . . . . .                       | 311 |
| 4.13.1 | Diagramme von Hand anpassen . . . . .  | 311 |
| 4.13.2 | Voreinstellungen ändern: rcParams . . . . .  | 312 |
| 4.13.3 | Stylesheets . . . . .  | 314 |
| 4.14   | Dreidimensionale Diagramme in Matplotlib. . . . .                                    | 318 |
| 4.14.1 | Dreidimensionale Punkte und Linien . . . . .   | 319 |
| 4.14.2 | Dreidimensionale Konturdiagramme . . . . .   | 320 |
| 4.14.3 | Drahtgitter- und Oberflächendiagramme . . . . .                                      | 322 |
| 4.14.4 | Triangulation von Oberflächen . . . . .  | 323 |
| 4.15   | Basemap: geografische Daten verwenden . . . . .                                      | 326 |
| 4.15.1 | Kartenprojektionen . . . . .   | 328 |
| 4.15.2 | Zeichnen eines Kartenhintergrunds . . . . .  | 332 |
| 4.15.3 | Daten auf einer Karte anzeigen . . . . .   | 334 |
| 4.15.4 | Beispiel: Kalifornische Städte. . . . .  | 335 |
| 4.15.5 | Beispiel: Oberflächentemperaturen. . . . .   | 337 |
| 4.16   | Visualisierung mit Seaborn. . . . .  | 339 |
| 4.16.1 | Seaborn kontra Matplotlib . . . . .  | 339 |
| 4.16.2 | Seaborn-Diagramme. . . . .   | 341 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.17     | Weitere Ressourcen . . . . .                                     | 357        |
| 4.17.1   | Matplotlib . . . . .   | 357        |
| 4.17.2   | Weitere Grafikbibliotheken für Python . . . . .                  | 357        |
| <b>5</b> | <b>Machine Learning</b> . . . . .                                | <b>359</b> |
| 5.1      | Was ist Machine Learning? . . . . .                              | 360        |
| 5.1.1    | Kategorien des Machine Learnings . . . . .                       | 360        |
| 5.1.2    | Qualitative Beispiele für Machine-Learning-Anwendungen . . . . . | 361        |
| 5.1.3    | Zusammenfassung . . . . .  | 369        |
| 5.2      | Kurz vorgestellt: Scikit-Learn . . . . .                         | 369        |
| 5.2.1    | Datenrepräsentierung in Scikit-Learn . . . . .                   | 370        |
| 5.2.2    | Scikit-Learns Schätzer-API . . . . .                             | 372        |
| 5.2.3    | Anwendung: Handgeschriebene Ziffern untersuchen . . . . .        | 380        |
| 5.2.4    | Zusammenfassung . . . . .  | 385        |
| 5.3      | Hyperparameter und Modellvalidierung . . . . .                   | 385        |
| 5.3.1    | Überlegungen zum Thema Modellvalidierung . . . . .               | 385        |
| 5.3.2    | Auswahl des besten Modells . . . . .                             | 389        |
| 5.3.3    | Lernkurven . . . . .   | 396        |
| 5.3.4    | Validierung in der Praxis: Rastersuche . . . . .                 | 399        |
| 5.3.5    | Zusammenfassung . . . . .  | 401        |
| 5.4      | Merkmalerstellung . . . . .                                      | 401        |
| 5.4.1    | Kategoriale Merkmale . . . . .                                   | 402        |
| 5.4.2    | Texte als Merkmale . . . . .                                     | 403        |
| 5.4.3    | Bilder als Merkmale . . . . .                                    | 404        |
| 5.4.4    | Abgeleitete Merkmale . . . . .                                   | 405        |
| 5.4.5    | Vervollständigung fehlender Daten . . . . .                      | 407        |
| 5.4.6    | Pipelines mit Merkmalen . . . . .                                | 408        |
| 5.5      | Ausführlich: Naive Bayes-Klassifikation . . . . .                | 409        |
| 5.5.1    | Bayes-Klassifikation . . . . .                                   | 409        |
| 5.5.2    | Gauß'sche naive Bayes-Klassifikation . . . . .                   | 410        |
| 5.5.3    | Multinomiale naive Bayes-Klassifikation . . . . .                | 413        |
| 5.5.4    | Einsatzgebiete für naive Bayes-Klassifikation . . . . .          | 416        |
| 5.6      | Ausführlich: Lineare Regression . . . . .                        | 417        |
| 5.6.1    | Einfache lineare Regression . . . . .                            | 417        |
| 5.6.2    | Regression der Basisfunktion . . . . .                           | 419        |
| 5.6.3    | Regularisierung . . . . .  | 423        |
| 5.6.4    | Beispiel: Vorhersage des Fahrradverkehrs . . . . .               | 427        |
| 5.7      | Ausführlich: Support Vector Machines . . . . .                   | 432        |
| 5.7.1    | Gründe für Support Vector Machines . . . . .                     | 433        |
| 5.7.2    | Support Vector Machines: Maximierung des Randbereichs . . . . .  | 434        |
| 5.7.3    | Beispiel: Gesichtserkennung . . . . .                            | 443        |
| 5.7.4    | Zusammenfassung Support Vector Machines . . . . .                | 447        |
| 5.8      | Ausführlich: Entscheidungsbäume und Random Forests . . . . .     | 448        |
| 5.8.1    | Gründe für Random Forests . . . . .                              | 448        |
| 5.8.2    | Schätzerensembles: Random Forests . . . . .                      | 454        |
| 5.8.3    | Random-Forest-Regression . . . . .                               | 455        |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 5.8.4  | Beispiel: Random Forest zur Klassifikation<br>handgeschriebener Ziffern . . . . . | 457        |
| 5.8.5  | Zusammenfassung Random Forests . . . . .  | 459        |
| 5.9    | Ausführlich: Hauptkomponentenanalyse . . . . .                                    | 460        |
| 5.9.1  | Kurz vorgestellt: Hauptkomponentenanalyse . . . . .                               | 460        |
| 5.9.2  | Hauptkomponentenanalyse als Rauschfilter . . . . .                                | 467        |
| 5.9.3  | Beispiel: Eigengesichter . . . . .  | 469        |
| 5.9.4  | Zusammenfassung Hauptkomponentenanalyse . . . . .                                 | 472        |
| 5.10   | Ausführlich: Manifold Learning . . . . .  | 473        |
| 5.10.1 | Manifold Learning: »HELLO« . . . . .  | 473        |
| 5.10.2 | Multidimensionale Skalierung (MDS) . . . . .                                      | 475        |
| 5.10.3 | MDS als Manifold Learning . . . . .   | 477        |
| 5.10.4 | Nichtlineare Einbettungen: Wenn MDS nicht funktioniert . . . . .                  | 479        |
| 5.10.5 | Nichtlineare Mannigfaltigkeiten: lokal lineare Einbettung . . . . .               | 480        |
| 5.10.6 | Überlegungen zum Thema Manifold-Methoden . . . . .                                | 482        |
| 5.10.7 | Beispiel: Isomap und Gesichter . . . . .  | 483        |
| 5.10.8 | Beispiel: Visualisierung der Strukturen in Zifferndaten . . . . .                 | 487        |
| 5.11   | Ausführlich: k-Means-Clustering . . . . .   | 490        |
| 5.11.1 | Kurz vorgestellt: der k-Means-Algorithmus . . . . .                               | 490        |
| 5.11.2 | k-Means-Algorithmus: Expectation-Maximization . . . . .                           | 492        |
| 5.11.3 | Beispiele . . . . .   | 497        |
| 5.12   | Ausführlich: Gauß'sche Mixture-Modelle . . . . .                                  | 503        |
| 5.12.1 | Gründe für GMM: Schwächen von k-Means . . . . .                                   | 503        |
| 5.12.2 | EM-Verallgemeinerung: Gauß'sche Mixture-Modelle . . . . .                         | 507        |
| 5.12.3 | GMM als Dichteschätzung . . . . .   | 511        |
| 5.12.4 | Beispiel: GMM zum Erzeugen neuer Daten verwenden . . . . .                        | 515        |
| 5.13   | Ausführlich: Kerndichteschätzung . . . . .  | 518        |
| 5.13.1 | Gründe für Kerndichteschätzung: Histogramme . . . . .                             | 518        |
| 5.13.2 | Kerndichteschätzung in der Praxis . . . . .                                       | 522        |
| 5.13.3 | Beispiel: Kerndichteschätzung auf Kugeloberflächen . . . . .                      | 524        |
| 5.13.4 | Beispiel: Nicht ganz so naive Bayes-Klassifikation . . . . .                      | 527        |
| 5.14   | Anwendung: Eine Gesichtserkennungs-Pipeline . . . . .                             | 532        |
| 5.14.1 | HOG-Merkmale . . . . .  | 533        |
| 5.14.2 | HOG in Aktion: eine einfache Gesichtserkennung . . . . .                          | 534        |
| 5.14.3 | Vorbehalte und Verbesserungen . . . . .   | 539        |
| 5.15   | Weitere Machine-Learning-Ressourcen . . . . .                                     | 541        |
| 5.15.1 | Machine Learning in Python . . . . .  | 541        |
| 5.15.2 | Machine Learning im Allgemeinen . . . . .   | 541        |
|        | <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>   | <b>543</b> |