

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Erste Schritte</b>	<b>1</b>
1.1	Vorstellung . . . . .	1
1.1.1	Pro und Contra R . . . . .	1
1.1.2	Typografische Konventionen . . . . .	3
1.1.3	R installieren . . . . .	3
1.1.4	Grafische Benutzeroberflächen . . . . .	4
1.1.5	Weiterführende Informationsquellen und Literatur . . . . .	5
1.2	Grundlegende Elemente . . . . .	6
1.2.1	R Starten, beenden und die Konsole verwenden . . . . .	6
1.2.2	Einstellungen . . . . .	10
1.2.3	Umgang mit dem workspace . . . . .	11
1.2.4	Einfache Arithmetik . . . . .	13
1.2.5	Funktionen mit Argumenten aufrufen . . . . .	15
1.2.6	Hilfe-Funktionen . . . . .	16
1.2.7	Zusatzpakete verwenden . . . . .	16
1.2.8	Empfehlungen und typische Fehlerquellen . . . . .	18
1.3	Datenstrukturen: Klassen, Objekte, Datentypen . . . . .	19
1.3.1	Objekte benennen . . . . .	20
1.3.2	Zuweisungen an Objekte . . . . .	21
1.3.3	Objekte ausgeben . . . . .	21
1.3.4	Objekte anzeigen lassen, umbenennen und entfernen . . . . .	22
1.3.5	Datentypen . . . . .	23
1.3.6	Logische Werte, Operatoren und Verknüpfungen . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Elementare Dateneingabe und -verarbeitung</b>	<b>27</b>
2.1	Vektoren . . . . .	27
2.1.1	Vektoren erzeugen . . . . .	27
2.1.2	Elemente auswählen und verändern . . . . .	28
2.1.3	Datentypen in Vektoren . . . . .	31
2.1.4	Elemente benennen . . . . .	31
2.1.5	Elemente löschen . . . . .	32
2.2	Logische Operatoren . . . . .	32
2.2.1	Vektoren mit logischen Operatoren vergleichen . . . . .	33
2.2.2	Logische Indexvektoren . . . . .	35
2.3	Mengen . . . . .	37
2.3.1	Doppelt auftretende Werte finden . . . . .	37
2.3.2	Mengenoperationen . . . . .	37
2.3.3	Kombinatorik . . . . .	39

2.4	Systematische und zufällige Wertefolgen erzeugen . . . . .	41
2.4.1	Numerische Sequenzen erstellen . . . . .	42
2.4.2	Wertefolgen wiederholen . . . . .	43
2.4.3	Zufällig aus einer Urne ziehen . . . . .	43
2.4.4	Zufallszahlen aus bestimmten Verteilungen erzeugen . . . . .	44
2.5	Daten transformieren . . . . .	45
2.5.1	Werte sortieren . . . . .	45
2.5.2	Werte in zufällige Reihenfolge bringen . . . . .	46
2.5.3	Teilmengen von Daten auswählen . . . . .	47
2.5.4	Daten umrechnen . . . . .	48
2.5.5	Neue aus bestehenden Variablen bilden . . . . .	51
2.5.6	Werte ersetzen oder recodieren . . . . .	51
2.5.7	Kontinuierliche Variablen in Kategorien einteilen . . . . .	53
2.6	Gruppierungsfaktoren . . . . .	54
2.6.1	Ungeordnete Faktoren . . . . .	54
2.6.2	Faktoren kombinieren . . . . .	56
2.6.3	Faktorstufen nachträglich ändern . . . . .	57
2.6.4	Geordnete Faktoren . . . . .	59
2.6.5	Reihenfolge von Faktorstufen bestimmen . . . . .	59
2.6.6	Faktoren nach Muster erstellen . . . . .	61
2.6.7	Quantitative in kategoriale Variablen umwandeln . . . . .	62
2.7	Deskriptive Kennwerte numerischer Daten . . . . .	63
2.7.1	Summen, Differenzen und Produkte . . . . .	63
2.7.2	Extremwerte . . . . .	64
2.7.3	Mittelwert, Median und Modalwert . . . . .	65
2.7.4	Robuste Maße der zentralen Tendenz . . . . .	67
2.7.5	Prozentrang, Quartile und Quantile . . . . .	68
2.7.6	Varianz, Streuung, Schiefe und Wölbung . . . . .	69
2.7.7	Diversität kategorialer Daten . . . . .	70
2.7.8	Kovarianz und Korrelation . . . . .	70
2.7.9	Robuste Streuungsmaße und Kovarianzschätzer . . . . .	72
2.7.10	Kennwerte getrennt nach Gruppen berechnen . . . . .	73
2.7.11	Funktionen auf geordnete Paare von Werten anwenden . . . . .	75
2.8	Matrizen . . . . .	75
2.8.1	Datentypen in Matrizen . . . . .	76
2.8.2	Dimensionierung, Zeilen und Spalten . . . . .	76
2.8.3	Elemente auswählen und verändern . . . . .	78
2.8.4	Weitere Wege, Elemente auszuwählen und zu verändern . . . . .	80
2.8.5	Matrizen verbinden . . . . .	81
2.8.6	Matrizen sortieren . . . . .	82
2.8.7	Randkennwerte berechnen . . . . .	83
2.8.8	Beliebige Funktionen auf Matrizen anwenden . . . . .	83
2.8.9	Matrix zeilen- oder spaltenweise mit Kennwerten verrechnen . . . . .	84
2.8.10	Kovarianz- und Korrelationsmatrizen . . . . .	85
2.9	Arrays . . . . .	86
2.10	Häufigkeitsauszählungen . . . . .	88
2.10.1	Einfache Tabellen absoluter und relativer Häufigkeiten . . . . .	88

2.10.2 Iterationen zählen . . . . .	90
2.10.3 Absolute, relative und bedingte relative Häufigkeiten in Kreuztabellen . . . . .	90
2.10.4 Randkennwerte von Kreuztabellen . . . . .	94
2.10.5 Datensätze aus Häufigkeitstabellen erstellen . . . . .	94
2.10.6 Kumulierte relative Häufigkeiten und Prozentrang . . . . .	95
2.11 Fehlende Werte behandeln . . . . .	96
2.11.1 Fehlende Werte codieren und identifizieren . . . . .	97
2.11.2 Fehlende Werte ersetzen und umcodieren . . . . .	98
2.11.3 Behandlung fehlender Werte bei der Berechnung einfacher Kennwerte . . . . .	99
2.11.4 Behandlung fehlender Werte in Matrizen . . . . .	100
2.11.5 Behandlung fehlender Werte beim Sortieren von Daten . . . . .	102
2.11.6 Behandlung fehlender Werte in inferenzstatistischen Tests . . . . .	102
2.11.7 Multiple Imputation . . . . .	103
2.12 Zeichenketten verarbeiten . . . . .	103
2.12.1 Objekte in Zeichenketten umwandeln . . . . .	103
2.12.2 Zeichenketten erstellen und ausgeben . . . . .	104
2.12.3 Zeichenketten manipulieren . . . . .	107
2.12.4 Zeichenfolgen finden . . . . .	108
2.12.5 Zeichenfolgen extrahieren . . . . .	109
2.12.6 Zeichenfolgen ersetzen . . . . .	110
2.12.7 Zeichenketten als Befehl ausführen . . . . .	111
2.13 Datum und Uhrzeit . . . . .	112
2.13.1 Datumsangaben erstellen und formatieren . . . . .	112
2.13.2 Uhrzeit . . . . .	113
2.13.3 Mit Datum und Uhrzeit rechnen . . . . .	115
<b>3 Datensätze</b> . . . . .	<b>117</b>
3.1 Listen . . . . .	117
3.1.1 Komponenten auswählen und verändern . . . . .	118
3.1.2 Komponenten hinzufügen und entfernen . . . . .	120
3.1.3 Listen mit mehreren Ebenen . . . . .	121
3.2 Datensätze . . . . .	122
3.2.1 Datentypen in Datensätzen . . . . .	124
3.2.2 Elemente auswählen und verändern . . . . .	125
3.2.3 Namen von Variablen und Beobachtungen . . . . .	127
3.2.4 Datensätze in den Suchpfad einfügen . . . . .	128
3.3 Datensätze transformieren . . . . .	129
3.3.1 Variablen hinzufügen und entfernen . . . . .	130
3.3.2 Datensätze sortieren . . . . .	131
3.3.3 Teilmengen von Daten mit <code>subset()</code> auswählen . . . . .	132
3.3.4 Doppelte und fehlende Werte behandeln . . . . .	135
3.3.5 Datensätze teilen . . . . .	136
3.3.6 Datensätze zeilen- oder spaltenweise verbinden . . . . .	137
3.3.7 Datensätze mit <code>merge()</code> zusammenführen . . . . .	138
3.3.8 Organisationsform einfacher Datensätze ändern . . . . .	141
3.3.9 Organisationsform komplexer Datensätze ändern . . . . .	143

## *Inhaltsverzeichnis*

<b>3.4</b>	<b>Daten aggregieren</b>	<b>147</b>
3.4.1	Funktionen auf Variablen anwenden	147
3.4.2	Funktionen für mehrere Variablen anwenden	150
3.4.3	Funktionen getrennt nach Gruppen anwenden	151
<b>4</b>	<b>Befehle und Daten verwalten</b>	<b>153</b>
4.1	Befehlssequenzen im Editor bearbeiten	153
4.2	Daten importieren und exportieren	154
4.2.1	Daten im Editor eingeben	155
4.2.2	Datentabellen im Textformat	155
4.2.3	R-Objekte	158
4.2.4	Daten mit anderen Programmen austauschen	158
4.2.5	Daten in der Konsole einlesen	165
4.2.6	Unstrukturierte Textdateien	165
4.2.7	Datenqualität sicherstellen	166
4.3	Dateien verwalten	167
4.3.1	Dateien auswählen	167
4.3.2	Dateipfade manipulieren	168
4.3.3	Dateien verändern	169
<b>5</b>	<b>Hilfsmittel für die Inferenzstatistik</b>	<b>171</b>
5.1	Wichtige Begriffe inferenzstatistischer Tests	171
5.2	Lineare Modelle formulieren	172
5.3	Funktionen von Zufallsvariablen	174
5.3.1	Dichtefunktion	175
5.3.2	Verteilungsfunktion	176
5.3.3	Quantilfunktion	177
<b>6</b>	<b>Lineare Regression</b>	<b>179</b>
6.1	Test auf Korrelation	179
6.2	Einfache lineare Regression	180
6.2.1	Deskriptive Modellanpassung	181
6.2.2	Regressionsanalyse	183
6.3	Multiple lineare Regression	186
6.3.1	Deskriptive Modellanpassung und Regressionsanalyse	186
6.3.2	Modell verändern	188
6.3.3	Modelle vergleichen und auswählen	189
6.3.4	Moderierte Regression	191
6.4	Regressionsmodelle auf andere Daten anwenden	194
6.5	Regressionsdiagnostik	195
6.5.1	Extremwerte, Ausreißer und Einfluss	196
6.5.2	Verteilungseigenschaften der Residuen	199
6.5.3	Multikollinearität	201
6.6	Erweiterungen der linearen Regression	203
6.6.1	Robuste Regression	203
6.6.2	Penalisierte Regression	204
6.6.3	Nichtlineare Zusammenhänge	207

6.6.4	Abhängige Fehler bei Messwiederholung oder Clusterung . . . . .	208
6.7	Partialkorrelation und Semipartialkorrelation . . . . .	208
<b>7</b>	<b>t-Tests und Varianzanalysen</b>	<b>212</b>
7.1	Tests auf Varianzhomogenität . . . . .	212
7.1.1	<i>F</i> -Test auf Varianzhomogenität für zwei Stichproben . . . . .	212
7.1.2	Levene-Test für mehr als zwei Stichproben . . . . .	213
7.1.3	Fligner-Killeen-Test für mehr als zwei Stichproben . . . . .	214
7.2	<i>t</i> -Tests . . . . .	215
7.2.1	<i>t</i> -Test für eine Stichprobe . . . . .	215
7.2.2	<i>t</i> -Test für zwei unabhängige Stichproben . . . . .	217
7.2.3	<i>t</i> -Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	219
7.3	Einfaktorielle Varianzanalyse (CR- <i>p</i> ) . . . . .	220
7.3.1	Auswertung mit <i>oneway.test()</i> . . . . .	220
7.3.2	Auswertung mit <i>aov()</i> . . . . .	221
7.3.3	Auswertung mit <i>anova()</i> . . . . .	223
7.3.4	Effektstärke schätzen . . . . .	223
7.3.5	Voraussetzungen grafisch prüfen . . . . .	224
7.3.6	Einzelvergleiche (Kontraste) . . . . .	225
7.4	Einfaktorielle Varianzanalyse mit abhängigen Gruppen (RB- <i>p</i> ) . . . . .	231
7.4.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen . . . . .	232
7.4.2	Zirkularität der Kovarianzmatrix prüfen . . . . .	235
7.4.3	Multivariat formuliert auswerten mit <i>Anova()</i> . . . . .	237
7.4.4	Multivariat formuliert auswerten mit <i>anova()</i> . . . . .	238
7.4.5	Einzelvergleiche und alternative Auswertungsmöglichkeiten . . . . .	239
7.5	Zweifaktorielle Varianzanalyse (CRF- <i>pq</i> ) . . . . .	239
7.5.1	Auswertung und Schätzung der Effektstärke . . . . .	240
7.5.2	Quadratsummen vom Typ I, II und III . . . . .	242
7.5.3	Bedingte Haupteffekte testen . . . . .	246
7.5.4	Beliebige a-priori Kontraste . . . . .	249
7.5.5	Beliebige post-hoc Kontraste nach Scheffé . . . . .	252
7.5.6	Marginale Paarvergleiche nach Tukey . . . . .	253
7.6	Zweifaktorielle Varianzanalyse mit zwei Intra-Gruppen Faktoren (RBF- <i>pq</i> ) . . . . .	254
7.6.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen . . . . .	254
7.6.2	Zirkularität der Kovarianzmatrizen prüfen . . . . .	258
7.6.3	Multivariat formuliert auswerten . . . . .	259
7.6.4	Einzelvergleiche (Kontraste) . . . . .	260
7.7	Zweifaktorielle Varianzanalyse mit Split-Plot-Design (SPF- <i>p · q</i> ) . . . . .	261
7.7.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen . . . . .	261
7.7.2	Voraussetzungen und Prüfen der Zirkularität . . . . .	264
7.7.3	Multivariat formuliert auswerten . . . . .	265
7.7.4	Einzelvergleiche (Kontraste) . . . . .	266
7.7.5	Erweiterung auf dreifaktorielles SPF- <i>p · qr</i> Design . . . . .	267
7.7.6	Erweiterung auf dreifaktorielles SPF- <i>pq · r</i> Design . . . . .	269
7.8	Kovarianzanalyse . . . . .	270
7.8.1	Test der Effekte von Gruppenzugehörigkeit und Kovariate . . . . .	270
7.8.2	Beliebige a-priori Kontraste . . . . .	276

7.8.3	Beliebige post-hoc Kontraste nach Scheffé . . . . .	277
7.9	Power, Effektstärke und notwendige Stichprobengröße . . . . .	278
7.9.1	Binomialtest . . . . .	278
7.9.2	<i>t</i> -Test . . . . .	280
7.9.3	Einfaktorielle Varianzanalyse . . . . .	283
<b>8</b>	<b>Regressionsmodelle für kategoriale Daten und Zähldaten</b>	<b>287</b>
8.1	Logistische Regression . . . . .	288
8.1.1	Modell für dichotome Daten anpassen . . . . .	288
8.1.2	Modell für binomiale Daten anpassen . . . . .	290
8.1.3	Anpassungsgüte . . . . .	291
8.1.4	Vorhersage, Klassifikation und Anwendung auf neue Daten . . . . .	293
8.1.5	Signifikanztests für Parameter und Modell . . . . .	295
8.1.6	Andere Link-Funktionen . . . . .	297
8.1.7	Mögliche Probleme bei der Modellanpassung . . . . .	297
8.2	Ordinale Regression . . . . .	298
8.2.1	Modellanpassung . . . . .	299
8.2.2	Anpassungsgüte . . . . .	300
8.2.3	Signifikanztests für Parameter und Modell . . . . .	301
8.2.4	Vorhersage, Klassifikation und Anwendung auf neue Daten . . . . .	303
8.3	Multinomiale Regression . . . . .	304
8.3.1	Modellanpassung . . . . .	305
8.3.2	Anpassungsgüte . . . . .	306
8.3.3	Signifikanztests für Parameter und Modell . . . . .	307
8.3.4	Vorhersage, Klassifikation und Anwendung auf neue Daten . . . . .	308
8.4	Regression für Zähldaten . . . . .	309
8.4.1	Poisson-Regression . . . . .	309
8.4.2	Ereignisraten analysieren . . . . .	311
8.4.3	Adjustierte Poisson-Regression und negative Binomial-Regression . . . . .	312
8.4.4	Zero-inflated Poisson-Regression . . . . .	314
8.4.5	Zero-truncated Poisson-Regression . . . . .	317
8.5	Log-lineare Modelle . . . . .	317
8.5.1	Modell . . . . .	317
8.5.2	Modellanpassung . . . . .	319
<b>9</b>	<b>Survival-Analyse</b>	<b>324</b>
9.1	Verteilung von Ereigniszeiten . . . . .	324
9.2	Zensierte und gestutzte Ereigniszeiten . . . . .	325
9.2.1	Zeitlich konstante Prädiktoren . . . . .	326
9.2.2	Daten in Zählprozess-Darstellung . . . . .	328
9.3	Kaplan-Meier-Analyse . . . . .	331
9.3.1	Survival-Funktion und kumulatives hazard schätzen . . . . .	331
9.3.2	Log-Rank-Test auf gleiche Survival-Funktionen . . . . .	333
9.4	Cox proportional hazards Modell . . . . .	334
9.4.1	Anpassungsgüte und Modelltests . . . . .	337
9.4.2	Survival-Funktion und baseline hazard schätzen . . . . .	338
9.4.3	Modelldiagnostik . . . . .	340

9.4.4 Vorhersage und Anwendung auf neue Daten . . . . .	344
9.4.5 Erweiterungen des Cox PH-Modells . . . . .	345
<b>9.5 Parametrische proportional hazards Modelle . . . . .</b>	<b>345</b>
9.5.1 Darstellung über die Hazard-Funktion . . . . .	345
9.5.2 Darstellung als accelerated failure time Modell . . . . .	346
9.5.3 Anpassung und Modelltests . . . . .	347
9.5.4 Survival-Funktion schätzen . . . . .	348
<b>10 Klassische nonparametrische Methoden . . . . .</b>	<b>351</b>
10.1 Anpassungstests . . . . .	351
10.1.1 Binomialtest . . . . .	352
10.1.2 Test auf Zufälligkeit (Runs-Test) . . . . .	353
10.1.3 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest . . . . .	355
10.1.4 $\chi^2$ -Test auf eine feste Verteilung . . . . .	358
10.1.5 $\chi^2$ -Test auf eine Verteilungsklasse . . . . .	359
10.2 Analyse von gemeinsamen Häufigkeiten kategorialer Variablen . . . . .	361
10.2.1 $\chi^2$ -Test auf Unabhängigkeit . . . . .	361
10.2.2 $\chi^2$ -Test auf Gleichheit von Verteilungen . . . . .	362
10.2.3 $\chi^2$ -Test für mehrere Auftretenswahrscheinlichkeiten . . . . .	363
10.2.4 Fishers exakter Test auf Unabhängigkeit . . . . .	364
10.2.5 Fishers exakter Test auf Gleichheit von Verteilungen . . . . .	365
10.2.6 Kennwerte von $(2 \times 2)$ -Konfusionsmatrizen . . . . .	366
10.2.7 ROC-Kurve und AUC . . . . .	369
10.3 Maße für Zusammenhang und Übereinstimmung . . . . .	371
10.3.1 Spearmans $\rho$ und Kendalls $\tau$ . . . . .	371
10.3.2 Zusammenhang kategorialer Variablen . . . . .	373
10.3.3 Inter-Rater-Übereinstimmung . . . . .	374
10.4 Tests auf gleiche Variabilität . . . . .	382
10.4.1 Mood-Test . . . . .	382
10.4.2 Ansari-Bradley-Test . . . . .	383
10.5 Tests auf Übereinstimmung von Verteilungen . . . . .	384
10.5.1 Kolmogorov-Smirnov-Test für zwei Stichproben . . . . .	384
10.5.2 Vorzeichen-Test . . . . .	386
10.5.3 Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für eine Stichprobe . . . . .	387
10.5.4 Wilcoxon-Rangsummen-Test / Mann-Whitney-U-Test . . . . .	389
10.5.5 Wilcoxon-Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	390
10.5.6 Kruskal-Wallis-H-Test für unabhängige Stichproben . . . . .	390
10.5.7 Friedman-Rangsummen-Test für abhängige Stichproben . . . . .	392
10.5.8 Cochran-Q-Test für abhängige Stichproben . . . . .	394
10.5.9 Bowker-Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	395
10.5.10 McNemar-Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	396
10.5.11 Stuart-Maxwell-Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	398
<b>11 Resampling-Verfahren . . . . .</b>	<b>400</b>
11.1 Bootstrapping . . . . .	400
11.1.1 Replikationen erstellen . . . . .	401
11.1.2 Bootstrap-Vertrauensintervalle für $\mu$ . . . . .	404

11.1.3	Bootstrap-Vertrauensintervalle für $\mu_2 - \mu_1$ . . . . .	406
11.1.4	Lineare Modelle: case resampling . . . . .	407
11.1.5	Lineare Modelle: model-based resampling . . . . .	409
11.1.6	Lineare Modelle: wild bootstrap . . . . .	411
11.2	Permutationstests . . . . .	412
11.2.1	Test auf gleiche Lageparameter in unabhängigen Stichproben . . . . .	413
11.2.2	Test auf gleiche Lageparameter in abhängigen Stichproben . . . . .	415
11.2.3	Test auf Unabhängigkeit von zwei Variablen . . . . .	416
<b>12</b>	<b>Multivariate Verfahren</b> . . . . .	<b>418</b>
12.1	Lineare Algebra . . . . .	418
12.1.1	Matrix-Algebra . . . . .	418
12.1.2	Lineare Gleichungssysteme lösen . . . . .	422
12.1.3	Norm und Abstand von Vektoren und Matrizen . . . . .	422
12.1.4	Mahalanobistransformation und Mahalanobisdistanz . . . . .	424
12.1.5	Kennwerte von Matrizen . . . . .	426
12.1.6	Zerlegungen von Matrizen . . . . .	428
12.1.7	Orthogonale Projektion . . . . .	430
12.2	Hauptkomponentenanalyse . . . . .	433
12.2.1	Berechnung . . . . .	434
12.2.2	Dimensionsreduktion . . . . .	437
12.3	Faktorenanalyse . . . . .	439
12.4	Multidimensionale Skalierung . . . . .	446
12.5	Multivariate multiple Regression . . . . .	447
12.6	Hotellings $T^2$ . . . . .	449
12.6.1	Test für eine Stichprobe . . . . .	449
12.6.2	Test für zwei unabhängige Stichproben . . . . .	451
12.6.3	Test für zwei abhängige Stichproben . . . . .	453
12.6.4	Univariate Varianzanalyse mit abhängigen Gruppen (RB- $p$ ) . . . . .	454
12.7	Multivariate Varianzanalyse (MANOVA) . . . . .	455
12.7.1	Einfaktorielle MANOVA . . . . .	455
12.7.2	Zweifaktorielle MANOVA . . . . .	456
12.8	Diskriminanzanalyse . . . . .	457
12.9	Das allgemeine lineare Modell . . . . .	462
12.9.1	Modell der multiplen linearen Regression . . . . .	462
12.9.2	Modell der einfaktoriellen Varianzanalyse . . . . .	464
12.9.3	Modell der zweifaktoriellen Varianzanalyse . . . . .	469
12.9.4	Parameterschätzungen, Vorhersage und Residuen . . . . .	473
12.9.5	Hypothesen über parametrische Funktionen testen . . . . .	475
12.9.6	Lineare Hypothesen als Modellvergleiche formulieren . . . . .	475
12.9.7	Lineare Hypothesen testen . . . . .	480
12.9.8	Beispiel: Multivariate multiple Regression . . . . .	483
12.9.9	Beispiel: Einfaktorielle MANOVA . . . . .	485
12.9.10	Beispiel: Zweifaktorielle MANOVA . . . . .	488

<b>13 Vorhersagegüte prädiktiver Modelle</b>	<b>492</b>
13.1 Kreuzvalidierung linearer Regressionsmodelle	492
13.1.1 <i>k</i> -fache Kreuzvalidierung	493
13.1.2 Leave-One-Out Kreuzvalidierung	494
13.2 Kreuzvalidierung verallgemeinerter linearer Modelle	495
13.3 Bootstrap-Vorhersagefehler	496
<b>14 Diagramme erstellen</b>	<b>499</b>
14.1 Grafik-Devices	499
14.1.1 Aufbau und Verwaltung von Grafik-Devices	499
14.1.2 Grafiken speichern	501
14.2 Streu- und Liniendiagramme	502
14.2.1 Streudiagramme mit <code>plot()</code>	502
14.2.2 Datenpunkte eines Streudiagramms identifizieren	504
14.2.3 Streudiagramme mit <code>matplotlib()</code>	505
14.3 Diagramme formatieren	505
14.3.1 Grafikelemente formatieren	505
14.3.2 Farben spezifizieren	508
14.3.3 Achsen formatieren	511
14.4 Säulen- und Punktdiagramme	511
14.4.1 Einfache Säulendiagramme	512
14.4.2 Gruppierte und gestapelte Säulendiagramme	512
14.4.3 Dotchart	515
14.5 Elemente einem bestehenden Diagramm hinzufügen	516
14.5.1 Koordinaten in einem Diagramm identifizieren	517
14.5.2 In beliebige Diagrammbereiche zeichnen	518
14.5.3 Punkte	519
14.5.4 Linien	520
14.5.5 Polygone	522
14.5.6 Funktionsgraphen	525
14.5.7 Text und mathematische Formeln	526
14.5.8 Achsen	528
14.5.9 Fehlerbalken	529
14.5.10 Rastergrafiken	532
14.6 Verteilungsdiagramme	534
14.6.1 Histogramm und Schätzung der Dichtefunktion	534
14.6.2 Stamm-Blatt-Diagramm	536
14.6.3 Boxplot	537
14.6.4 Stripchart	539
14.6.5 Quantil-Quantil-Diagramm	540
14.6.6 Empirische kumulierte Häufigkeitsverteilung	542
14.6.7 Kreisdiagramm	542
14.6.8 Gemeinsame Verteilung zweier Variablen	543
14.7 Daten interpolieren und fitten	547
14.7.1 Lineare Interpolation und LOESS-Glätter	547
14.7.2 Splines	548

## *Inhaltsverzeichnis*

<b>14.8</b>	<b>Multivariate Daten visualisieren . . . . .</b>	<b>549</b>
14.8.1	Höhenlinien und variable Datenpunktsymbole . . . . .	550
14.8.2	Dreidimensionale Gitter und Streudiagrammme . . . . .	552
14.8.3	Bedingte Diagramme für mehrere Gruppen mit <code>ggplot2</code> . . . . .	553
14.8.4	Bedingte Diagramme für mehrere Gruppen mit <code>lattice</code> . . . . .	560
14.8.5	Matrix aus Streudiagrammen . . . . .	561
14.8.6	Heatmap . . . . .	563
<b>14.9</b>	<b>Mehrere Diagramme in einem Grafik-Device darstellen . . . . .</b>	<b>565</b>
14.9.1	<code>layout()</code> . . . . .	565
14.9.2	<code>par(mfrow, mfcoll, fig)</code> . . . . .	567
14.9.3	<code>split.screen()</code> . . . . .	569
<b>15</b>	<b>R als Programmiersprache . . . . .</b>	<b>571</b>
15.1	Kontrollstrukturen . . . . .	571
15.1.1	Fallunterscheidungen . . . . .	571
15.1.2	Schleifen . . . . .	574
15.2	Eigene Funktionen erstellen . . . . .	577
15.2.1	Funktionskopf . . . . .	577
15.2.2	Funktionsrumpf . . . . .	578
15.2.3	Fehler behandeln . . . . .	579
15.2.4	Rückgabewert und Funktionsende . . . . .	581
15.2.5	Eigene Funktionen verwenden . . . . .	581
15.2.6	Generische Funktionen . . . . .	582
15.3	Funktionen analysieren und verbessern . . . . .	584
15.3.1	Quelltext fremder Funktionen begutachten . . . . .	584
15.3.2	Funktionen zur Laufzeit untersuchen . . . . .	585
15.3.3	Effizienz von Auswertungen steigern . . . . .	587
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>590</b>