

1	Erste Schritte	1
1.1	Vorstellung	1
1.1.1	Pro und Contra R	1
1.1.2	Typografische Konventionen	3
1.1.3	R installieren	4
1.1.4	Grafische Benutzeroberflächen	5
1.1.5	Weiterführende Informationsquellen und Literatur	6
1.2	Grundlegende Elemente	7
1.2.1	R Starten, beenden und die Konsole verwenden	7
1.2.2	Einstellungen	12
1.2.3	Umgang mit dem workspace	13
1.2.4	Einfache Arithmetik	15
1.2.5	Funktionen mit Argumenten aufrufen	17
1.2.6	Hilfe-Funktionen	18
1.2.7	Empfehlungen und typische Fehlerquellen	18
1.3	Zusatzpakete verwenden	20
1.3.1	Zusatzpakete installieren	20
1.3.2	Zusatzpakete laden	21
1.3.3	Hinweise zum Arbeiten mit Zusatzpaketen	22
1.4	Datenstrukturen: Klassen, Objekte, Datentypen	23
1.4.1	Objekte benennen	25
1.4.2	Zuweisungen an Objekte	25
1.4.3	Objekte ausgeben	26
1.4.4	Objekte anzeigen lassen, umbenennen und entfernen	27
1.4.5	Datentypen	28
1.4.6	Logische Werte, Operatoren und Verknüpfungen	29

2	Elementare Dateneingabe und -verarbeitung	33
2.1	Vektoren	33
2.1.1	Vektoren erzeugen	33
2.1.2	Elemente auswählen und verändern	35
2.1.3	Datentypen in Vektoren	37
2.1.4	Elemente benennen	38
2.1.5	Elemente löschen	39
2.2	Logische Operatoren	39
2.2.1	Vektoren mit logischen Operatoren vergleichen	39
2.2.2	Logische Indexvektoren	42
2.3	Mengen	44
2.3.1	Doppelt auftretende Werte finden	44
2.3.2	Mengenoperationen	45
2.3.3	Kombinatorik	46
2.4	Systematische und zufällige Wertefolgen erzeugen	49
2.4.1	Numerische Sequenzen erstellen	49
2.4.2	Wertefolgen wiederholen	51
2.4.3	Zufällig aus einer Urne ziehen	51
2.4.4	Zufallszahlen aus bestimmten Verteilungen erzeugen	52
2.5	Daten transformieren	53
2.5.1	Werte sortieren	54
2.5.2	Werte in zufällige Reihenfolge bringen	55
2.5.3	Teilmenge von Daten auswählen	55
2.5.4	Daten umrechnen	56
2.5.5	Neue aus bestehenden Variablen bilden	59
2.5.6	Werte ersetzen oder recodieren	59
2.5.7	Kontinuierliche Variablen in Kategorien einteilen	61
2.6	Gruppierungsfaktoren	62
2.6.1	Ungeordnete Faktoren	62
2.6.2	Faktoren kombinieren	64
2.6.3	Faktorstufen nachträglich ändern	66
2.6.4	Geordnete Faktoren	68
2.6.5	Reihenfolge von Faktorstufen kontrollieren	69
2.6.6	Faktoren nach Muster erstellen	71
2.6.7	Quantitative in kategoriale Variablen umwandeln	72
2.7	Deskriptive Kennwerte numerischer Daten	73
2.7.1	Summen, Differenzen und Produkte	74
2.7.2	Extremwerte	75
2.7.3	Mittelwert, Median und Modalwert	76
2.7.4	Robuste Maße der zentralen Tendenz	77
2.7.5	Prozentrang, Quartile und Quantile	78
2.7.6	Varianz, Streuung, Schiefe und Wölbung	79

2.7.7	Diversität kategorialer Daten	80
2.7.8	Kovarianz und Korrelation	81
2.7.9	Robuste Streuungsmaße und Kovarianzschätzer	83
2.7.10	Kennwerte getrennt nach Gruppen berechnen	84
2.7.11	Funktionen auf geordnete Paare von Werten anwenden.	86
2.8	Matrizen	86
2.8.1	Datentypen in Matrizen	87
2.8.2	Dimensionierung, Zeilen und Spalten	88
2.8.3	Elemente auswählen und verändern	90
2.8.4	Weitere Wege, Elemente auszuwählen und zu verändern	92
2.8.5	Matrizen verbinden	93
2.8.6	Matrizen sortieren	94
2.8.7	Randkennwerte berechnen	95
2.8.8	Beliebige Funktionen auf Matrizen anwenden	95
2.8.9	Matrix zeilen- oder spaltenweise mit Kennwerten verrechnen ...	96
2.8.10	Kovarianz- und Korrelationsmatrizen	97
2.9	Arrays	99
2.10	Listen	100
2.10.1	Komponenten auswählen und verändern	101
2.10.2	Komponenten hinzufügen und entfernen	104
2.10.3	Listen mit mehreren Ebenen	105
2.11	Datensätze	106
2.11.1	Datentypen in Datensätzen	109
2.11.2	Elemente auswählen und verändern	109
2.11.3	Namen von Variablen und Beobachtungen	111
2.11.4	Datensätze in den Suchpfad einfügen	112
2.12	Häufigkeiten bestimmen	113
2.12.1	Einfache Tabellen absoluter und relativer Häufigkeiten	113
2.12.2	Iterationen zählen	115
2.12.3	Absolute und (bedingte) relative relative Häufigkeiten in Kreuztabellen	116
2.12.4	Randkennwerte von Kreuztabellen	118
2.12.5	Datensätze aus Häufigkeitstabellen erstellen	119
2.12.6	Kumulierte relative Häufigkeiten und Prozentrang	120
2.13	Fehlende Werte behandeln	121
2.13.1	Fehlende Werte codieren und identifizieren	121
2.13.2	Fehlende Werte ersetzen und umcodieren	123
2.13.3	Behandlung fehlender Werte bei der Berechnung einfacher Kennwerte	124
2.13.4	Behandlung fehlender Werte in Matrizen	124

2.13.5	Behandlung fehlender Werte beim Sortieren von Daten	127
2.13.6	Behandlung fehlender Werte in inferenzstatistischen Tests	127
2.13.7	Multiple Imputation	127
2.14	Zeichenketten verarbeiten	128
2.14.1	Objekte in Zeichenketten umwandeln	128
2.14.2	Zeichenketten erstellen und ausgeben	129
2.14.3	Zeichenketten manipulieren	132
2.14.4	Zeichenfolgen finden	133
2.14.5	Zeichenfolgen extrahieren	135
2.14.6	Zeichenfolgen ersetzen	136
2.14.7	Zeichenketten als Befehl ausführen	137
2.15	Datum und Uhrzeit	138
2.15.1	Datumsangaben erstellen und formatieren	138
2.15.2	Uhrzeit	139
2.15.3	Mit Datum und Uhrzeit rechnen	141
3	Daten importieren, exportieren, aufbereiten und aggregieren	145
3.1	Daten importieren und exportieren	145
3.1.1	Datentabellen im Textformat	145
3.1.2	R-Objekte	148
3.1.3	Daten mit anderen Programmen austauschen	149
3.1.4	Daten in der Konsole einlesen	155
3.1.5	Unstrukturierte Textdateien nutzen	156
3.2	Dateien verwalten	158
3.2.1	Dateien auswählen	158
3.2.2	Dateipfade manipulieren	159
3.2.3	Dateien verändern	160
3.3	Datensätze aufbereiten und aggregieren	161
3.3.1	Variablen umbenennen	161
3.3.2	Teilmengen von Daten auswählen	162
3.3.3	Variablen entfernen, hinzufügen und transformieren	164
3.3.4	Doppelte und fehlende Werte behandeln	165
3.3.5	Datensätze sortieren	167
3.3.6	Datensätze aufteilen	168
3.3.7	Datensätze zeilen- oder spaltenweise verbinden	169
3.3.8	Datensätze zusammenführen	170
3.3.9	Organisationsform einfacher Datensätze ändern	174
3.3.10	Organisationsform komplexer Datensätze ändern	176
3.3.11	Daten getrennt nach Gruppen auswerten und aggregieren	180
3.3.12	Funktionen auf Variablen anwenden	183
3.3.13	Funktionen für mehrere Variablen anwenden	185

3.4	Datensätze aufbereiten und aggregieren mit <code>dplyr</code>	186
3.4.1	Besonderheiten	187
3.4.2	Variablen umbenennen	189
3.4.3	Teilmengen von Daten auswählen	190
3.4.4	Variablen entfernen, hinzufügen und transformieren	193
3.4.5	Doppelte und fehlende Werte behandeln	195
3.4.6	Datensätze sortieren	196
3.4.7	Datensätze zeilen- oder spaltenweise verbinden.....	197
3.4.8	Datensätze zusammenführen	197
3.4.9	Organisationsform komplexer Datensätze ändern	200
3.4.10	Datensätze getrennt nach Gruppen auswerten und aggregieren ...	202
3.4.11	Funktionen auf Gruppen von Variablen anwenden.....	204
3.4.12	Häufigkeiten bestimmen	208
4	Zuverlässige und reproduzierbare Datenauswertung	211
4.1	Befehlssequenzen im Editor bearbeiten.....	211
4.2	R-Dokumente und Notebooks erstellen.....	213
4.2.1	Grundprinzip	213
4.2.2	Arbeitsschritte	214
4.2.3	Aufbau eines Quelldokuments.....	215
4.2.4	Beispiel.....	217
4.3	Datenqualität prüfen.....	220
4.4	Reproduzierbare Auswertungen sicherstellen	221
4.4.1	Potentielle Probleme und Maßnahmen	221
4.4.2	Allgemeine Empfehlungen	223
5	Hilfsmittel für die Inferenzstatistik	225
5.1	Wichtige Begriffe inferenzstatistischer Tests.....	225
5.2	Lineare Modelle formulieren.....	227
5.3	Funktionen von Zufallsvariablen.....	229
5.3.1	Dichtefunktion	229
5.3.2	Verteilungsfunktion	231
5.3.3	Quantilfunktion	232
6	Lineare Regression	235
6.1	Test des Korrelationskoeffizienten.....	235
6.2	Einfache lineare Regression.....	237
6.2.1	Deskriptive Modellanpassung	237
6.2.2	Regressionsanalyse	240
6.3	Multiple lineare Regression.....	243
6.3.1	Deskriptive Modellanpassung und Regressionsanalyse.....	243
6.3.2	Modell verändern.....	244

6.3.3	Modelle vergleichen und auswählen	245
6.3.4	Moderierte Regression	249
6.4	Regressionsmodelle auf andere Daten anwenden	252
6.5	Regressionsdiagnostik	254
6.5.1	Extremwerte, Ausreißer und Einfluss	254
6.5.2	Verteilungseigenschaften der Residuen	257
6.5.3	Multikollinearität	261
6.6	Erweiterungen der linearen Regression	264
6.6.1	Robuste Regression	264
6.6.2	Penalisierte Regression	265
6.6.3	Nichtlineare Zusammenhänge	268
6.6.4	Abhängige Fehler bei Messwiederholung oder Clusterung	269
6.6.5	Regressionsmodelle für mehrere Verteilungsparameter	269
6.7	Partialkorrelation und Semipartialkorrelation	270
7	<i>t</i>-Tests und Varianzanalysen	273
7.1	Tests auf Varianzhomogenität	273
7.1.1	<i>F</i> -Test auf Varianzhomogenität für zwei Stichproben	273
7.1.2	Levene-Test für mehr als zwei Stichproben	275
7.1.3	Fligner-Killeen-Test für mehr als zwei Stichproben	276
7.2	<i>t</i> -Tests	276
7.2.1	<i>t</i> -Test für eine Stichprobe	276
7.2.2	<i>t</i> -Test für zwei unabhängige Stichproben	278
7.2.3	<i>t</i> -Test für zwei abhängige Stichproben	280
7.3	Einfaktorielle Varianzanalyse (CR- <i>p</i>)	281
7.3.1	Auswertung mit <code>oneway.test()</code>	282
7.3.2	Auswertung mit <code>aov()</code>	283
7.3.3	Auswertung mit <code>anova()</code>	285
7.3.4	Effektstärke schätzen	286
7.3.5	Voraussetzungen grafisch prüfen	286
7.3.6	Einzelvergleiche (Kontraste)	288
7.4	Einfaktorielle Varianzanalyse mit abhängigen Gruppen (RB- <i>p</i>)	295
7.4.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen	296
7.4.2	Zirkularität der Kovarianzmatrix prüfen	299
7.4.3	Multivariat formuliert auswerten mit <code>Anova()</code>	300
7.4.4	Multivariat formuliert auswerten mit <code>anova()</code>	301
7.4.5	Einzelvergleiche und alternative Auswertungsmöglichkeiten	302
7.5	Zweifaktorielle Varianzanalyse (CRF- <i>pq</i>)	303
7.5.1	Auswertung und Schätzung der Effektstärke	303
7.5.2	Quadratsummen vom Typ I, II und III	306
7.5.3	Bedingte Haupteffekte testen	311
7.5.4	Beliebige a-priori Kontraste	312

7.5.5	Beliebige post-hoc Kontraste nach Scheffé	316
7.5.6	Marginale Paarvergleiche nach Tukey	317
7.6	Zweifaktorielle Varianzanalyse mit zwei Intra-Gruppen Faktoren (RBF- pq)	318
7.6.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen	318
7.6.2	Zirkularität der Kovarianzmatrizen prüfen	322
7.6.3	Multivariat formuliert auswerten	323
7.6.4	Einzelvergleiche (Kontraste)	324
7.7	Zweifaktorielle Varianzanalyse mit Split-Plot-Design (SPF- $p \cdot q$)	325
7.7.1	Univariat formuliert auswerten und Effektstärke schätzen	325
7.7.2	Voraussetzungen und Prüfen der Zirkularität	328
7.7.3	Multivariat formuliert auswerten	329
7.7.4	Einzelvergleiche (Kontraste)	330
7.7.5	Erweiterung auf dreifaktorielles SPF- $p \cdot qr$ Design	331
7.7.6	Erweiterung auf dreifaktorielles SPF- $pq \cdot r$ Design	333
7.8	Kovarianzanalyse	334
7.8.1	Test der Effekte von Gruppenzugehörigkeit und Kovariate	334
7.8.2	Beliebige a-priori Kontraste	340
7.8.3	Beliebige post-hoc Kontraste nach Scheffé	342
7.9	Power, Effektstärke und notwendige Stichprobengröße	342
7.9.1	Binomialtest	343
7.9.2	t -Test	345
7.9.3	Einfaktorielle Varianzanalyse	348
8	Regressionsmodelle für kategoriale Daten und Zähldaten	351
8.1	Logistische Regression	352
8.1.1	Modell für dichotome Daten anpassen	352
8.1.2	Modell für binomiale Daten anpassen	355
8.1.3	Anpassungsgüte	356
8.1.4	Vorhersage, Klassifikation, Kalibrierung und Anwendung auf neue Daten	358
8.1.5	Signifikanztests für Parameter und Modell	361
8.1.6	Andere Link-Funktionen	363
8.1.7	Mögliche Probleme bei der Modellanpassung	364
8.2	Ordinale Regression	365
8.2.1	Modellanpassung	366
8.2.2	Anpassungsgüte	368
8.2.3	Signifikanztests für Parameter und Modell	369
8.2.4	Vorhersage, Klassifikation und Anwendung auf neue Daten	370

8.3	Multinomiale Regression	371
8.3.1	Modellanpassung	373
8.3.2	Anpassungsgüte	374
8.3.3	Signifikanztests für Parameter und Modell	374
8.3.4	Vorhersage, Klassifikation und Anwendung auf neue Daten	376
8.4	Regression für Zähldaten	377
8.4.1	Poisson-Regression	377
8.4.2	Ereignisraten analysieren	379
8.4.3	Adjustierte Poisson-Regression und negative Binomial-Regression	380
8.4.4	Zero-inflated Poisson-Regression	382
8.4.5	Zero-truncated Poisson-Regression	384
8.5	Log-lineare Modelle	385
8.5.1	Modell	385
8.5.2	Modellanpassung mit <code>loglm()</code>	387
8.5.3	Modellanpassung mit <code>glm()</code>	389
9	Survival-Analyse	393
9.1	Verteilung von Ereigniszeiten	393
9.2	Zensierte und gestutzte Ereigniszeiten	394
9.2.1	Zeitlich konstante Prädiktoren	395
9.2.2	Daten in Zählprozess-Darstellung	397
9.3	Kaplan-Meier-Analyse	401
9.3.1	Survival-Funktion schätzen	401
9.3.2	Survival, kumulative Inzidenz und kumulatives hazard darstellen	403
9.3.3	Log-Rank-Test auf gleiche Survival-Funktionen	403
9.4	Cox proportional hazards Modell	405
9.4.1	Anpassungsgüte und Modelltests	408
9.4.2	Survival-Funktion, baseline hazard und kumulatives hazard schätzen	409
9.4.3	Modelldiagnostik	411
9.4.4	Vorhersage und Anwendung auf neue Daten	415
9.4.5	Erweiterungen des Cox PH-Modells	416
9.5	Parametrische proportional hazards Modelle	416
9.5.1	Darstellung über die Hazard-Funktion	417
9.5.2	Darstellung als accelerated failure time Modell	418
9.5.3	Anpassung und Modelltests	418
9.5.4	Survival-Funktion schätzen	420

10	Klassische nonparametrische Methoden	423
10.1	Anpassungstests	423
10.1.1	Binomialtest	424
10.1.2	Test auf Zufälligkeit (Runs-Test)	426
10.1.3	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest	428
10.1.4	χ^2 -Test auf eine feste Verteilung	430
10.1.5	χ^2 -Test auf eine Verteilungsklasse	432
10.2	Analyse von gemeinsamen Häufigkeiten kategorialer Variablen	433
10.2.1	χ^2 -Test auf Unabhängigkeit	433
10.2.2	χ^2 -Test auf Gleichheit von Verteilungen	435
10.2.3	χ^2 -Test für mehrere Auftretenswahrscheinlichkeiten	436
10.2.4	Fishers exakter Test auf Unabhängigkeit	437
10.2.5	Fishers exakter Test auf Gleichheit von Verteilungen	438
10.2.6	Kennwerte von (2×2) -Konfusionsmatrizen	439
10.2.7	ROC-Kurve und AUC	442
10.3	Maße für Zusammenhang und Übereinstimmung	444
10.3.1	Zusammenhang stetiger ordinaler Variablen: Spearman's ρ und Kendalls τ	444
10.3.2	Zusammenhang kategorialer Variablen: ϕ Cramér's V, Kontingenzkoeffizient	446
10.3.3	Inter-Rater-Übereinstimmung	448
10.4	Tests auf gleiche Variabilität	457
10.4.1	Mood-Test	458
10.4.2	Ansari-Bradley-Test	459
10.5	Tests auf Übereinstimmung von Verteilungen	460
10.5.1	Kolmogorov-Smirnov-Test für zwei Stichproben	460
10.5.2	Vorzeichen-Test	462
10.5.3	Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für eine Stichprobe	463
10.5.4	Wilcoxon-Rangsummen-Test / Mann-Whitney- U -Test für zwei unabhängige Stichproben	465
10.5.5	Wilcoxon-Test für zwei abhängige Stichproben	466
10.5.6	Kruskal-Wallis- H -Test für unabhängige Stichproben	467
10.5.7	Friedman-Rangsummen-Test für abhängige Stichproben	469
10.5.8	Cochran- Q -Test für abhängige Stichproben	471
10.5.9	Bowker-Test für zwei abhängige Stichproben	472
10.5.10	McNemar-Test für zwei abhängige Stichproben	474
10.5.11	Stuart-Maxwell-Test für zwei abhängige Stichproben	475
11	Resampling-Verfahren	477
11.1	Nonparametrisches Bootstrapping	477
11.1.1	Replikationen erstellen	478
11.1.2	Bootstrap-Vertrauensintervalle für μ	481
11.1.3	Bootstrap-Vertrauensintervalle für $\mu_2 - \mu_1$	484

11.1.4	Lineare Modelle: case resampling	485
11.1.5	Lineare Modelle: model-based resampling	487
11.1.6	Lineare Modelle: wild bootstrap	489
11.2	Parametrisches Bootstrapping	490
11.2.1	Bootstrap-Vertrauensintervalle für $\mu_2 - \mu_1$	490
11.2.2	Verallgemeinerte lineare Modelle	492
11.3	Permutationstests	493
11.3.1	Test auf gleiche Lageparameter in unabhängigen Stichproben	494
11.3.2	Test auf gleiche Lageparameter in abhängigen Stichproben	497
11.3.3	Test auf Unabhängigkeit von zwei Variablen	498

12	Multivariate Verfahren	501
12.1	Lineare Algebra	501
12.1.1	Matrix-Algebra	502
12.1.2	Lineare Gleichungssysteme lösen	505
12.1.3	Norm und Abstand von Vektoren und Matrizen	506
12.1.4	Mahalanobistransformation und Mahalanobisdistanz	507
12.1.5	Kennwerte von Matrizen	509
12.1.6	Zerlegungen von Matrizen	512
12.1.7	Orthogonale Projektion	514
12.2	Hauptkomponentenanalyse	517
12.2.1	Berechnung	518
12.2.2	Dimensionsreduktion	521
12.3	Faktorenanalyse	524
12.4	Multidimensionale Skalierung	530
12.5	Multivariate multiple Regression	533
12.6	Hotellings T^2	534
12.6.1	Test für eine Stichprobe	534
12.6.2	Test für zwei unabhängige Stichproben	536
12.6.3	Test für zwei abhängige Stichproben	538
12.6.4	Univariate Varianzanalyse mit abhängigen Gruppen (RB- p)	538
12.7	Multivariate Varianzanalyse (MANOVA)	539
12.7.1	Einfaktorielle MANOVA	539
12.7.2	Zweifaktorielle MANOVA	540
12.8	Diskriminanzanalyse	541
12.9	Das allgemeine lineare Modell	546
12.9.1	Modell der multiplen linearen Regression	546
12.9.2	Modell der einfaktoriellen Varianzanalyse	548
12.9.3	Modell der zweifaktoriellen Varianzanalyse	554
12.9.4	Parameterschätzungen, Vorhersage und Residuen	559
12.9.5	Hypothesen über parametrische Funktionen testen	560
12.9.6	Lineare Hypothesen als Modellvergleiche formulieren	561

12.9.7	Lineare Hypothesen testen	566
12.9.8	Beispiel: Multivariate multiple Regression	569
12.9.9	Beispiel: Einfaktorielle MANOVA	571
12.9.10	Beispiel: Zweifaktorielle MANOVA	575
13	Vorhersagegüte prädiktiver Modelle.	579
13.1	Kreuzvalidierung linearer Regressionsmodelle	580
13.1.1	k -fache Kreuzvalidierung	580
13.1.2	Leave-One-Out Kreuzvalidierung	582
13.2	Kreuzvalidierung verallgemeinerter linearer Modelle	583
13.3	Bootstrap-Vorhersagefehler	584
14	Diagramme erstellen.	587
14.1	Grafik-Devices	587
14.1.1	Aufbau und Verwaltung von Grafik-Devices	587
14.1.2	Grafiken speichern.	589
14.2	Streu- und Liniendiagramme	590
14.2.1	Streudiagramme mit <code>plot()</code>	591
14.2.2	Datenpunkte eines Streudiagramms identifizieren	592
14.2.3	Streudiagramme mit <code>matplot()</code>	592
14.3	Diagramme formatieren	594
14.3.1	Grafikelemente formatieren.	594
14.3.2	Farben spezifizieren.	598
14.3.3	Achsen formatieren	600
14.4	Säulen- und Punktdiagramme	601
14.4.1	Einfache Säulendiagramme.	601
14.4.2	Gruppierte und gestapelte Säulendiagramme	602
14.4.3	Dotchart.	605
14.5	Elemente einem bestehenden Diagramm hinzufügen	607
14.5.1	Koordinaten in einem Diagramm identifizieren	607
14.5.2	In beliebige Diagrammbereiche zeichnen	608
14.5.3	Punkte	610
14.5.4	Linien	610
14.5.5	Polygone	613
14.5.6	Funktionsgraphen	617
14.5.7	Text und mathematische Formeln	617
14.5.8	Achsen.	620
14.5.9	Fehlerbalken	621
14.5.10	Rastergrafiken	624
14.6	Verteilungsdiagramme	627
14.6.1	Histogramm und Schätzung der Dichtefunktion	627
14.6.2	Stamm-Blatt-Diagramm	629
14.6.3	Boxplot	630

14.6.4	Stripchart	632
14.6.5	Quantil-Quantil-Diagramm	634
14.6.6	Empirische kumulierte Häufigkeitsverteilung	636
14.6.7	Kreisdiagramm	636
14.6.8	Gemeinsame Verteilung zweier Variablen	638
14.7	Multivariate Daten visualisieren	641
14.7.1	Höhenlinien und variable Datenpunktsymbole	642
14.7.2	Dreidimensionale Gitter und Streudiagramme	645
14.7.3	Matrix aus Streudiagrammen	646
14.7.4	Heatmap	648
14.8	Mehrere Diagramme in einem Grafik-Device darstellen	650
14.8.1	<code>layout()</code>	650
14.8.2	<code>par(mfrow, mfcoll, fig)</code>	653
14.8.3	<code>split.screen()</code>	654
15	Diagramme mit <code>ggplot2</code>	657
15.1	Grundprinzip	658
15.1.1	Grundsicht	658
15.1.2	Diagramme speichern	659
15.2	Diagrammtypen	660
15.2.1	Punkt-, Streu- und Liniendiagramme	661
15.2.2	Säulendiagramm	661
15.2.3	Histogramm	663
15.2.4	Boxplot	664
15.2.5	Quantil-Quantil-Diagramm	665
15.3	Bedingte Diagramme in Panels darstellen	667
15.4	Diagrammelemente hinzufügen	668
15.5	Diagramme formatieren	672
15.5.1	Elementposition kontrollieren	672
15.5.2	Achsen anpassen	673
15.5.3	Legende ändern	676
15.5.4	Farben, Datenpunktsymbole und Linientypen	677
15.5.5	Aussehen im Detail verändern	679
16	Numerische Methoden	683
16.1	Daten interpolieren und glätten	683
16.1.1	Lineare Interpolation	684
16.1.2	Splines	684
16.1.3	LOESS-Glätter	687
16.1.4	Nonparametrische Kerndichteschätzer	687
16.2	Nullstellen finden	688

16.3	Integrieren und differenzieren	690
16.3.1	Numerisch integrieren	690
16.3.2	Numerisch differenzieren	691
16.4	Numerisch optimieren	694
16.4.1	Maximum-Likelihood-Parameterschätzung	694
16.4.2	Allgemeine Optimierung	695
17	R als Programmiersprache	699
17.1	Kontrollstrukturen	699
17.1.1	Fallunterscheidungen	699
17.1.2	Schleifen	702
17.2	Funktionsaufrufe ohne Schleifen wiederholen	705
17.3	Eigene Funktionen erstellen	706
17.3.1	Funktionskopf	706
17.3.2	Funktionsrumpf	707
17.3.3	Fehler behandeln	708
17.3.4	Rückgabewert und Funktionsende	710
17.3.5	Eigene Funktionen verwenden	711
17.3.6	Generische Funktionen	711
17.4	Funktionen analysieren	713
17.4.1	Quelltext fremder Funktionen begutachten	713
17.4.2	Funktionen zur Laufzeit untersuchen	715
17.5	Effizienz von Auswertungen steigern	718
17.5.1	Grundlegende Empfehlungen	718
17.5.2	Auswertungen parallelisieren	720
	Literaturverzeichnis	725
	Stichwortverzeichnis	737
	R-Funktionen, Klassen und Schlüsselwörter	749
	Zusatzpakete	761