

Inhalt

Vorwort	25
---------------	----

TEIL I Grundlagen

1 Das C++-Handbuch

1.1 Neu und modern	32
1.2 »Dan«-Kapitel	32
1.3 Darstellung in diesem Buch	33
1.4 Verwendete Formatierungen	33
1.5 Sorry for my Denglish	34

2 Programmieren in C++

2.1 Übersetzen	38
2.2 Übersetzungsphasen	39
2.3 Aktuelle Compiler	40
2.3.1 Gnu C++	40
2.3.2 Clang++ von LLVM	40
2.3.3 Microsoft Visual C++	41
2.3.4 Compiler im Container	41
2.4 Entwicklungsumgebungen	41
2.5 Die Kommandozeile unter Ubuntu	43
2.5.1 Ein Programm erstellen	44
2.5.2 Automatisieren mit Makefile	46
2.6 Die IDE »Visual Studio Code« unter Windows	47
2.7 Das Beispielprogramm beschleunigen	54

3 C++ für Umsteiger

55

4 Die Grundbausteine von C++

63

4.1 Ein schneller Überblick	66
4.1.1 Kommentare	66
4.1.2 Die »include«-Direktive	67
4.1.3 Die Standardbibliothek	67
4.1.4 Die Funktion »main()«	67
4.1.5 Typen	68
4.1.6 Variablen	68
4.1.7 Initialisierung	69
4.1.8 Ausgabe auf der Konsole	70
4.1.9 Anweisungen	70
4.2 Ohne Eile erklärt	71
4.2.1 Leerräume, Bezeichner und Token	73
4.2.2 Kommentare	74
4.2.3 Funktionen und Argumente	75
4.2.4 Seiteneffekt-Operatoren	76
4.2.5 Die »main«-Funktion	78
4.2.6 Anweisungen	79
4.2.7 Ausdrücke	82
4.2.8 Zuweisungen	84
4.2.9 Typen	85
4.2.10 Variablen – Deklaration, Definition und Initialisierung	91
4.2.11 Initialisieren mit »auto«	93
4.2.12 Details zur »include«-Direktive und »include« direkt	95
4.2.13 Module	96
4.2.14 Eingabe und Ausgabe	97
4.2.15 Der Namensraum »std«	98
4.3 Operatoren	100
4.3.1 Operatoren und Operanden	101
4.3.2 Überblick über Operatoren	102
4.3.3 Arithmetische Operatoren	103
4.3.4 Bitweise Arithmetik	104
4.3.5 Zusammengesetzte Zuweisung	107
4.3.6 Post- und Präinkrement sowie Post- und Prädekrement	108
4.3.7 Relationale Operatoren	108

4.3.8	Logische Operatoren	109
4.3.9	Pointer- und Dereferenzierungsoperatoren	111
4.3.10	Besondere Operatoren	112
4.3.11	Funktionsähnliche Operatoren	114
4.3.12	Operatorreihenfolge	115
4.4	Eingebaute Datentypen	116
4.4.1	Übersicht	117
4.4.2	Eingebaute Datentypen initialisieren	119
4.4.3	Ganzzahlen	119
4.4.4	Fließkommazahlen	134
4.4.5	Wahrheitswerte	149
4.4.6	Zeichtypen	151
4.4.7	Komplexe Zahlen	154
4.5	Undefiniertes und unspezifiziertes Verhalten	157

5 Guter Code, 1. Dan: Lesbar programmieren

5.1	Kommentare	160
5.2	Dokumentation	160
5.3	Einrückungen und Zeilenlänge	161
5.4	Zeilen pro Funktion und Datei	162
5.5	Klammern und Leerzeichen	163
5.6	Namen	164

6 Höhere Datentypen

6.1	Der Zeichenkettentyp »string«	168
6.1.1	Initialisierung	169
6.1.2	Funktionen und Methoden	171
6.1.3	Andere Stringtypen	172
6.1.4	Nur zur Ansicht: »string_view«	173
6.2	Streams	174
6.2.1	Eingabe- und Ausgabeoperatoren	175
6.2.2	»getline«	177
6.2.3	Dateien für die Ein- und Ausgabe	177

6.2.4	Manipulatoren	179
6.2.5	Der Manipulator »endl«	181
6.3	Behälter und Zeiger	181
6.3.1	Container	181
6.3.2	Parametrisierte Typen	182
6.4	Die einfachen Sequenzcontainer	183
6.4.1	»array«	184
6.4.2	»vector«	186
6.5	Algorithmen	189
6.6	Zeiger und C-Arrays	189
6.6.1	Zeigertypen	190
6.6.2	C-Arrays	190

7 Funktionen

7.1	Deklaration und Definition einer Funktion	192
7.2	Funktionstyp	193
7.3	Funktionen verwenden	194
7.4	Eine Funktion definieren	195
7.5	Mehr zu Parametern	197
7.5.1	Call-by-Value	197
7.5.2	Call-by-Reference	198
7.5.3	Konstante Referenzen	199
7.5.4	Aufruf als Wert, Referenz oder konstante Referenz?	200
7.6	Funktionskörper	201
7.7	Parameter umwandeln	203
7.8	Funktionen überladen	205
7.9	Defaultparameter	208
7.10	Beliebig viele Argumente	209
7.11	Alternative Schreibweise zur Funktionsdeklaration	210
7.12	Spezialitäten	211
7.12.1	»noexcept«	211
7.12.2	Inline-Funktionen	212
7.12.3	»constexpr«	212

7.12.4	Gelöschte Funktionen	213
7.12.5	Spezialitäten bei Klassenmethoden	213

8 Anweisungen im Detail

215

8.1	Der Anweisungsblock	218
8.1.1	Frei stehende Blöcke und Gültigkeit von Variablen	219
8.2	Die leere Anweisung	221
8.3	Deklarationsanweisung	221
8.3.1	Strukturiertes Binden	223
8.4	Die Ausdrucksanweisung	224
8.5	Die »if«-Anweisung	224
8.5.1	»if« mit Initialisierer	227
8.5.2	Compilezeit »if«	228
8.6	Die »while«-Schleife	229
8.7	Die »do-while«-Schleife	231
8.8	Die »for«-Schleife	232
8.9	Die bereichsbasierte »for«-Schleife	234
8.10	Die »switch«-Verzweigung	236
8.11	Die »break«-Anweisung	240
8.12	Die »continue«-Anweisung	241
8.13	Die »return«-Anweisung	242
8.14	Die »goto«-Anweisung	243
8.15	Der »try-catch«-Block und »throw«	245
8.16	Zusammenfassung	247

9 Ausdrücke im Detail

249

9.1	Berechnungen und Seiteneffekte	250
9.2	Arten von Ausdrücken	251
9.3	Literale	253

9.4 Bezeichner	253
9.5 Klammern	254
9.6 Funktionsaufruf und Indexzugriff	254
9.7 Zuweisung	255
9.8 Typumwandlung	257

10 Fehlerbehandlung

10.1 Fehlerbehandlung mit Fehlercodes	261
10.2 Was ist eine Ausnahme?	264
10.2.1 Ausnahmen auslösen und behandeln	266
10.2.2 Aufrufstapel abwickeln	266
10.3 Kleinere Fehlerbehandlungen	267
10.4 Weiterwerfen – »rethrow«	268
10.5 Die Reihenfolge im »catch«	268
10.5.1 Kein »finally«	270
10.5.2 Exceptions der Standardbibliothek	270
10.6 Typen für Exceptions	271
10.7 Wenn eine Exception aus »main« herausfällt	272

11 Guter Code, 2. Dan: Modularisierung

11.1 Programm, Bibliothek, Objektdatei	273
11.2 Bausteine	274
11.3 Trennen der Funktionalitäten	275
11.4 Ein modulares Beispielprojekt	277
11.4.1 Namensräume	280
11.4.2 Implementierung	281
11.4.3 Die Bibliothek nutzen	287

TEIL II Objektorientierte Programmierung und mehr

12 Von der Struktur zur Klasse	291
12.1 Initialisierung	294
12.2 Rückgabe eigener Typen	295
12.3 Methoden statt Funktionen	297
12.4 Das bessere »drucke«	300
12.5 Eine Ausgabe wie jede andere	302
12.6 Methoden inline definieren	303
12.7 Implementierung und Definition trennen	304
12.8 Initialisierung per Konstruktor	305
12.8.1 Member-Defaultwerte in der Deklaration	308
12.8.2 Konstruktor-Delegation	309
12.8.3 Defaultwerte für die Konstruktorparameter	310
12.8.4 »init«-Methode nicht im Konstruktor aufrufen	312
12.8.5 Exceptions im Konstruktor	313
12.9 Struktur oder Klasse?	313
12.9.1 Kapselung	314
12.9.2 »public« und »private«, Struktur und Klasse	315
12.9.3 Daten mit »struct«, Verhalten mit »class«	315
12.9.4 Initialisierung von Typen mit privaten Daten	316
12.10 Zwischenergebnis	318
12.11 Eigene Datentypen verwenden	318
12.11.1 Klassen als Werte verwenden	321
12.11.2 Konstruktoren nutzen	324
12.11.3 Typumwandlungen	324
12.11.4 Kapseln und entkapseln	326
12.11.5 Typen lokal einen Namen geben	332
12.12 Typinferenz mit »auto«	335
12.13 Eigene Klassen in Standardcontainern	339
12.13.1 Drei-Wege-Vergleich: der Spaceship-Operator	341

13 Namensräume und Qualifizierer

343

13.1	Der Namensraum »std«	344
13.2	Anonymer Namensraum	347
13.3	»static« macht lokal	349
13.4	»static« teilt gern	350
13.5	Ferne Initialisierung oder »static inline«-Datenfelder	353
13.6	Garantiert zur Compilezeit initialisiert mit »constinit«	354
13.7	»static« macht dauerhaft	354
13.8	»inline namespace«	356
13.9	Zusammenfassung	358
13.10	»const«	358
13.10.1	Const-Parameter	359
13.10.2	Const-Methoden	361
13.10.3	Const-Variablen	362
13.10.4	Const-Rückgaben	364
13.10.5	»const« zusammen mit »static«	368
13.10.6	Noch konstanter mit »constexpr«	369
13.10.7	»if constexpr« für Übersetzungszeit-Entscheidungen	373
13.10.8	C++20: »consteval«	374
13.10.9	»if consteval«	376
13.10.10	Un-Const mit »mutable«	377
13.10.11	Const-Korrektheit	378
13.10.12	Zusammenfassung	379
13.11	Flüchtig mit »volatile«	380

14 Guter Code, 3. Dan: Testen

383

14.1	Arten des Tests	383
14.1.1	Refactoring	385
14.1.2	Unitests	386
14.1.3	Sozial oder solitär	387
14.1.4	Doppelgänger	389
14.1.5	Suites	391

14.2 Frameworks	391
14.2.1 Arrange, Act, Assert	394
14.2.2 Frameworks zur Auswahl	395
14.3 Boost.Test	396
14.4 Hilfsmakros für Assertions	400
14.5 Ein Beispielprojekt mit Unitests	403
14.5.1 Privates und öffentliches Testen	405
14.5.2 Ein automatisches Testmodul	406
14.5.3 Test kompilieren	408
14.5.4 Die Testsuite selbst zusammenbauen	409
14.5.5 Testen von Privatem	414
14.5.6 Parametrisierte Tests	414

15 Vererbung

	417
15.1 Beziehungen	418
15.1.1 Hat-ein-Komposition	418
15.1.2 Hat-ein-Aggregation	419
15.1.3 Ist-ein-Vererbung	420
15.1.4 Ist-Instanz-von versus Ist-ein-Beziehung	420
15.2 Vererbung in C++	421
15.3 Hat-ein versus ist-ein	422
15.4 Gemeinsamkeiten finden	422
15.5 Abgeleitete Typen erweitern	425
15.6 Methoden überschreiben	426
15.7 Wie Methoden funktionieren	427
15.8 Virtuelle Methoden	429
15.9 Konstruktoren in Klassenhierarchien	431
15.10 Typumwandlung in Klassenhierarchien	433
15.10.1 Die Vererbungshierarchie aufwärts umwandeln	433
15.10.2 Die Vererbungshierarchie abwärts umwandeln	433
15.10.3 Referenzen behalten auch die Typinformation	434
15.11 Wann virtuell?	434
15.12 Andere Designs zur Erweiterbarkeit	436

16 Der Lebenszyklus von Klassen	439
16.1 Erzeugung und Zerstörung	440
16.2 Temporary: kurzlebige Werte	442
16.3 Der Destruktor zum Konstruktor	444
16.3.1 Kein Destruktor nötig	446
16.3.2 Ressourcen im Destruktor	446
16.4 Yoda-Bedingung	449
16.5 Konstruktion, Destruktion und Exceptions	450
16.6 Kopieren	452
16.7 Zuweisungsoperator	455
16.8 Streichen von Methoden	459
16.9 Verschiebeoperationen	461
16.9.1 Was der Compiler generiert	465
16.10 Operatoren	466
16.11 Eigene Operatoren in einem Datentyp	470
16.12 Besondere Klassenformen	478
16.12.1 Abstrakte Klassen und Methoden	478
16.12.2 Aufzählungsklassen	480
17 Guter Code, 4. Dan: Sicherheit, Qualität und Nachhaltigkeit	483
17.1 Die Nullerregel	483
17.1.1 Die großen Fünf	483
17.1.2 Hilfskonstrukt per Verbot	484
17.1.3 Die Nullerregel und ihr Einsatz	485
17.1.4 Ausnahmen von der Nullerregel	486
17.1.5 Nullerregel, Dreierregel, Fünferregel, Viereinhalberegel	489
17.2 RAI – Resource Acquisition Is Initialization	489
17.2.1 Ein Beispiel mit C	490
17.2.2 Besitzende Raw-Pointer	492
17.2.3 Von C nach C++	493
17.2.4 Es muss nicht immer eine Exception sein	495
17.2.5 Mehrere Konstruktoren	496

17.2.6	Mehrphasige Initialisierung	497
17.2.7	Definieren, wo es gebraucht wird	497
17.2.8	Nothrow-new	497

18 Spezielles für Klassen

18.1	Dürfen alles sehen – »friend«-Klassen	499
18.1.1	»friend class«-Beispiel	501
18.2	Non-public-Vererbung	504
18.2.1	Auswirkungen auf die Außenwelt	505
18.2.2	Nicht öffentliche Vererbung in der Praxis	508
18.3	Signaturklassen als Interfaces	510
18.4	Multiple Vererbung	514
18.4.1	Multiple Vererbung in der Praxis	516
18.4.2	Achtung bei Typumwandlungen von Zeigern	520
18.4.3	Das Beobachter-Muster als praktisches Beispiel	522
18.5	Rautenförmige multiple Vererbung – »virtual« für Klassenhierarchien	524
18.6	Literale Datentypen – »constexpr« für Konstruktoren	528

19 Guter Code, 5. Dan: Klassisches objektorientiertes Design

19.1	Objekte in C++	533
19.2	Objektorientiert designen	534
19.2.1	SOLID	535
19.2.2	Seien Sie nicht STUPID	553

TEIL III Fortgeschrittene Themen

20 Zeiger

20.1	Adressen	558
20.2	Zeiger	560

20.3 Gefahren von Aliasing	562
20.4 Heapspeicher und Stapelspeicher	563
20.4.1 Der Stapel	563
20.4.2 Der Heap	565
20.5 Smarte Pointer	567
20.5.1 »unique_ptr«	569
20.5.2 »shared_ptr«	573
20.6 Rohe Zeiger	576
20.6.1 Eine Referenz können Sie nicht neu zuweisen	579
20.6.2 Sie können keine Referenzen in einem Container speichern	579
20.7 C-Arrays	582
20.7.1 Rechnen mit Zeigern	582
20.7.2 Verfall von C-Arrays	584
20.7.3 Dynamische C-Arrays	585
20.7.4 Zeichenkettenliterale	587
20.8 Iteratoren	588
20.9 Zeiger als Iteratoren	590
20.10 Zeiger im Container	590
20.11 Die Ausnahme: wann das Wegräumen nicht nötig ist	591
21 Makros	595
21.1 Der Präprozessor	596
21.2 Vorsicht vor fehlenden Klammern	600
21.3 Featuremakros	601
21.4 Information über den Quelltext	602
21.5 Warnung vor Mehrfachausführung	603
21.6 Typvariabilität von Makros	604
21.7 Zusammenfassung	607
22 Schnittstelle zu C	609
22.1 Mit Bibliotheken arbeiten	610
22.2 C-Header	611

22.3 C-Ressourcen	614
22.4 »void«-Pointer	615
22.5 Daten lesen	616
22.6 Das Hauptprogramm	617
22.7 Zusammenfassung	618

23 Templates

619

23.1 Funktionstemplates	621
23.1.1 Überladung	621
23.1.2 Ein Typ als Parameter	622
23.1.3 Funktionskörper eines Funktionstemplates	623
23.1.4 Werte als Templateparameter	625
23.1.5 Viele Funktionen	627
23.1.6 Parameter mit Extras	628
23.1.7 Methodentemplates sind auch nur Funktionstemplates	630
23.2 Funktionstemplates in der Standardbibliothek	631
23.2.1 Ranges statt Container als Templateparameter	632
23.2.2 Beispiel: Informationen über Zahlen	635
23.3 Eine Klasse als Funktion	637
23.3.1 Werte für einen »function«-Parameter	638
23.3.2 C-Funktionspointer	639
23.3.3 Die etwas andere Funktion	641
23.3.4 Praktische Funktoren	644
23.3.5 Algorithmen mit Funktoren	646
23.3.6 Anonyme Funktionen alias Lambda-Ausdrücke	647
23.3.7 Templatefunktionen ohne »template«, aber mit »auto«	653
23.4 C++ Concepts	654
23.4.1 Wie Sie Concepts lesen	654
23.4.2 Wie Sie Concepts anwenden	658
23.4.3 Wie Sie Concepts schreiben	660
23.4.4 Semantische Einschränkungen	661
23.4.5 Zusammenfassung	661
23.5 Templateklassen	662
23.5.1 Klassentemplates implementieren	662
23.5.2 Methoden von Klassentemplates implementieren	663
23.5.3 Objekte aus Klassentemplates erzeugen	666

23.5.4	Klassentemplates mit mehreren formalen Datentypen	670
23.5.5	Klassentemplates mit Non-Type-Parameter	671
23.5.6	Klassentemplates mit Default	673
23.5.7	Klassentemplates spezialisieren	674
23.6	Templates mit variabler Argumentanzahl	677
23.6.1	»sizeof ...«-Operator	680
23.6.2	Parameter-Pack in Tupel konvertieren	681
23.7	Eigene Literale	681
23.7.1	Was sind Literale?	682
23.7.2	Namensregeln	683
23.7.3	Phasenweise	683
23.7.4	Überladungsvarianten	684
23.7.5	Benutzerdefiniertes Literal mittels Template	685
23.7.6	Roh oder gekocht	689
23.7.7	Automatisch zusammengefügt	690
23.7.8	Unicodeliterale	690

TEIL IV Die Standardbibliothek

24	Container	695
24.1	Grundlagen	696
24.1.1	Wiederkehrend	696
24.1.2	Abstrakt	697
24.1.3	Operationen	699
24.1.4	Komplexität	700
24.1.5	Container und ihre Iteratoren	702
24.1.6	Ranges vereinfachen Iteratoren	704
24.1.7	Ranges, Views, Concepts, Adapter, Generatoren und Algorithmen ...	708
24.1.8	Algorithmen	709
24.2	Iteratoren-Grundlagen	709
24.2.1	Iteratoren aus Containern	711
24.2.2	Mehr Funktionalität mit Iteratoren	713
24.3	Allokatoren: Speicherfragen	714
24.4	Containergemeinsamkeiten	717

24.5 Ein Überblick über die Standardcontainerklassen	719
24.5.1 Typaliase der Container	720
24.6 Die sequenziellen Containerklassen	723
24.6.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede	725
24.6.2 Methoden von Sequenzcontainern	727
24.6.3 »vector«	730
24.6.4 »array«	750
24.6.5 »deque«	756
24.6.6 »list«	760
24.6.7 »forward_list«	763
24.7 Assoziativ und geordnet	769
24.7.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede	770
24.7.2 Methoden der geordneten assoziativen Container	771
24.7.3 »set«	773
24.7.4 »map«	788
24.7.5 »multiset«	795
24.7.6 »multimap«	801
24.8 Nur assoziativ und nicht garantiert	805
24.8.1 Hashtabellen	806
24.8.2 Gemeinsamkeiten und Unterschiede	810
24.8.3 Methoden der ungeordneten assoziativen Container	813
24.8.4 »unordered_set«	814
24.8.5 »unordered_map«	823
24.8.6 »unordered_multiset«	828
24.8.7 »unordered_multimap«	834
24.9 Containeradapter	837
24.10 Sonderfälle: »string«, »basic_string« und »vector<char>«	840
24.11 Sonderfälle: »vector<bool>«, »array<bool,n>« und »bitset<n>«	842
24.11.1 Dynamisch und kompakt: »vector<bool>«	842
24.11.2 Statisch: »array<bool,n>« und »bitset<n>«	842
24.12 Sonderfall: Value-Array mit »valarray<>«	845
24.12.1 Eigenschaften der Elemente	847
24.12.2 Initialisieren	849
24.12.3 Zuweisen	849
24.12.4 Einfügen und löschen	849
24.12.5 Zugreifen	850
24.12.6 Spezialität: Alle Daten manipulieren	850
24.12.7 Spezialität: Schneiden und maskieren	851

25 Containerunterstützung	855
25.1 Algorithmen	857
25.2 Iteratoren und Ranges	858
25.3 Iteratoradapter	860
25.4 Algorithmen der Standardbibliothek	861
25.5 Parallele Ausführung	863
25.6 Liste der Algorithmusfunktionen und Range-Adapter	866
25.6.1 Liste der Range-Adapter und Views	868
25.6.2 Ranges als Parameter (und mehr)	874
25.6.3 Liste der (eigentlich) nicht verändernden Algorithmen	876
25.6.4 Inhärenz modifizierende Algorithmen	881
25.6.5 Algorithmen rund um Partitionen	886
25.6.6 Algorithmen rund ums Sortieren und schnelle Suchen in sortierten Bereichen	887
25.6.7 Mischmengenalgorithmen, repräsentiert durch einen sortierten Bereich	888
25.6.8 Heapalgorithmen	890
25.6.9 Minimum und Maximum	891
25.6.10 Diverse Algorithmen	891
25.7 Elemente verknüpfende Algorithmen aus »<numeric>« und »<ranges>«	892
25.8 Kopie statt Zuweisung – Werte in uninitialisierten Speicherbereichen	899
25.9 Eigene Algorithmen	901
25.10 Eigene Views und Range-Adapter schreiben	903
 26 Guter Code, 6. Dan: Für jede Aufgabe der richtige Container	907
26.1 Alle Container nach Aspekten sortiert	907
26.1.1 Wann ist ein »vector« nicht die beste Wahl?	907
26.1.2 Immer sortiert: »set«, »map«, »multiset« und »multimap«	908
26.1.3 Im Speicher hintereinander: »vector«, »array«	909

26.1.4	Einfügung billig: »list«	910
26.1.5	Wenig Speicheroverhead: »vector«, »array«	910
26.1.6	Größe dynamisch: alle außer »array«	912
26.2	Rezepte für Container	913
26.2.1	Zwei Phasen? »vector« als guter »set«-Ersatz	913
26.2.2	Den Inhalt eines Containers auf einem Stream ausgeben	915
26.2.3	So statisch ist »array« gar nicht	916
26.3	Algorithmen je nach Container unterschiedlich implementieren	919

27 Streams, Dateien und Formatierung 921

27.1	Ein- und Ausgabekonzept mit Streams	922
27.2	Globale, vordefinierte Standardstreams	922
27.2.1	Streamoperatoren << und >>	923
27.3	Methoden für die Aus- und Eingabe von Streams	925
27.3.1	Methoden für die unformatierte Ausgabe	925
27.3.2	Methoden für die (unformatierte) Eingabe	926
27.4	Fehlerbehandlung und Zustand von Streams	929
27.4.1	Methoden für die Behandlung von Fehlern bei Streams	930
27.5	Streams manipulieren und formatieren	933
27.5.1	Manipulatoren	933
27.5.2	Eigene Manipulatoren ohne Argumente erstellen	939
27.5.3	Eigene Manipulatoren mit Argumenten erstellen	941
27.5.4	Format-Flags direkt ändern	942
27.6	Streams für die Dateiein- und Dateiausgabe	945
27.6.1	Die Streams »ifstream«, »ofstream« und »fstream«	946
27.6.2	Verbindung zu einer Datei herstellen	946
27.6.3	Lesen und Schreiben	951
27.6.4	Wahlfreier Zugriff	958
27.6.5	Synchronisierte Streams für Threads	959
27.7	Streams für Strings	961
27.7.1	Unterschied zu »to_string«	964
27.7.2	»to_chars« und »format« sind flexibler als »to_string«	965
27.7.3	Lesen aus einem String	965

27.8 Streampuffer	966
27.8.1 Zugriff auf den Streampuffer von »iostream«-Objekten	967
27.8.2 »filebuf«	969
27.8.3 »stringbuf«	969
27.9 »filesystem«	969
27.10 Formatieren	971
27.10.1 Einfache Formatierung	972
27.10.2 Eigene Typen formatieren	974
28 Standardbibliothek – Extras	979
28.1 »pair« und »tuple«	979
28.1.1 Mehrere Werte zurückgeben	980
28.2 Reguläre Ausdrücke	987
28.2.1 Matchen und Suchen	988
28.2.2 Ergebnis und Teile davon	988
28.2.3 Gefundenes Ersetzen	989
28.2.4 Reich an Varianten	990
28.2.5 Iteratoren	990
28.2.6 Matches	991
28.2.7 Optionen	991
28.2.8 Geschwindigkeit	992
28.2.9 Standardsyntax leicht gekürzt	992
28.2.10 Anmerkungen zu regulären Ausdrücken in C++	994
28.3 Zufall	997
28.3.1 Einen Würfel werfen	998
28.3.2 Echter Zufall	1000
28.3.3 Andere Generatoren	1000
28.3.4 Verteilungen	1002
28.4 Mathematisches	1006
28.4.1 Brüche und Zeiten – »<ratio>« und »<chrono>«	1006
28.4.2 Vordefinierte Suffixe für benutzerdefinierte Literale	1030
28.5 Systemfehlerbehandlung mit »system_error«	1033
28.5.1 Überblick	1034
28.5.2 Prinzipien	1035
28.5.3 »error_code« und »error_condition«	1036
28.5.4 Fehlerkategorien	1040

28.5.5	Eigene Fehlercodes	1040
28.5.6	» <code>system_error</code> «-Exception	1041
28.6	Laufzeittypinformationen – »<code><typeinfo></code>« und »<code><typeindex></code>«	1043
28.7	Hilfsklassen rund um Funktoren – »<code><functional></code>«	1047
28.7.1	Funktionsobjekte	1048
28.7.2	Funktionsgeneratoren	1052
28.8	»<code>optional</code>« für einen oder keinen Wert	1055
28.9	»<code>variant</code>« für einen von mehreren Typen	1056
28.10	»<code>any</code>« hält jeden Typ	1058
28.11	Spezielle mathematische Funktionen	1059
28.12	Schnelle Umwandlung mit »<code><charconv></code>«	1060

29 Threads – Programmieren mit Mehrläufigkeit 1063

29.1	C++-Threading-Grundlagen	1064
29.1.1	Starten von reinen Threads	1065
29.1.2	Einen Thread vorzeitig beenden	1067
29.1.3	Warten auf einen Thread	1068
29.1.4	Im startenden Thread Exceptions berücksichtigen	1069
29.1.5	Einer Threadfunktion Parameter übergeben	1072
29.1.6	Einen Thread verschieben	1077
29.1.7	Wie viele Threads starten?	1079
29.1.8	Welcher Thread bin ich?	1082
29.2	Gemeinsame Daten	1082
29.2.1	Data Races	1083
29.2.2	Riegel	1086
29.2.3	Barrieren	1086
29.2.4	Mutexe	1088
29.2.5	Interface-Design für Multithreading	1091
29.2.6	Sperren können zum Patt führen	1096
29.2.7	Flexibleres Sperren mit » <code>unique_lock</code> «	1098
29.3	Andere Möglichkeiten zur Synchronisation	1100
29.3.1	Nur einmal aufrufen mit » <code>once_flag</code> « und » <code>call_once</code> «	1100
29.3.2	Sperren zählen mit » <code>recursive_mutex</code> «	1102
29.4	Im eigenen Speicher mit »<code>thread_local</code>«	1104

29.5 Mit »condition_variable« auf Ereignisse warten	1105
29.5.1 »notify_all«	1108
29.5.2 Ausgabe synchronisieren	1109
29.6 Einmal warten mit »future«	1110
29.6.1 Launch Policies	1112
29.6.2 Gewisse Zeit warten	1113
29.6.3 Ausnahmebehandlung bei »future«	1116
29.6.4 »promise«	1118
29.7 Atomics	1122
29.7.1 Übersicht über die Operationen	1123
29.7.2 Memory Order	1125
29.7.3 Beispiel	1126
29.8 Koroutinen	1127
29.8.1 Koroutinen im Compiler	1128
29.8.2 Generator	1129
29.8.3 Koroutinen mit »promise_type«	1130
29.9 Zusammenfassung	1133
29.9.1 Header »<thread>«	1134
29.9.2 Header »<latch>« und »<barrier>«	1134
29.9.3 Header »<mutex>« und »<shared mutex>«	1134
29.9.4 Header »<condition variable>«	1135
29.9.5 Header »<future>«	1135
29.9.6 Header »<atomic>«	1136
29.9.7 Header »<coroutine>«	1136
Anhang	1137
A Guter Code, 7. Dan: Richtlinien	1137
A.1 Guideline Support Library	1138
A.2 C++ Core Guidelines	1139
B Cheat Sheet	1153
Index	1157