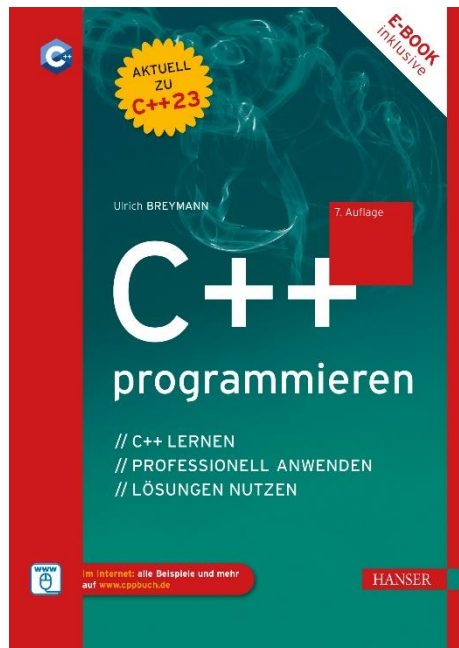


HANSER



Leseprobe

zu

C++ programmieren

von Ulrich Breymann

Print-ISBN: 978-3-446-47689-9
E-Book-ISBN: 978-3-446-47846-6
E-Pub-ISBN: 978-3-446-47964-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476899>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	23
Teil I: Einführung in C++	25
1 Es geht los!	27
1.1 Historisches	27
1.2 Arten der Programmierung	28
1.3 Werkzeuge zum Programmieren	29
1.4 Das erste Programm	30
1.5 Integrierte Entwicklungsumgebung	36
1.6 Einfache Datentypen und Operatoren	39
1.6.1 Ausdruck	39
1.6.2 Regeln für Namen	39
1.6.3 Ganze Zahlen	40
1.6.4 Reelle Zahlen	48
1.6.5 Konstanten	52
1.6.6 Zeichen	54
1.6.7 Logischer Datentyp bool	57
1.6.8 Regeln zum Bilden von Ausdrücken	58
1.6.9 Standard-Typumwandlungen	59
1.7 Gültigkeitsbereich und Sichtbarkeit	61
1.7.1 Namespace std	63
1.8 Kontrollstrukturen	64

1.8.1	Anweisungen	64
1.8.2	Sequenz (Reihung)	65
1.8.3	Auswahl (Selektion, Verzweigung)	66
1.8.4	Fallunterscheidungen mit switch	71
1.8.5	Wiederholungen	74
1.8.6	Kontrolle mit break und continue	82
1.8.7	goto	84
1.9	Selbst definierte und zusammengesetzte Datentypen	85
1.9.1	Aufzählungstypen	85
1.9.2	Strukturen	88
1.9.3	Der C++-Standardtyp vector	89
1.9.4	Der C++-Standardtyp array	95
1.9.5	Zeichenketten: der C++-Standardtyp string	95
1.9.6	Container und Schleifen	98
1.9.7	Typermittlung mit auto	100
1.9.8	Deklaration einer strukturierten Bindung mit auto	102
1.9.9	Bitfeld und Union	103
1.10	Einfache Ein- und Ausgabe	104
1.10.1	Standardein- und -ausgabe	104
1.10.2	Ein- und Ausgabe mit Dateien	108
1.11	Guter Programmierstil	113
2	Programmstrukturierung	115
2.1	Funktionen	116
2.1.1	Aufbau und Prototypen	116
2.1.2	nodiscard	118
2.1.3	Gültigkeitsbereiche und Sichtbarkeit in Funktionen	119
2.1.4	Lokale static-Variable: Funktion mit Gedächtnis	120
2.2	Schnittstellen zum Datentransfer	121
2.2.1	Übergabe per Wert	122
2.2.2	Übergabe per Referenz	124
2.2.3	Gefahren bei der Rückgabe von Referenzen	126
2.2.4	Vorgegebene Parameterwerte und unterschiedliche Parameterzahl	127
2.2.5	Überladen von Funktionen	128
2.2.6	Funktion main()	130
2.2.7	Beispiel Taschenrechnersimulation	130
2.2.8	Spezifikation von Funktionen	136

2.2.9	Reihenfolge der Auswertung von Argumenten	136
2.3	Präprozessordirektiven	136
2.3.1	#include	137
2.3.2	#define, #if, #ifndef, #ifnndef, #elif, #else, #endif, #elifdef, #elifndef.....	137
2.3.3	Vermeiden mehrfacher Inkludierung	138
2.3.4	__has_include	140
2.3.5	Textersetzung mit #define	140
2.3.6	Umwandlung von Parametern in Zeichenketten.....	142
2.3.7	Verifizieren logischer Annahmen zur Laufzeit	143
2.3.8	Verifizieren logischer Annahmen zur Compilationszeit	143
2.3.9	Fehler- und Warnmeldungen	144
2.3.10	Fehler ohne Programmabbruch lokalisieren.....	144
2.4	Modulare Programmgestaltung	145
2.4.1	Projekt: Mehrere cpp-Dateien bilden ein Programm	145
2.4.2	Projekt in der IDE anlegen.....	147
2.4.3	Übersetzungseinheit, Deklaration, Definition	148
2.4.4	Dateiübergreifende Gültigkeit und Sichtbarkeit.....	150
2.5	Namensräume	151
2.5.1	Gültigkeitsbereich auf Datei beschränken	154
2.6	inline-Funktionen und -Variablen.....	155
2.7	constexpr-Funktionen.....	156
2.7.1	Berechnung zur Compilationszeit mit consteval.....	158
2.8	Rückgabotyp auto	159
2.9	Funktions-Templates	161
2.9.1	Spezialisierung von Templates	163
2.9.2	Einbinden von Templates	164
2.10	C++-Header	167
2.11	Module	169
3	Objektorientierung 1	173
3.1	Datentyp und Objekt	175
3.2	Abstrakter Datentyp	175
3.3	Klassen	177
3.3.1	const-Objekte und Methoden.....	180
3.3.2	inline-Elementfunktionen.....	181
3.4	Initialisierung und Konstruktoren	182
3.4.1	Standardkonstruktor.....	182

3.4.2	Direkte Initialisierung der Attribute	184
3.4.3	Allgemeine Konstruktoren	184
3.4.4	Kopierkonstruktor	187
3.4.5	Typumwandlungskonstruktor	190
3.4.6	Konstruktor und mehr vorgeben oder verbieten	191
3.4.7	Einheitliche Initialisierung und Sequenzkonstruktor	192
3.4.8	Delegierender Konstruktor	194
3.4.9	constexpr-Konstruktor und -Methoden	195
3.5	Beispiel Rationale Zahlen	199
3.5.1	Aufgabenstellung	199
3.5.2	Entwurf	200
3.5.3	Implementation	203
3.6	Destruktoren	208
3.7	Wie kommt man zu Klassen und Objekten? Ein Beispiel	210
3.8	Gegenseitige Abhängigkeit von Klassen	215
4	Zeiger	217
4.1	Zeiger und Adressen	218
4.2	C-Arrays	222
4.2.1	C-Array, std::size() und sizeof	223
4.2.2	Initialisierung von C-Arrays	224
4.2.3	Zeigerarithmetik	224
4.2.4	Indexoperator bei C-Arrays	225
4.2.5	C-Array durchlaufen	226
4.3	C-Zeichenketten	227
4.3.1	Schleifen und C-Strings	230
4.4	Dynamische Datenobjekte	233
4.4.1	Freigeben dynamischer Objekte	236
4.5	Zeiger und Funktionen	239
4.5.1	Parameterübergabe mit Zeigern	239
4.5.2	C-Array als Funktionsparameter	240
4.5.3	const und Zeiger-Parameter	242
4.5.4	Parameter des main-Programms	243
4.5.5	Gefahren bei der Rückgabe von Zeigern	243
4.6	this-Zeiger	244
4.7	Mehrdimensionale C-Arrays	246
4.7.1	Statische mehrdimensionale C-Arrays	246

4.7.2	Mehrdimensionales C-Array als Funktionsparameter	248
4.8	Dynamisches 2D-Array	251
4.9	Binäre Ein-/Ausgabe	257
4.10	Zeiger auf Funktionen.....	260
4.11	Typumwandlungen für Zeiger.....	264
4.12	Zeiger auf Elementfunktionen und -daten	265
4.13	Komplexe Deklarationen lesen	267
4.13.1	Lesbarkeit mit typedef und using verbessern	267
4.14	Alternative zu rohen Zeigern, new und delete	269
5	Objektorientierung 2	273
5.1	Eine String-Klasse	273
5.1.1	friend-Funktionen	279
5.2	String-Ansicht (View)	280
5.3	Typbestimmung mit decltype und declval.....	283
5.4	Klassenspezifische Daten und Funktionen	286
5.4.1	Klassenspezifische Konstante.....	290
5.5	Klassen-Templates	293
5.5.1	Ein Stack-Template	293
5.5.2	Stack mit statisch festgelegter Größe.....	295
5.5.3	Stack auf Basis verschiedener Container	297
5.6	Code Bloat bei der Instanziierung von Templates vermeiden.....	298
5.6.1	extern-Template	299
6	Vererbung	301
6.1	Vererbung und Initialisierung	306
6.2	Zugriffsschutz	307
6.3	Typbeziehung zwischen Ober- und Unterklasse	310
6.4	Oberklassen-Schnittstelle verwenden	311
6.4.1	Konstruktor erben.....	312
6.5	Überschreiben von Funktionen in abgeleiteten Klassen	314
6.5.1	Virtuelle Funktionen.....	316
6.5.2	Abstrakte Klassen	319
6.5.3	Virtueller Destruktor.....	324
6.5.4	Vererbung verbieten	327
6.5.5	Private virtuelle Funktionen.....	328
6.6	Probleme der Modellierung mit Vererbung.....	330
6.7	Mehrfachvererbung.....	333

6.8	Typumwandlung bei Vererbung	340
6.9	Typinformationen zur Laufzeit.....	342
6.10	Private-/Protected-Vererbung	343
7	Fehlerbehandlung.....	347
7.1	Ausnahmebehandlung	349
7.1.1	Exception-Spezifikation in Deklarationen	352
7.1.2	Exception-Hierarchie	353
7.1.3	Besondere Fehlerbehandlungsfunktionen.....	355
7.1.4	Arithmetische Fehler/Division durch 0.....	356
7.2	Speicherbeschaffung mit new	358
7.3	Exception-Sicherheit	359
7.4	Fehlerbehandlung mit optional und expected	360
7.4.1	Fehlerbehandlung mit optional	361
7.4.2	Fehlerbehandlung mit expected.....	363
7.4.3	Monadische Operationen.....	364
8	Überladen von Operatoren	367
8.1	Rationale Zahlen – noch einmal	369
8.1.1	Arithmetische Operatoren.....	369
8.1.2	Ausgabeoperator <<.....	371
8.1.3	Gleichheitsoperator	372
8.2	Eine Klasse für Vektoren	374
8.2.1	Indexoperator []	377
8.2.2	Zuweisungsoperator =.....	379
8.2.3	Mathematische Vektoren	382
8.2.4	Multiplikationsoperator	383
8.3	Inkrement-Operator ++	385
8.4	Typumwandlungsoperator	389
8.5	Smart Pointer: Operatoren -> und *	390
8.5.1	Smart Pointer und die C++-Standardbibliothek	395
8.6	Objekt als Funktion.....	396
8.7	Spaceship-Operator <=>	398
8.7.1	Ordnungen in C++	399
8.7.2	Automatische Erzeugung der Vergleichsoperatoren	401
8.7.3	Klassenspezifische Sortierung	402
8.7.4	Freie Funktionen statt Elementfunktionen	403
8.8	new und delete überladen	404

8.8.1	Unterscheidung zwischen Heap- und Stack-Objekten	408
8.8.2	Empfehlungen im Umgang mit new und delete	410
8.9	Operatoren für Literale	410
8.9.1	Stringliterals	411
8.9.2	Benutzerdefinierte Literale	412
8.10	Indexoperator für Matrizen	414
8.10.1	Zweidimensionale Matrix als Vektor von Vektoren	415
8.10.2	Zweidimensionale Matrix mit zusammenhängendem Speicher	416
8.11	Zuweisung, Kopie und Vergleich bei Vererbung	419
8.11.1	Polymorpher Vergleich	420
8.11.2	Kopie mit clone()-Methode erzeugen	421
9	Dateien und Ströme	423
9.1	Eingabe	425
9.2	Ausgabe	427
9.3	Formatierung mit std::format	429
9.3.1	Syntax für Platzhalter	429
9.3.2	Formatierung eigener Datentypen	433
9.4	Formatierung mit Flags	433
9.5	Formatierung mit Manipulatoren	437
9.6	Fehlerbehandlung	443
9.7	Typumwandlung von Dateiobjekten nach bool	445
9.8	Arbeit mit Dateien	446
9.8.1	Positionierung in Dateien	446
9.8.2	Lesen und Schreiben in derselben Datei	447
9.9	Umleitung auf Strings	448
9.10	Formatierte Daten lesen	449
9.10.1	Eingabe benutzerdefinierter Typen	449
9.11	Blockweise lesen und schreiben	451
9.11.1	vector-Objekt binär lesen und schreiben	451
9.11.2	array-Objekt binär lesen und schreiben	453
9.11.3	Matrix binär lesen und schreiben	454
10	Die Standard Template Library (STL)	457
10.1	Container, Iteratoren, Algorithmen	458
10.2	Iteratoren im Detail	463
10.3	Beispiel verkettete Liste	465
10.4	Ranges und Views	469

Teil II: Fortgeschrittene Themen	473
11 Performance, Wert- und Referenzsemantik	475
11.1 Performanceproblem Wertsemantik	477
11.1.1 Auslassen der Kopie	477
11.1.2 Temporäre Objekte bei der Zuweisung	478
11.2 Referenzsemantik für R-Werte	479
11.2.1 Kategorien von Ausdrücken	479
11.2.2 Referenzen auf R- und L-Werte	480
11.2.3 Auswertung von Referenzen auf R-Werte	481
11.2.4 Referenz-Qualifizierer	482
11.3 Optimierung durch Referenzsemantik für R-Werte	484
11.3.1 Bewegungskonstruktor	487
11.3.2 Bewegender Zuweisungsoperator	488
11.4 Die move()-Funktion	489
11.4.1 move() und Initialisierung der Attribute	490
11.5 Referenzen auf R-Werte und Template-Parameter	491
11.5.1 Auswertung von Template-Parametern – ein Überblick	493
11.6 Ein effizienter Plusoperator	493
11.6.1 Eliminieren auch des Bewegungskonstruktors	494
11.6.2 Kopien temporärer Objekte eliminieren	495
11.7 Rule of three/five/zero	496
12 Lambda-Funktionen	501
12.1 Eigenschaften	502
12.1.1 Äquivalenz zum Funktionszeiger	503
12.1.2 Lambda-Funktion und Klasse	504
12.2 Generische Lambda-Funktionen	505
12.3 Parametererfassung mit []	507
13 Metaprogrammierung mit Templates	509
13.1 Grundlagen	510
13.2 Variadic Templates: Templates mit variabler Parameterzahl	512
13.2.1 Ablauf der Auswertung durch den Compiler	513
13.2.2 Anzahl der Parameter	514
13.2.3 Parameterexpansion	515
13.3 Fold-Expressions	516
13.3.1 Weitere Varianten	518

13.3.2	Fold-Expression mit Kommaoperator	519
13.4	Klassen-Template mit variabler Stelligkeit	520
13.5	Type Traits	521
13.5.1	Wie funktionieren Type Traits? – ein Beispiel	522
13.5.2	Abfrage von Eigenschaften	525
13.5.3	Abfrage numerischer Eigenschaften	527
13.5.4	Typumwandlungen	527
13.5.5	Auswahl weiterer Traits	528
13.6	Concepts	530
14	Reguläre Ausdrücke	535
14.1	Elemente regulärer Ausdrücke	536
14.1.1	Greedy oder lazy?	538
14.2	Interaktive Auswertung	540
14.3	Auszug der regex-Schnittstelle	543
14.4	Verarbeitung von \n	544
14.5	Anwendungen	546
15	Threads und Coroutinen	547
15.1	Zeit und Dauer	548
15.2	Threads	549
15.2.1	Automatisch join()	553
15.3	Die Klasse jthread	554
15.3.1	Übergabe eines Funktors	556
15.3.2	Thread-Group	558
15.4	Synchronisation kritischer Abschnitte	559
15.4.1	Data Race erkennen	562
15.5	Thread-Steuerung: Pausieren, Fortsetzen, Beenden	562
15.6	Warten auf Ereignisse	566
15.7	Atomare Veränderung von Variablen	572
15.8	Asynchrone verteilte Bearbeitung einer Aufgabe	575
15.9	Thread-Sicherheit	578
15.10	Coroutinen	579
16	Grafische Benutzungsschnittstellen	585
16.1	Ereignisgesteuerte Programmierung	586
16.2	GUI-Programmierung mit Qt	587
16.2.1	Meta-Objektsystem	587

16.2.2	Der Programmablauf	588
16.2.3	Ereignis abfragen	589
16.3	Signale, Slots und Widgets	590
16.4	Dialog	599
16.5	Qt oder Standard-C++?	602
16.5.1	Threads	602
16.5.2	Verzeichnisbaum durchwandern	604
17	Internet-Anbindung	607
17.1	Protokolle	608
17.2	Adressen	608
17.3	Socket	611
17.3.1	Bidirektionale Kommunikation	614
17.3.2	UDP-Sockets	616
17.3.3	Atomuhr mit UDP abfragen	618
17.4	HTTP	620
17.4.1	Verbindung mit GET	621
17.4.2	Verbindung mit POST	626
17.5	Mini-Webserver	627
17.6	OpenAI-Schnittstellen zu ChatGPT und DALL·E 2	635
17.6.1	ChatGPT	636
17.6.2	DALL·E 2	638
18	Datenbankanbindung	639
18.1	C++-Interface	640
18.2	Anwendungsbeispiel	643
Teil III:	Ausgewählte Methoden und Werkzeuge	
	der Softwareentwicklung	649
19	Effiziente Programmerzeugung mit make	651
19.1	Wirkungsweise	652
19.2	Variablen und Muster	654
19.3	Universelles Makefile für einfache Projekte	656
19.4	Automatische Ermittlung von Abhängigkeiten	657
19.4.1	Makefiles für verschiedene Betriebssysteme und Compiler	659
19.4.2	Getrennte Verzeichnisse: src, obj, bin	660
19.5	Makefile für Verzeichnisbäume	661

19.5.1 Nur ein Makefile auf Projektebene 663

19.5.2 Rekursive Make-Aufrufe 664

19.6 Erzeugen von Bibliotheken 666

19.6.1 Statische Bibliotheksmodule 666

19.6.2 Dynamische Bibliotheksmodule 668

19.7 Weitere Build-Tools 671

20 Unit-Test 673

20.1 Werkzeuge 674

20.2 Boost Unit Test Framework 675

20.2.1 Fixture 677

20.2.2 Testprotokoll und Log-Level 677

20.2.3 Prüf-Makros 678

20.2.4 Kommandozeilen-Optionen 683

20.3 Test Driven Development 684

**Teil IV: Das C++-Rezeptbuch:
Tipps und Lösungen für typische Aufgaben 685**

21 Sichere Programmentwicklung 687

21.1 Regeln zum Design von Methoden 688

21.2 Defensive Programmierung 689

21.2.1 double- und float-Werte richtig vergleichen 690

21.2.2 const und constexpr verwenden 691

21.2.3 Anweisungen nach for/if/while einklammern 691

21.2.4 int und unsigned/size_t nicht mischen 692

21.2.5 size_t oder auto statt unsigned int verwenden 692

21.2.6 Postfix++ mit Präfix++ implementieren 692

21.2.7 Ein Destruktor darf keine Exception werfen 693

21.2.8 explicit-Typumwandlungsoperator bevorzugen 693

21.2.9 explicit-Konstruktor für eine Typumwandlung bevorzugen 693

21.2.10 Leere Standardkonstruktoren vermeiden 693

21.2.11 Mit override Schreibfehler reduzieren 694

21.2.12 Kopieren und Zuweisung verbieten 694

21.2.13 Vererbung verbieten 695

21.2.14 Überschreiben einer virtuellen Methode verhindern 695

21.2.15 »Rule of zero« beachten 695

21.2.16	One Definition Rule	695
21.2.17	Defensiv Objekte löschen	696
21.2.18	Hängende Referenzen vermeiden	696
21.2.19	Speicherbeschaffung und -freigabe kapseln	696
21.2.20	Programmierrichtlinien einhalten	696
21.3	Exception-sichere Beschaffung von Ressourcen	696
21.3.1	Sichere Verwendung von <code>unique_ptr</code> und <code>shared_ptr</code>	697
21.3.2	So vermeiden Sie <code>new</code> und <code>delete</code> !	697
21.3.3	<code>shared_ptr</code> für C-Arrays korrekt verwenden	698
21.3.4	<code>unique_ptr</code> für C-Arrays korrekt verwenden	699
21.3.5	Exception-sichere Funktion	700
21.3.6	Exception-sicherer Konstruktor	701
21.3.7	Exception-sichere Zuweisung	701
21.4	Empfehlungen zur Thread-Programmierung	702
21.4.1	Warten auf die Freigabe von Ressourcen	702
21.4.2	Deadlock-Vermeidung	702
21.4.3	<code>notify_all</code> oder <code>notify_one</code> ?	703
21.4.4	Performance mit Threads verbessern?	704
22	Von der UML nach C++	705
22.1	Vererbung	706
22.2	Interface anbieten und nutzen	706
22.3	Assoziation	708
22.3.1	Aggregation	712
22.3.2	Komposition	712
23	Algorithmen für verschiedene Aufgaben	713
23.1	Algorithmen mit Strings	714
23.1.1	String splitten	714
23.1.2	String in Zahl umwandeln	715
23.1.3	Zahl in String umwandeln	718
23.1.4	Strings sprachlich richtig sortieren	718
23.1.5	Umwandlung in Klein- bzw. Großschreibung	720
23.1.6	Strings sprachlich richtig vergleichen	722
23.1.7	Von der Groß-/Kleinschreibung unabhängiger Zeichenvergleich	722
23.1.8	Von der Groß-/Kleinschreibung unabhängige Suche	723
23.2	Textverarbeitung	724
23.2.1	Datei durchsuchen	724

23.2.2	Ersetzungen in einer Datei	726
23.2.3	Lines of Code (LOC) ermitteln	728
23.2.4	Zeilen, Wörter und Zeichen einer Datei zählen	729
23.2.5	CSV-Datei lesen	730
23.2.6	Kreuzreferenzliste	731
23.3	Operationen auf Folgen	733
23.3.1	Vereinfachungen	733
23.3.2	Folge mit gleichen Werten initialisieren	735
23.3.3	Folge mit Werten eines Generators initialisieren	736
23.3.4	Folge mit fortlaufenden Werten initialisieren	737
23.3.5	Summe und Produkt	737
23.3.6	Mittelwert und Standardabweichung	738
23.3.7	Skalarprodukt	739
23.3.8	Folge der Teilsummen oder -produkte	740
23.3.9	Folge der Differenzen	742
23.3.10	Kleinstes und größtes Element finden	743
23.3.11	Elemente rotieren	744
23.3.12	Elemente verwürfeln	746
23.3.13	Dubletten entfernen	746
23.3.14	Reihenfolge umdrehen	749
23.3.15	Stichprobe	749
23.3.16	Anzahl der Elemente, die einer Bedingung genügen	750
23.3.17	Gilt ein Prädikat für alle, kein oder wenigstens ein Element einer Folge?	751
23.3.18	Permutationen	752
23.3.19	Lexikografischer Vergleich	755
23.4	Sortieren und Verwandtes	757
23.4.1	Partitionieren	757
23.4.2	Sortieren	760
23.4.3	Stabiles Sortieren	761
23.4.4	Partielles Sortieren	762
23.4.5	Das n.-größte oder n.-kleinste Element finden	764
23.4.6	Verschmelzen (merge)	765
23.5	Suchen und Finden	767
23.5.1	Element finden	767
23.5.2	Element einer Menge in der Folge finden	768
23.5.3	Teilfolge finden	770
23.5.4	Teilfolge mit speziellem Algorithmus finden	771

23.5.5	Bestimmte benachbarte Elemente finden	772
23.5.6	Bestimmte aufeinanderfolgende Werte finden	773
23.5.7	Binäre Suche.....	774
23.6	Mengenoperationen auf sortierten Strukturen	777
23.6.1	Teilmengenrelation	778
23.6.2	Vereinigung	779
23.6.3	Schnittmenge	779
23.6.4	Differenz	780
23.6.5	Symmetrische Differenz.....	781
23.7	Heap-Algorithmen	782
23.8	Vergleich von Containern auch ungleichen Typs.....	786
23.8.1	Unterschiedliche Elemente finden	786
23.8.2	Prüfung auf gleiche Inhalte	788
23.9	Rechnen mit komplexen Zahlen: Der C++-Standardtyp complex.....	789
23.10	Vermischtes	791
23.10.1	Erkennung eines Datums.....	791
23.10.2	Erkennung einer IPv4-Adresse	793
23.10.3	Erzeugen von Zufallszahlen	794
23.10.4	for_each – auf jedem Element eine Funktion ausführen.....	799
23.10.5	Verschiedene Möglichkeiten, Container-Bereiche zu kopieren.....	800
23.10.6	Vertauschen von Elementen, Bereichen und Containern	803
23.10.7	Elemente transformieren	804
23.10.8	Ersetzen und Varianten	806
23.10.9	Elemente herausfiltern	807
23.10.10	Grenzwerte von Zahltypen	809
23.10.11	Minimum und Maximum	810
23.10.12	Wert begrenzen.....	812
23.10.13	ggT, kgV und Mitte	813
23.11	Parallelisierbare Algorithmen	814
24	Datei- und Verzeichnisoperationen.....	815
24.1	Übersicht	816
24.2	Pfadoperationen.....	817
24.3	Datei oder Verzeichnis löschen.....	818
24.4	Datei oder Verzeichnis kopieren	820
24.5	Verzeichnis anlegen	821
24.6	Datei oder Verzeichnis umbenennen	822

24.7	Verzeichnis anzeigen	823
24.8	Verzeichnisbaum anzeigen	824

Teil V: Die C++-Standardbibliothek825

25 Aufbau und Übersicht827

25.1	Auslassungen.....	830
25.2	Beispiele des Buchs und die C++-Standardbibliothek	831

26 Hilfsfunktionen und -klassen833

26.1	Unterstützung der Referenzsemantik für R-Werte.....	833
26.2	Paare	835
26.3	Tupel.....	837
26.4	bitset	839
26.5	Indexfolgen	842
26.6	variant statt union	843
26.7	Funktionsobjekte.....	844
26.7.1	Arithmetische, vergleichende und logische Operationen	844
26.7.2	Binden von Argumentwerten.....	845
26.7.3	Funktionen in Objekte umwandeln	846
26.8	Templates für rationale Zahlen.....	848
26.9	Hüllklasse für Referenzen.....	850

27 Container 851

27.1	Gemeinsame Eigenschaften.....	853
27.1.1	Reversible Container.....	855
27.1.2	Initialisierungsliste (initializer_list)	856
27.1.3	Konstruktion an Ort und Stelle.....	857
27.2	Sequenzen	858
27.2.1	vector	859
27.2.2	vector<bool>	860
27.2.3	array	861
27.2.4	list.....	864
27.2.5	deque	867
27.3	Container-Adapter	868
27.3.1	stack	868
27.3.2	queue	870
27.3.3	priority_queue	871

27.4	Assoziative Container	873
27.4.1	Sortierte assoziative Container	875
27.4.2	Hash-Container	882
27.5	Sicht auf Container (span)	889
28	Iteratoren	891
28.1	Iterator-Kategorien	892
28.1.1	Anwendung von Traits	894
28.2	Abstand und Bewegen	897
28.3	Zugriff auf Anfang und Ende	898
28.3.1	Reverse-Iteratoren	899
28.4	Insert-Iteratoren	900
28.5	Stream-Iteratoren	902
29	Algorithmen	905
29.1	Algorithmen mit Prädikat	906
29.2	Übersicht	907
30	Nationale Besonderheiten	911
30.1	Sprachumgebung festlegen und ändern	912
30.1.1	Die locale-Funktionen	914
30.2	Zeichensätze und -codierung	915
30.3	Zeichenklassifizierung und -umwandlung	919
30.4	Kategorien	920
30.4.1	collate	920
30.4.2	ctype	921
30.4.3	numeric	923
30.4.4	monetary	924
30.4.5	messages	927
30.5	Konstruktion eigener Facetten	928
31	String	931
31.1	string_view für String-Literale	940
32	Speichermanagement	943
32.1	unique_ptr	943
32.2	shared_ptr	946
32.3	weak_ptr	948
32.4	new mit Speicherortangabe	949

33	Ausgewählte C-Header	951
33.1	<cassert>	951
33.2	<cctype>	952
33.3	<cmath>	953
33.4	<cstdlib>	954
33.5	<stdlib>	954
33.6	<cstring>	955
33.7	<ctime>	957
A	Anhang	959
A.1	ASCII-Tabelle	959
A.2	C++-Schlüsselwörter	961
A.3	Compilerbefehle	962
A.3.1	Optimierung	963
A.4	Rangfolge der Operatoren	963
A.5	C++-Attribute für den Compiler	965
A.6	Lösungen zu den Übungsaufgaben	966
A.7	Änderungen in der 7. Auflage	976
	Glossar	977
	Literaturverzeichnis	987
	Register	991

Vorwort

Diese Auflage unterscheidet sich von der vorherigen durch eine gründliche Überarbeitung und die Umstellung auf den 2023 von der zuständigen ISO/IEC-Arbeitsgruppe verabschiedeten C++-Standard. Abschnitt [A.7](#) bietet eine Übersicht der in diesem Buch berücksichtigten Änderungen. Das Buch ist konform zum C++23-Standard, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben – das Standarddokument [\[ISOC++\]](#) umfasst mehr als 2100 Seiten. Sie finden in diesem Buch eine verständliche und mit vielen Beispielen angereicherte Einführung in die Sprache, unabhängig vom Betriebssystem.

■ Für wen ist dieses Buch geschrieben?

Es ist für alle geschrieben, die einen kompakten und gleichzeitig in die Tiefe gehenden Einstieg in die Programmierung mit C++ suchen. Es ist für Interessierte ohne Programmiererfahrung gedacht und für andere, die diese Programmiersprache kennenlernen möchten. Beiden Gruppen dient das Buch als Lehrbuch und Nachschlagewerk.

■ Ein umfassendes Handbuch

Die ersten zehn Kapitel führen in die Sprache ein, die folgenden behandeln fortgeschrittene Themen. Die sofortige praktische Umsetzung des Gelernten anhand von leicht nachvollziehbaren Beispielen steht im Vordergrund. Klassen und Objekte, Templates und Exceptions sind Ihnen bald keine Fremdworte mehr. Es gibt 99 Übungsaufgaben – mit Musterlösungen im Anhang und zum Download. Durch das Studium dieser Kapitel werden aus Neulingen bald Fortgeschrittene – und mithilfe der weiteren Kapitel Experten.

C++ in praktischen Anwendungen

Sie finden kurze Einführungen in die Themen Programmierung paralleler Abläufe, Netzwerk-Programmierung einschließlich eines kleinen Webservers, Datenbankanbindung, grafische Benutzungsoberflächen und Zugriff auf die KIs ChatGPT und DALL·E 2. Durch den Einsatz der Boost-Library und des Qt-Frameworks wird größtmögliche Portabilität erreicht.

Softwareentwicklung ist nicht nur Programmierung

Sie lernen die Automatisierung der Programmerzeugung mit Make kennen. Das Programmdesign wird durch konkrete Umsetzungen von Design-Mustern nach C++ unterstützt. Das Kapitel über Unit-Tests zeigt, wie Programme getestet werden können. Das integrierte »C++-Rezeptbuch« mit mehr als 150 praktischen Lösungen, der Teil über die C++-Standardbibliothek, das umfangreiche Register und das detaillierte Inhaltsverzeichnis machen das Buch zu einem praktischen Nachschlagewerk für alle, die sich mit der Softwareentwicklung in C++ beschäftigen.

■ **Moderne Programmiermethodik**

Sie möchten Programme schreiben, die hohen Qualitätsansprüchen gerecht werden. Dazu gehört das Know-how, C++ richtig einzusetzen. Dass ein Programm läuft, reicht nicht. Es soll auch gut entworfen sein, möglichst wenige Fehler enthalten, selbst mit Fehlern in Daten umgehen können, verständlich geschrieben und schnell in der Ausführung sein. Deshalb liegt ein Schwerpunkt des Buchs auf guter Codierpraxis entsprechend den »C++ Core Guidelines«. Die Umsetzung wird an vielen Beispielen gezeigt.

■ **Wie benutzen Sie dieses Buch am besten?**

Es eignet sich zum Selbststudium oder als Begleitbuch zu einem Kurs oder einer Vorlesung. Man lernt am besten durch eigenes Tun! Dabei hilft es, die Beispiele herunterzuladen, sie zu studieren und zu modifizieren (<http://www.cppbuch.de/>). Auch wird empfohlen, die Übungsaufgaben zu lösen. Um sowohl Anfängern als auch Fortgeschrittenen gerecht zu werden, gibt es einfache, aber auch schwerere Aufgaben. Wenn Ihnen eine Lösung nicht gelingt – einfach bei den Lösungen im Anhang nachsehen bzw. im Verzeichnis *cppbuch/loesungen* der downloadbaren Beispiele. Und dann versuchen, die Lösungen nachzuvollziehen.

■ **Wo finden Sie was?**

Bei der Programmentwicklung wird häufig das Problem auftauchen, etwas nachschlagen zu müssen. Es gibt die folgenden Hilfen: Erklärungen zu Begriffen sind im *Glossar* aufgeführt. Es gibt ein umfangreiches *Stichwortverzeichnis* und ein detailliertes *Inhaltsverzeichnis*. Der Anhang enthält unter anderem verschiedene hilfreiche Tabellen und die Lösungen der Übungsaufgaben. Auf der Webseite <http://www.cppbuch.de/> finden Sie die Software zu diesem Buch. Sie enthält alle Programmbeispiele und die Lösungen zu den Aufgaben. Sie finden dort auch weitere Hinweise, Errata und nützliche Internet-Links.

■ **Zu guter Letzt**

Allen Menschen, die dieses Buch durch Hinweise und Anregungen verbessern halfen, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Insbesondere Prof.Dr .Ulrich Eisenecker danke ich für seine hilfreichen Kommentare. Frau Irene Weilhart vom Hanser Verlag und dem Lektorat danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Bremen, im Juni 2023

Ulrich Breymann

■ 1.4 Das erste Programm

Das klassische erste Programm ist ein Mini-Programm, das einfach nur »Hello World!« ausgibt. Das Listing 1.1 zeigt den Programmcode.

Listing 1.1: Hello World-Programm (*cppbuch/k1/hello.cpp*)

```
#include <iostream>

int main()
{
    std::cout << "Hello_World!\n";
}
```

Die Entwicklung eines einfachen Programms lernen Sie hier an einer ebenfalls einfachen Aufgabe kennen: Es sollen zwei Zahlen addiert werden. Dabei wird Ihnen zunächst das Programm vorgestellt und gleich danach erfahren Sie, wie Sie es eingeben und zum Laufen bringen können. Der erste Schritt besteht in der Formulierung der Aufgabe. Sie lautet: »Lies zwei Zahlen a und b von der Tastatur ein. Berechne die Summe beider Zahlen und zeige das Ergebnis auf dem Bildschirm an.« Die Aufgabe ist so einfach, wie sie sich anhört! Im zweiten Schritt wird die Aufgabe in die Teilaufgaben »Eingabe«, »Berechnung« und »Ausgabe« zerlegt:

Listing 1.2: Programmentwurf

```
int main()                // Noch tut dieses Programm nichts!
{
    // Lies zwei Zahlen ein
    /* Berechne die Summe beider
       Zahlen */
    // Zeige das Ergebnis auf dem Bildschirm an
}
```

Sie sehen einen einfachen Entwurf, der gleichzeitig ein C++-Programm ist. Es tut allerdings noch nichts. Es bedeuten:

<code>int</code>	ganze Zahl zur Rückgabe
<code>main</code>	Name der Funktion, mit der jedes Programm beginnt
<code>()</code>	Innerhalb dieser Klammern können der Funktion Informationen mitgegeben werden.
<code>{ }</code>	Block
<code>/* ... */</code>	Kommentar, der über mehrere Zeilen gehen kann
<code>// ...</code>	Kommentar bis Zeilenende

Ein durch `{` und `}` begrenzter *Block* enthält die Anweisungen an den Rechner. Der *Compiler* übersetzt den Programmtext in eine rechnerverständliche Form. Im Block sind lediglich *Kommentare* enthalten und noch keine Anweisungen an den Computer, sodass unser Programm nichts tut.

Kommentare werden einschließlich der Kennungen vom Compiler vollständig ignoriert. Ein Kommentar, der mit `/*` beginnt, wird mit der ersten `*/`-Zeichenkombination beendet,

auch wenn er sich über mehrere Zeilen erstreckt. Ein mit // beginnender Kommentar endet am Ende der Zeile. Auch wenn Kommentare ignoriert werden, sind sie doch sinnvoll für alle, die ein Programm lesen. Die Anweisungen zu erläutern hilft denjenigen, die Ihre Nachfolge antreten, weil Sie befördert worden sind oder die Firma verlassen haben. Kommentare sind auch wichtig für den Autor eines Programms, der ohne sie nach einem halben Jahr nicht mehr weiß, warum er gerade diese oder jene komplizierte Anweisung geschrieben hat. Sie sehen:

Ein Programm ist ein Text!

- Der Text hat eine Struktur entsprechend den C++-Sprachregeln: Es gibt Wörter wie hier das Schlüsselwort `main`. In C++ werden alle Schlüsselwörter kleingeschrieben. Es gibt weiterhin Zeilen, Satzzeichen und Kommentare.
- Die Bedeutung des Textes wird durch die Zeilenstruktur nicht beeinflusst. Mit \ und folgendem `ENTER` ist eine Worttrennung am Zeilenende möglich. Das Zeichen \ wird »Backslash« genannt. Mit dem Symbol `ENTER` ist hier und im Folgenden die Betätigung der großen Taste `↵` rechts auf der Tastatur gemeint.
- Groß- und Kleinschreibung werden unterschieden! `main()` ist nicht dasselbe wie `Main()`.

Weil die Zeilenstruktur für den Rechner keine Rolle spielt, kann der Programmtext nach Gesichtspunkten der Lesbarkeit gestaltet werden. Im dritten Schritt müssen nur noch die Inhalte der Kommentare als C++-Anweisungen formuliert werden. Dabei bleiben die Kommentare zur Dokumentation stehen, wie im Beispielprogramm unten zu sehen ist.



Hinweis

Alle Programmbeispiele sind von der Internet-Seite <http://cppbuch.de/> herunterladbar. In den Listings finden Sie den zugehörigen Dateinamen in der Überschrift oder in der ersten Zeile des Listings.

Listing 1.3: Summe zweier Zahlen berechnen (*cppbuch/k1/summe.cpp*)

```
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    int summand1 {0};
    int summand2 {0};
    // Lies zwei Zahlen ein
    cout << "_Zwei_ganze_Zahlen_eingeben:";
    cin >> summand1 >> summand2;
    /* Berechne die Summe beider Zahlen
    */
    int summe = summand1 + summand2;
    // Zeige das Ergebnis auf dem Bildschirm an
    cout << "Summe=" << summe << '\n';
    return 0;
}
```

Es sind einige neue Worte dazugekommen, die hier kurz erklärt werden. Machen Sie sich keine Sorgen, wenn Sie nicht alles auf Anhieb verstehen! Alles wird im Verlauf des Buchs wieder aufgegriffen und vertieft. Wie das Programm zum Laufen gebracht wird, werden Sie bald erfahren.

<code>#include<iostream></code>	Einbindung der Ein-/Ausgabefunktionen. Diese Zeile muss in jedem Programm stehen, das Eingaben von der Tastatur erwartet oder Ausgaben auf den Bildschirm bringt. Sie können sich vorstellen, dass der Compiler beim Übersetzen des Programms an dieser Stelle erst alle zur Ein- und Ausgabe notwendigen Informationen liest. Details folgen in Abschnitt 2.3.
<code>using namespace std;</code>	Der Namensraum (englisch <i>namespace</i>) <code>std</code> wird benutzt. Schreiben Sie es einfach in jedes Programm an diese Stelle und haben Sie Geduld: Erklärungen folgen auf den Seiten 63 und 151.
<code>int main()</code>	<code>main()</code> ist die Funktion, mit der jedes Programm beginnt (es gibt auch andere Funktionen). Der zu <code>main()</code> gehörende Programmcode wird durch die geschweiften Klammern <code>{</code> und <code>}</code> eingeschlossen. Ein mit <code>{</code> und <code>}</code> begrenzter Bereich heißt <i>Block</i> . Mit <code>int</code> ist gemeint, dass die <code>main()</code> -Funktion nach Beendigung eine Zahl vom Typ <code>int</code> (= ganze Zahl) an das Betriebssystem zurückgibt. Dazu dient die unten beschriebene <code>return</code> -Anweisung. Normalerweise – das heißt bei ordnungsgemäßem Programmablauf – wird die Zahl 0 zurückgegeben. Andere Zahlen können über das Betriebssystem einen Fehler signalisieren.
<code>int summand1 {0};</code> <code>int summand2 {0};</code> <code>int summe = ...</code>	<i>Deklaration</i> (Bekanntmachung) von Objekten: Mitteilung an den Compiler, der ab jetzt die Namen <code>summand1</code> , <code>summand2</code> und <code>summe</code> innerhalb des Blocks <code>{ }</code> kennt. Hier wird gleichzeitig Speicherplatz bereitgestellt. Es gibt verschiedene Zahlentypen in C++. Mit <code>int</code> sind ganze Zahlen gemeint: <code>summe</code> , <code>summand1</code> , <code>summand2</code> sind ganze Zahlen. Oft ist es sinnvoll, einen Anfangswert festzulegen, etwa 0, wie hier bei <code>summand1</code> und <code>summand2</code> .
<code>;</code>	Ein Semikolon beendet jede Deklaration und jede Anweisung (aber keine Verbundanweisung, siehe weiter unten).
<code>cin</code>	Eingabe: Der Doppelpfeil zeigt hier in Richtung des Objekts, das ja von der Tastatur einen neuen Wert aufnehmen soll. Die Information fließt von der Eingabe <code>cin</code> zum Objekt <code>summand1</code> beziehungsweise zum Objekt <code>summand2</code> .
<code>cout</code>	Ausgabe: <code>cout</code> (Abkürzung für <i>character out</i> oder <i>console out</i>) ist die Standardausgabe. Der Doppelpfeil deutet an, dass alles, was rechts davon steht, zur Ausgabe <code>cout</code> gesendet wird, zum Beispiel <code>cout << summand1;</code> . Wenn mehrere Dinge ausgegeben werden sollen, sind sie durch <code><<</code> zu trennen.

"Text"	beliebige Zeichenkette, die die Anführungszeichen selbst nicht enthalten darf, weil sie als Anfangs- beziehungsweise Endmarkierung einer Zeichenfolge dienen. Wenn die Zeichenfolge die Anführungszeichen enthalten soll, sind diese als \" zu schreiben: <code>cout << "\"C++\" ist der Nachfolger von \"C\"!\";</code> erzeugt die Bildschirmausgabe <code>"C++" ist der Nachfolger von "C"!</code> .
'\n'	Die Ausgabe des Zeichens <code>\n</code> bewirkt eine neue Zeile.
<code>return 0;</code>	Unser Programm läuft einwandfrei, es gibt daher 0 an das Betriebssystem zurück. Diese Anweisung darf in der <code>main()</code> -Funktion fehlen, dann wird automatisch 0 zurückgegeben.

`<iostream>` ist ein Header. Dieser aus dem Englischen stammende Begriff (head = dt. Kopf) drückt aus, dass Zeilen dieser Art am Anfang eines Programmtextes stehen. Der Begriff wird im Folgenden verwendet, weil es keine gängige deutsche Entsprechung gibt. Einen Header mit einem Dateinamen gleichzusetzen, ist meistens richtig, nach dem C++-Standard aber nicht zwingend. *Hinweis:* Tatsächlich wird ein Programm zunächst von einem vorgeschalteten *Präprozessor* bearbeitet, der das Ergebnis der Bearbeitung an den eigentlichen Compiler weiterleitet. Wenn im Folgenden also von »Compiler« die Rede ist, ist meistens auch der Präprozessor gemeint.

`summand1`, `summand2` und `summe` sind veränderliche Daten und heißen Variablen. Sie sind Objekte eines vordefinierten Grunddatentyps für ganze Zahlen (`int`), mit denen die üblichen Ganzzahloperationen wie `+` und `-` durchgeführt werden können. Der Begriff »Variable«³ wird für ein veränderliches Objekt gebraucht. Für Variablen gilt:

- Sie müssen deklariert werden. `int summe;` ist eine Deklaration, wobei `int` der *Datentyp* des Objekts `summe` ist, der die Eigenschaften beschreibt. Entsprechendes gilt für `summand1` und `summand2`. Die Objektnamen sind frei wählbar im Rahmen der unten angegebenen Grammatikregeln. Unter *Deklaration* wird verstanden, dass der Name dem Compiler bekannt gemacht wird. Wenn dieser Name danach im Programm versehentlich falsch geschrieben wird, kennt der Compiler den falschen Namen nicht und gibt eine Fehlermeldung aus. Somit dienen Deklarationen der Programmsicherheit.
- Objektnamen bezeichnen Bereiche im Speicher des Computers, deren Inhalte verändert werden können. Die Namen sind symbolische Adressen, unter denen der Wert gefunden wird. Über den Namen kann dann auf den aktuellen Wert zugegriffen werden (siehe Abbildung 1.1).

Der Speicherplatz wird vom Compiler reserviert. Man spricht dann von der *Definition* der Objekte. Definition und Deklaration werden unterschieden, weil es auch Deklarationen ohne gleichzeitige Definition gibt, doch davon später mehr. Zunächst sind die Deklarationen zugleich Definitionen. Abbildung 1.2 zeigt den Ablauf der Erzeugung eines lauffähigen Programms. Ein Programm ist ein Text, von Menschenhand geschrieben (über Programmgeneratoren soll hier nicht gesprochen werden) und dem Rechner unverständlich. Um dieses Programm auszuführen, muss es erst vom Compiler in eine für den Computer verständliche Form übersetzt werden.

³ Anmerkung für Menschen mit Vorkenntnissen: Aus reiner C++-Sicht ist eine Variable eine Deklaration eines Objekts (oder einer Referenz) und sagt nichts darüber aus, ob es konstant oder veränderlich ist. Die Eigenschaft »konstant« wird durch das Schlüsselwort `const` bewirkt.

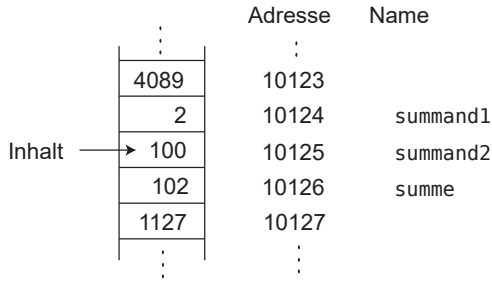


Abbildung 1.1: Speicherbereiche mit Adressen

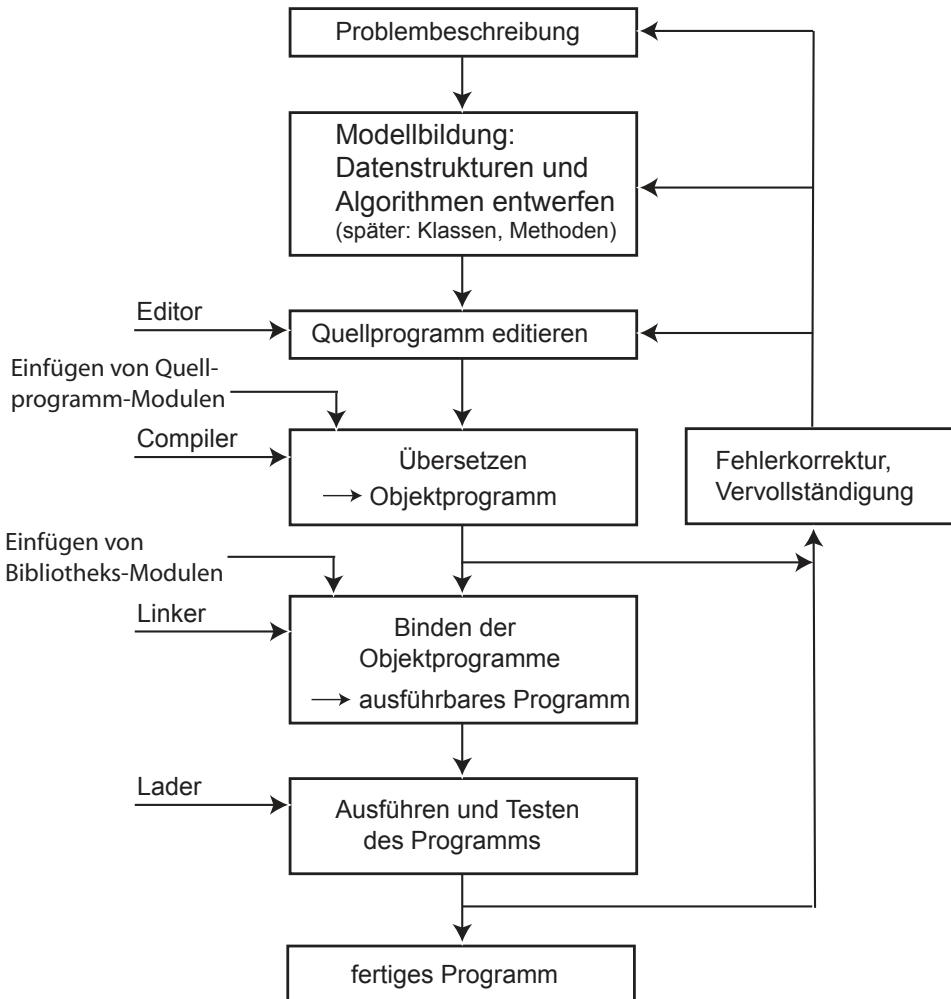


Abbildung 1.2: Erzeugung eines lauffähigen Programms

Der Compiler ist selbst ein Programm, das bereits in maschinenverständlicher Form vorliegt und speziell für diese Übersetzung zuständig ist. Nach Eingabe des Programmtextes mit dem Editor können Sie den Compiler starten.

Ein Programmtext wird auch »Quelltext« oder »Quellcode« (englisch *source code*) genannt. Der Compiler erzeugt aus dem Quellcode den Objektcode, der noch nicht ausführbar ist. Hinter den einfachen Anweisungen `cin >> ...` und `cout << ...` verbergen sich eine Reihe von Aktivitäten wie die Abfrage der Tastatur und die Ansteuerung des Bildschirms, die nicht speziell programmiert werden müssen, weil sie schon in vorübersetzter Form in Bibliotheksdateien vorliegen. Die Aufrufe dieser Aktivitäten im Programm müssen mit den dafür vorgesehenen Algorithmen in den Bibliotheksdateien zusammengebunden werden, eine Aufgabe, die der *Linker* übernimmt, auch *Binder* genannt. Der Linker bindet Ihren Objektcode mit dem Objektcode der Bibliotheksdateien zusammen und erzeugt daraus ein ausführbares Programm, das nun gestartet werden kann. Der Aufruf des Programms bewirkt, dass der *Lader*, eine Funktion des Betriebssystems, das Programm in den Rechnerspeicher lädt und startet. Diese Schritte werden stets ausgeführt, auch wenn sie in den Programmentwicklungsumgebungen verborgen ablaufen. Bibliotheksmodule können auch während der Programmausführung geladen werden (nicht im Bild dargestellt).

Wie bekomme ich ein Programm zum Laufen?

Nachdem Sie den Programmtext mit einem Editor geschrieben haben, speichern Sie ihn als Datei *summe.cpp* ab. Öffnen Sie nun unter Windows eine Konsole (cmd-Eingabeaufforderung oder PowerShell) bzw. ein Terminal unter Linux oder macOS, und wechseln mit `cd` in das Verzeichnis, wo Sie *summe.cpp* abgespeichert haben. Die Übersetzung, auch *Compilation* genannt, wird mit

```
g++ -o summe.exe summe.cpp
```

gestartet. Das Programm wird durch Eintippen von *summe.exe* (oder *./summe.exe*, wenn das aktuelle Verzeichnis nicht im Pfad ist) gestartet. Eigentlich verbergen sich hinter dem Aufruf des Compilers zwei Schritte:

```
g++ -c summe.cpp           compilieren (summe.o wird erzeugt)
g++ -o summe.exe summe.o   linken
g++ -o summe.exe summe.cpp beide Schritte zusammengefasst
```

Die Objektdateien können je nach System die Endung *.o* oder *.obj* tragen. Wenn `g++ -std=c++23 -o summe.exe summe.cpp` geschrieben wird, soll der Compiler den C++-Standard 2023 verwenden. Das ist bei diesem einfachen Programm nicht notwendig, weil es keine der neueren Eigenschaften nutzt.

Eine integrierte Entwicklungsumgebung lässt die genannten Schritte per Tastendruck ablaufen, wie Sie gleich sehen.

switch/case-lokale Variablen

Wenn in der case-Anweisung eine lokale Variable angelegt wird, muss sie in einem eigenen Gültigkeitsbereich (scope) mit geschweiften Klammern {} gekapselt werden:

```
case 'D':
    zahl = 500;
    {
        auto x{zahl*10};           // Beginn des lokalen Gültigkeitsbereichs.
        cout << x << '\n';
    }                             // Die Gültigkeit von x endet hier.
    break;
```

Das Weglassen der geschweiften Klammern führt zu einer Fehlermeldung des Compilers. Wie bei der if-Anweisung ist es möglich, eine lokale Variable für die switch()-Anweisung anzulegen. Die Variable wird in den runden Klammern initialisiert, also etwa `switch(int x=1; auswahl)`.

1.8.5 Wiederholungen

Häufig muss die gleiche Teilaufgabe oft wiederholt werden. Denken Sie nur an die Summation von Tabellenspalten in der Buchführung oder an das Suchen einer bestimmten Textstelle in einem Buch. In C++ gibt es zur Wiederholung von Anweisungen drei verschiedene Arten von Schleifen. In einer Schleife wird nach Abarbeitung einer Teilaufgabe (zum Beispiel Addition einer Zahl) wieder an den Anfang zurückgekehrt, um die gleiche Aufgabe noch einmal auszuführen (Addition der nächsten Zahl). Durch bestimmte Bedingungen gesteuert, zum Beispiel Ende der Tabelle, bricht irgendwann die Schleife ab.

Schleifen mit while

Abbildung 1.8 zeigt die Syntax von while-Schleifen.



Abbildung 1.8: Syntaxdiagramm einer while-Schleife

AnweisungOderBlock ist wie auf Seite 66 definiert. Die Bedeutung einer while-Schleife ist: Solange die Bedingung wahr ist, die Auswertung also ein Ergebnis `true` oder ungleich 0 liefert, wird die Anweisung bzw. der Block ausgeführt. Die Bedingung wird auf jeden Fall zuerst geprüft. Wenn die Bedingung von vornherein unwahr ist, wird die Anweisung gar nicht erst ausgeführt (siehe Abbildung 1.9).

Die Anweisung oder der Block innerhalb der Schleife heißt *Schleifenkörper*. Schleifen können wie if-Anweisungen beliebig geschachtelt werden.

```
while (Bedingung1)           // geschachtelte Schleifen, ohne und mit geschweiften Klammern
    while (Bedingung2) {
        .....
        while (Bedingung3) {
            .....
        }
    }
}
```

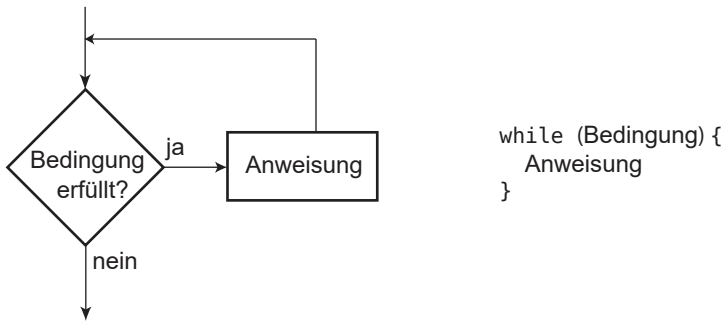


Abbildung 1.9: Flussdiagramm für eine while-Anweisung

Beispiele

- Unendliche Schleife:

```
while (true)
    Anweisung
```

- Anweisung wird nie ausgeführt (unerreichbarer Programmcode):

```
while (false)
    Anweisung
```

- Summation der Zahlen 1 bis 99:

```
int sum {0};
int n {1};
constexpr int grenze {99};
while (n <= grenze) {
    sum += n++;
}
```

- Berechnung des größten gemeinsamen Teilers $\text{ggT}(x, y)$ für zwei natürliche Zahlen x und y nach Euklid. Es gilt:

- $\text{ggT}(x, x)$, also $x == y$: Das Resultat ist x .
- $\text{ggT}(x, y)$ bleibt unverändert, falls die größere der beiden Zahlen durch die Differenz ersetzt wird, also $\text{ggT}(x, y) == \text{ggT}(x, y-x)$, falls $x < y$.

Das Ersetzen der Differenz geschieht im folgenden Beispiel iterativ, also durch eine Schleife.

Listing 1.15: Beispiel für while-Schleife (*cppbuch/k1/ggt.cpp*)

```
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    int x {0};
    int y {0};
    cout << "2_Zahlen_>_0_eingeben_:";
    cin >> x >> y;
    cout << "Der_ggT_von_" << x << "_und_" << y << "_ist_";
    while (x != y) {
```

```

if (x > y) {
    x -= y;
}
else {
    y -= x;
}
}
cout << x << '\n';
}

```

Innerhalb einer Schleife muss es eine Veränderung derart geben, dass die Bedingung irgendwann einmal unwahr wird, sodass die Schleife abbricht (man sagt auch *terminiert*). Unbeabsichtigte »unendliche« Schleifen sind ein häufiger Programmierfehler. Im ggT-Beispiel ist leicht erkennbar, dass die Schleife irgendwann beendet sein *muss*:

1. Bei jedem Durchlauf wird mindestens eine der beiden Zahlen kleiner.
2. Die Zahl 0 kann nicht erreicht werden, da immer eine kleinere von einer größeren Zahl subtrahiert wird. Die `while`-Bedingung schließt die Subtraktion gleich großer Zahlen aus, und nur die könnte 0 ergeben.

Daraus allein ergibt sich, dass die Schleife beendet wird, und zwar in weniger als x Schritten, wenn x die anfangs größere Zahl war. Im Allgemeinen sind es erheblich weniger, wie eine genauere Analyse ergibt.



Tipp

Die Anweisungen zur Veränderung der Bedingung sollen möglichst an das Ende des Schleifenkörpers gestellt werden, um sie leicht finden zu können.

Schleifen mit `do while`

Abbildung 1.10 zeigt die Syntax einer `do while`-Schleife.

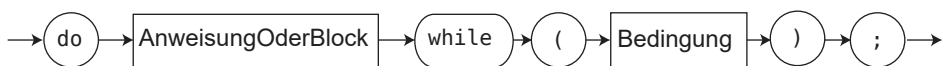


Abbildung 1.10: Syntaxdiagramm einer `do while`-Schleife

AnweisungOderBlock ist wie auf Seite 66 definiert. Die Anweisung oder der Block einer `do while`-Schleife wird ausgeführt, und *erst anschließend* wird die Bedingung geprüft. Ist sie wahr, wird die Anweisung ein weiteres Mal ausgeführt usw. Die Anweisung wird also mindestens einmal ausgeführt. Im Flussdiagramm ist die Anweisung ein Block (siehe rechts in der Abbildung 1.11).

`do while`-Schleifen eignen sich unter anderem gut zur sicheren Abfrage von Daten, indem die Abfrage so lange wiederholt wird, bis die abgefragten Daten in einem plausiblen Bereich liegen, wie im Primzahlprogramm unten zu sehen ist. Es empfiehlt sich zur besseren Lesbarkeit, `do while`-Schleifen strukturiert zu schreiben. Die schließende geschweifte Klammer soll genau unter dem ersten Zeichen der Zeile stehen, die die öffnende geschweifte Klammer enthält. Dadurch und durch Einrücken des dazwischen stehenden Textes ist sofort der Schleifenkörper erkennbar.

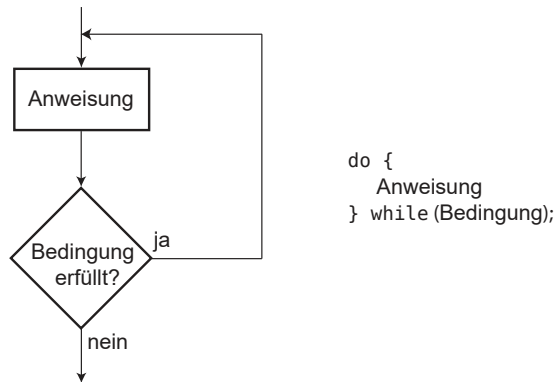


Abbildung 1.11: Flussdiagramm für eine do while-Anweisung

```
do {
    Anweisungen
} while (Bedingung);
```

Das *direkt hinter* die abschließende geschweifte Klammer geschriebene `while` macht unmittelbar deutlich, dass dieses `while` zu einem `do` gehört. Das ist besonders wichtig, wenn der Schleifenkörper in einer Programmliste über die Seitengrenze ragt. Eine `do while`-Schleife kann stets in eine `while`-Schleife umgeformt werden (und umgekehrt).

Listing 1.16: Berechnen einer Primzahl mit `do while` (`cppbuch/k1/primzahl.cpp`)

```
#include <cmath>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    cout << "Berechnung_der_ersten_Primzahl,_die_>="
         << "_der_eingegebenen_Zahl_ist\n";
    // Hinweis: Mehrere, durch " getrennte Texte ergeben eine lange Zeile in der Ausgabe.
    long zahl {0L};
    // do while-Schleife zur Eingabe und Plausibilitätskontrolle
    do {
        // Abfrage, solange zahl ≤ 3 ist
        cout << "Zahl_>_3_eingeben_:";
        cin >> zahl;
    } while (zahl <= 3);

    if (zahl % 2 == 0) { // Falls zahl gerade ist, wird die nächste
                       // ungerade Zahl als Startwert genommen.
        ++zahl;
    }
    bool gefunden {false};
    do {
        // limit = Grenze, bis zu der gerechnet werden muss.
        // sqrt() arbeitet mit double, daher wird der Typ explizit umgewandelt.
        const long limit {1 + static_cast<long>(sqrt(static_cast<double>(zahl)))};
        long rest {0L};
```

```

long teiler {1L};
do { // Kandidat zahl durch alle ungeraden Teiler dividieren
    teiler += 2;
    rest = zahl % teiler;
} while (rest > 0 && teiler < limit);

if (rest > 0 && teiler >= limit) {
    gefunden = true;
}
else { // sonst nächste ungerade Zahl untersuchen
    zahl += 2;
}
} while (!gefunden);
cout << "Die_nächste_Primzahl_ist_" << zahl << '\n';
}

```

! Tipp

In do-while-Schleifen wird die Bedingung erst am Ende abgefragt, sie ist beim Lesen also nicht sofort zu finden. Deswegen verwenden Sie do-while nur, wenn Sie erreichen wollen, dass eine Schleife mindestens einmal durchlaufen werden soll.

Schleifen mit for

Die letzte Art von Schleifen ist die for-Schleife. Sie wird häufig eingesetzt, wenn die Anzahl der Wiederholungen vorher feststeht, aber das muss durchaus nicht so sein. Abbildung 1.12 zeigt die Syntax einer for-Schleife.

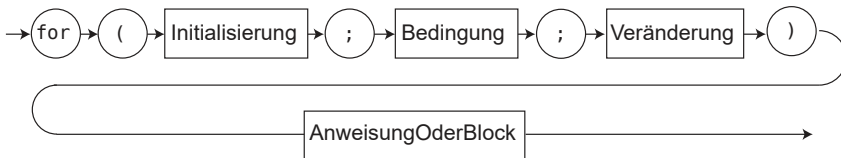


Abbildung 1.12: Syntaxdiagramm einer for-Schleife

Der zu wiederholende Teil (Anweisung oder Block) wird auch Schleifenkörper genannt. Beispiel: ASCII-Tabelle im Bereich 65 ... 69 ausgeben

```

for (int i = 65; i <= 69; ++i) {
    cout << i << " " << static_cast<char>(i) << '\n';
}

```

Bei der Abarbeitung werden die folgenden Schritte durchlaufen:

1. Durchführung der Initialisierung, zum Beispiel Startwert für eine Laufvariable festlegen. Eine Laufvariable wird wie `i` in der Beispielschleife als Zähler benutzt.
2. Prüfen der Bedingung.
3. Falls die Bedingung wahr ist, zuerst die Anweisung und dann die Veränderung ausführen.

Die Laufvariable `i` kann auch außerhalb der runden Klammern deklariert werden, dies gilt aber als schlechter Stil. Der Unterschied besteht darin, dass außerhalb der Klammern deklarierte Laufvariablen noch über die Schleife hinaus gültig sind.

```
int i; // nicht empfohlen
for (i = 0; i < 100; ++i) {
    // Programmcode, i ist hier bekannt
}
// i ist weiterhin bekannt ...
```

Im Fall der Deklaration innerhalb der runden Klammern bleibt die Gültigkeit auf den Schleifenkörper beschränkt:

```
for (int i = 0; i < 100; ++i) { // empfohlen
    // Programmcode, i ist hier bekannt
}
// i ist hier nicht mehr bekannt
```

Die zweite Art erlaubt es, `for`-Schleifen als selbstständige Programmteile hinzuzufügen oder zu entfernen, ohne Deklarationen in anderen Schleifen ändern zu müssen. Derselbe Mechanismus gilt für Deklarationen in den runden Klammern von `if`- und `switch`-Anweisungen.

Listing 1.17: Beispiel für `for`-Schleife (*cppbuch/k1/fakultaet.cpp*)

```
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    cout << "Fakultät_berechnen. _Zahl_>=_0?_:";
    int n {0};
    cin >> n;

    long fak {1L};
    for (int i = 2; i <= n; ++i) {
        fak *= i;
    }
    cout << n << "!_==_" << fak << '\n';
}
```

Verändern Sie niemals die Laufvariable innerhalb des Schleifenkörpers! Das Auffinden von Fehlern würde durch die Änderung erschwert.

```
for (int i = 65; i < 70; ++i) {
    // eine Seite Programmcode
    --i; // irgendwo dazwischen erzeugt eine unendliche Schleife
    // noch mehr Programmcode
}
```

Auch wenn der Schleifenkörper nur aus einer Anweisung besteht, wird empfohlen, ihn in geschweiften Klammern `{ }` einzuschließen.

Äquivalenz von for und while

Eine for-Schleife entspricht direkt einer while-Schleife, sie ist im Grunde nur eine Umformulierung, solange nicht continue vorkommt, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird:

```
for (Initialisierung; Bedingung; Veraenderung)
    Anweisung
```

ist äquivalent zu:

```
{
    Initialisierung;
    while (Bedingung) {
        Anweisung
        Veraenderung;
    }
}
```

Die äußeren Klammern sorgen dafür, dass in der Initialisierung deklarierte Variablen wie bei der for-Schleife nach dem Ende nicht mehr gültig sind. Anweisung kann wie immer auch eine Verbundanweisung (Block) sein, in der mehrere Anweisungen stehen können, durch geschweifte Klammern begrenzt. Die umformulierte Entsprechung des obigen Beispiels (ASCII-Tabelle von 65 ... 69 ausgeben) lautet:

```
{
    int i {65}; // Initialisierung
    while (i < 70) { // Bedingung
        cout << i << " " << static_cast<char>(i) << '\n'; // Anweisung
        ++i; // Veränderung
    }
}
```

float- oder double-Laufvariablen vermeiden!

Wegen der Rechenungenauigkeit kann es bei nicht-integralen Typen wie double oder float zu nicht vorhersagbarem Verhalten kommen. Das Beispiel:

```
for (double d = 0.4; d <= 1.2; d += 0.4) {
    cout << d << '\n';
}
```

lässt auf den ersten Blick die Ausgabe 0.4, 0.8, 1.2 erwarten, tatsächlich werden auf meinem System nur die zwei Zahlen 0.4 und 0.8 ausgegeben. Wenn ich jedoch

```
for (double d = 0.5; d <= 1.5; d += 0.5) {
    cout << d << '\n';
}
```

ausführe, werden wie erwartet die drei Zahlen 0.5, 1 und 1.5 angezeigt. Der Grund liegt darin, dass 0.5 im Binärsystem exakt darstellbar ist, 0.4 jedoch nicht. Schon ein Unterschied im letzten Bit lässt den Vergleich auf Gleichheit scheitern. Ganz ungünstig kann sich die Prüfung auf Ungleichheit mit != auswirken:

Die Ausgabe des Programms ist:

```
Objekt 0 wird erzeugt.  
main wird begonnen  
Objekt 1 wird erzeugt.  
    neuer Block  
    Objekt 2 wird erzeugt.  
    Block wird verlassen  
    Objekt 2 wird zerstört.  
main wird verlassen  
Objekt 1 wird zerstört.  
Objekt 0 wird zerstört.
```

Der Destruktor von Objekten mit statischer Lebensdauer (`static` oder globale Objekte) wird nicht nur beim Verlassen eines Programms mit `return`, sondern auch beim Verlassen mit `exit()` aufgerufen. Im Gegensatz zum normalen Verlassen eines Blocks wird der Speicherplatz bei `exit()` jedoch nicht freigegeben.

■ 3.7 Wie kommt man zu Klassen und Objekten? Ein Beispiel

Es kann hier keine allgemeine Methode gezeigt werden, wie man von einer Aufgabe zu Klassen und Objekten kommt. Es wird jedoch anhand eines Beispiels ein erster Eindruck vermittelt, wie der Weg von einer Problemstellung zum objektorientierten Programm aussehen kann.

Es geht hier um ein Programm, das zu einer gegebenen Personalnummer den Namen heraus sucht. Ähnlichkeiten mit der Aufgabe 1.25 von Seite 112 sind beabsichtigt. Gegeben sei eine Datei `daten.txt` mit den Namen und den Personalnummern der Mitarbeiter. Dabei folgt auf eine Zeile mit dem Namen eine Zeile mit der Personalnummer. Das `#`-Zeichen ist die Endekennung. Der Inhalt der Datei ist:

```
Hans Nerd  
06325927  
Juliane Hacker  
19236353  
Michael Ueberflieger  
73643563  
#
```

Einige Analyse-Überlegungen

Um die Problemstellung zu verdeutlichen, wird sie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Es handelt sich dabei nur um *Möglichkeiten*, nicht um den einzig wahren Lösungsansatz (den es nicht gibt).

1. In der Analyse geht es zunächst einmal darum, den typischen Anwendungsfall (englisch *use case*) *in der Sprache des (späteren Programm-)Anwenders* zu beschreiben. Ein ganz konkreter Anwendungsfall, Szenario genannt, ist ein weiteres Hilfsmittel zum Verständnis dessen, was das Programm tun soll.
2. Im zweiten Schritt wird versucht, beteiligte Objekte, ihr Verhalten und ihr Zusammenwirken zu identifizieren.



Anwendungsfall (use case)

Das Programm wird gestartet. Alle Namen und Personalnummern werden zur Kontrolle ausgegeben (weil es hier nur wenige sind). Anschließend erfragt das Programm eine Personalnummer und gibt daraufhin den zugehörigen Namen aus oder aber die Meldung, dass der Name nicht gefunden wurde. Die Abfrage soll beliebig oft möglich sein. Wird X oder x eingegeben, beendet sich das Programm.

Für einen konkreten Anwendungsfall (= Szenario) wird die oben dargestellte Datei *daten.txt* verwendet.



Szenario

Das Programm wird gestartet und gibt aus:

```
Hans Nerd 06325927
Juliane Hacker 19236353
Michael Ueberflieger 73643563
```

Anschließend erfragt das Programm eine Personalnummer. Die Person vor dem Bildschirm (User) gibt 19236353 ein. Das Programm gibt Juliane Hacker aus und fragt wieder nach einer Personalnummer. Jetzt wird 99999 eingegeben. Das Programm meldet nicht gefunden! und fragt wieder nach einer Personalnummer. Jetzt wird X eingegeben. Das Programm beendet sich.

Objekte und Operationen identifizieren

Im nächsten Schritt wird versucht, die beteiligten Objekte und damit ihre Klassen zu identifizieren und eine Beschreibung ihres Verhaltens zu finden.

In der nicht-objektorientierten Lösung zur Vorläuferaufgabe 1.25 werden alle Aktivitäten in `main()` abgehandelt. Das ist unvorteilhaft, weil die Funktionalität damit nicht einfach in ein anderes Programm transportiert werden kann. Deswegen bietet es sich an, die Aktivitäten in ein eigens dafür geschaffenes Objekt zu verlegen. Die Klasse dazu sei hier etwas hochtrabend *Personalverwaltung* genannt. Was müsste so ein Objekt tun?

1. Die Datei *daten.txt* lesen und die gelesenen Daten speichern. Der Einfachheit halber wird hier angenommen, dass keine andere Datei zur Auswahl steht.
2. Die Daten auf dem Bildschirm *ausgeben*.
3. Einen *Dialog* mit dem Benutzer *führen*, in dem nach der Personalnummer gefragt wird.

Diese drei Punkte und die Kenntnis der Datei führen zu entsprechenden Schlussfolgerungen. Dabei sind im ersten Schritt die Substantive (Hauptworte) als Kandidaten für Klassen

zu sehen und Verben (Tätigkeitsworte) als Methoden. Passivkonstruktionen sollen dabei vorher stets in Aktivkonstruktionen verwandelt werden, d.h. *ausgeben* ist besser als *die Ausgabe erfolgt*.

1. Eine Auswahl der Datei ist hier nicht vorgesehen. Ein Objekt der Klasse `Personalverwaltung` soll daher schon beim Anlegen die Datei einlesen und die Daten speichern. Das übernimmt am besten der Konstruktor, dem der Dateiname übergeben wird.
 - Die gelesenen Daten gehören zu Personen. Jede *Person* hat einen Namen und eine Personalnummer. Es bietet sich an, Name und Personalnummer in einer Klasse `Person` zu kapseln. Aus Gründen der Einfachheit sollen Vor- und Nachname nicht getrennt gehalten werden; ein Name genügt.
 - Die Personalnummer soll nicht als `int` vorliegen, sondern als `string`, damit nicht führende Nullen (siehe Datei oben) beim Einlesen verschluckt werden oder zu einer Interpretation als Oktalzahl führen. Außerdem könnte es Nummernsysteme mit Buchstaben und Zahlen geben.
 - Die Klasse `Personalverwaltung` soll die Daten speichern. Dafür bietet sich ein `vector<Person>` als Attribut an.
2. Das Tätigkeitswort *ausgeben* legt nahe, eine gleichnamige Methode `ausgeben()` vorzusehen. In der Methode werden Name und Personalnummer einer Person ausgegeben. Es muss also entsprechende Methoden in der Klasse `Person` geben, etwa `getName()` und `getPersonalnummer()`. Diese Methoden würden innerhalb der Funktion `ausgeben()` aufgerufen werden.
3. *Dialog führen* legt nahe, eine Methode `dialogfuehren()` oder kurz `dialog()` vorzusehen.

Weil nur ein erster Eindruck vermittelt werden soll und die Problemstellung einfach ist, wird auf eine vollständige objektorientierte Analyse (OOA) und ein entsprechendes Design (OOD) verzichtet und auf die Literatur verwiesen, die die OOA/D-Thematik behandelt, zum Beispiel [Oe]. In diesem einfachen Fall konzentrieren wir uns gleich auf eine Lösung mit C++. Eine `main()`-Funktion könnte wie folgt aussehen:

Listing 3.36: `main`-Programm zur Personalverwaltung (`cppbuch/k3/personalverwaltung/main.cpp`)

```
#include "Personalverwaltung.h"
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    Personalverwaltung personalverwaltung("daten.txt");
    cout << "Gelesene_Namen_und_Personalnummern:\n";
    personalverwaltung.ausgeben();
    personalverwaltung.dialog();
    cout << "Programmende\n";
}
```

Die Klasse `Person` ist einfach zu entwerfen:

Listing 3.37: Klasse `Person` (`cppbuch/k3/personalverwaltung/Person.h`)

```
#ifndef PERSON_H
```

```

#define PERSON_H
#include <string>

class Person {
public:
    Person(const std::string& name_, const std::string& personalnummer_)
        : name{name_}, personalnummer{personalnummer_}
    { }

    [[nodiscard]] auto getName() const { return name; }

    [[nodiscard]] auto getPersonalnummer() const { return personalnummer; }

private:
    std::string name;
    std::string personalnummer;
};
#endif

```

Auch die Klasse Personalverwaltung ist nach den obigen Ausführungen nicht schwierig, wenn man sich zunächst auf die Prototypen der Methoden beschränkt:

Listing 3.38: Klasse Personalverwaltung (*cppbuch/k3/personalverwaltung/Personalverwaltung.h*)

```

#ifndef PERSONALVERWALTUNG_H
#define PERSONALVERWALTUNG_H
#include "Person.h"
#include <vector>

class Personalverwaltung {
public:
    explicit Personalverwaltung(const std::string& dateiname);

    void ausgeben() const;

    void dialog() const;

private:
    std::vector<Person> personal;
};
#endif

```

Für die Implementierung der Methoden der Klasse Personalverwaltung muss man sich mehr Gedanken machen. Das überlasse ich Ihnen (siehe die nächste Aufgabe)! Die Lösung dürfte aber nicht schwer sein, wenn Sie die Aufgabe 1.25 von Seite 112 gelöst oder deren Lösung nachgesehen haben.



Übungen

3.5 Implementieren Sie die oben deklarierten Methoden der Klasse Personalverwaltung in einer Datei *Personalverwaltung.cpp*.

3.6 Wie können Sie mit C++ erreichen, dass ein Attribut *direkt*, also ohne Einsatz einer Methode, zwar gelesen, aber nicht verändert werden kann? Beispiel:

22

Von der UML nach C++

Dieses Kapitel behandelt die folgenden Themen:

- Vererbung
- Interfaces
- Assoziationen
- Multiplizität
- Aggregation
- Komposition

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine weit verbreitete grafische Beschreibungssprache für Klassen, Objekte, Zustände, Abläufe und noch mehr. Sie wird vornehmlich in der Phase der Analyse und des Softwareentwurfs eingesetzt. Auf die UML-Grundlagen wird hier nicht eingegangen; dafür gibt es gute Bücher wie [Oe]. Hier geht es darum, die wichtigsten UML-Elemente aus Klassendiagrammen in C++-Konstruktionen, die der Bedeutung des Diagramms möglichst gut entsprechen, umzusetzen. Die vorgestellten C++-Konstruktionen sind Muster, die als Vorlage dienen können. Diese Muster sind nicht einzigartig, sondern nur Empfehlungen, die Umsetzung zu gestalten. Im Einzelfall kann eine Variation sinnvoll sein.

22.1 Vererbung

Über Vererbung als »ist ein«-Beziehung wurde in diesem Buch schon einiges gesagt, was hier nicht wiederholt werden muss. Sie finden alles dazu in Kapitel 6. Die Abbildung 22.1 zeigt das zugehörige UML-Diagramm.



Abbildung 22.1: Vererbung (»ist ein«-Beziehung)

In vielen Darstellungen wird die Oberklasse oberhalb der abgeleiteten Unterklasse dargestellt; in der UML ist aber nur der Pfeil mit dem Dreieck entscheidend, nicht die relative Lage. In C++ wird Vererbung syntaktisch durch »: public« ausgedrückt:

Listing 22.1: Syntaktische Repräsentation der Vererbung

```
class Unterklasse : public Oberklasse {
    // ... Rest weggelassen
};
```

22.2 Interface anbieten und nutzen

Interface anbieten

Abbildung 22.2 zeigt das zugehörige UML-Diagramm. Die Klasse Anbieter implementiert das Interface Schnittstelle-X. Bei der Vererbung stellt die abgeleitete Klasse die Schnittstelle der Oberklasse zur Verfügung. Insofern gibt es eine Ähnlichkeit, auch gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie im Vergleich zum vorherigen Diagramm.



Abbildung 22.2: Interface-Anbieter

Die Ähnlichkeit wird in der Umsetzung nach C++ abgebildet: Anbieter wird von dem Interface SchnittstelleX¹ abgeleitet. Um klarzustellen, dass es um ein Interface geht, soll SchnittstelleX abstrakt sein. Das Datenobjekt d wird nicht als const-Referenz übergeben, weil service() damit auch die Ergebnisse an den Aufrufer übermittelt. Ein einfaches Programmbeispiel finden Sie im Verzeichnis *cppbuch/k22/interface*.

¹ Die UML erlaubt Bindestriche in Namen, C++ nicht.

Listing 22.2: Schnittstellenklasse

```

class SchnittstelleX {
public:
    virtual void service(Daten& d) = 0;           // abstrakte Klasse
    virtual ~SchnittstelleX() = default;        // virtueller Destruktor
    SchnittstelleX() = default;
    SchnittstelleX(const SchnittstelleX&) = delete;
    SchnittstelleX& operator=(const SchnittstelleX&) = delete;
};

class Anbieter : public SchnittstelleX {
public:
    void service(Daten& d)
    {
        // ... Implementation der Schnittstelle
    }
};

```

Interface nutzen

Bei der Nutzung des Interfaces bedient sich der Nutzer einer entsprechenden Methode des Anbieters. Die Abbildung 22.3 zeigt das zugehörige UML-Diagramm.

**Abbildung 22.3:** Interface-Nutzer

Ein Nutzer muss ein Anbieter-Objekt kennen, damit der Service genutzt werden kann. Aus diesem Grund wird in der folgenden Klasse bereits dem Konstruktor von Nutzer ein Anbieter-Objekt übergeben, und zwar per Referenz, nicht per Zeiger. Der Grund: Zeiger können nullptr sein, aber undefinierte Referenzen gibt es nicht.

Listing 22.3: Nutzer der Schnittstelle

```

class Nutzer {
public:
    Nutzer(SchnittstelleX& a)
    : anbieter(a)
    {
        daten = ...
    }

    void nutzen()
    {
        anbieter.service(daten);
    }
private:
    Daten daten;
    SchnittstelleX& anbieter;
};

```


Warum wird die Referenz oben nicht als `const` übergeben? Das kann je nach Anwendungsfall sinnvoll sein oder auch nicht. Es hängt davon ab, ob sich der Zustand des Anbieter-Objekts durch den Aufruf der Funktion `service(daten)` ändert. Wenn ja, zum Beispiel durch interne Protokollierung der Aufrufe, entfällt `const`.

22.3 Assoziation

Eine Assoziation sagt zunächst einmal nur aus, dass zwei Klassen in einer Beziehung (mit Ausnahme der Vererbung) stehen. Die Art der Beziehung und zu wie vielen Objekten sie aufgebaut wird, kann variieren. In der Regel gelten Assoziationen während der Lebensdauer der beteiligten Objekte. Nur kurzzeitige Verbindungen werden meistens nicht notiert. Ein Beispiel für eine kurzzeitige Verbindung ist der Aufruf `anbieter.service(daten)`; `anbieter` kennt durch die Parameterübergabe das Objekt `daten`, wird aber vermutlich die Verbindung nach Ablauf der Funktion lösen.

Einfache gerichtete Assoziation

Die Abbildung 22.4 zeigt das UML-Diagramm einer einfachen gerichteten Assoziation.

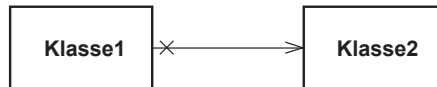


Abbildung 22.4: Gerichtete Assoziation

Mit »gerichtet« ist gemeint, dass die Umkehrung nicht gilt, wie zum Beispiel die Beziehung »ist Vater von«. Falls zwar Klasse1 die Klasse2 kennt, aber nicht umgekehrt, wird dies durch ein kleines Kreuz bei Klasse1 vermerkt. Es kann natürlich sein, dass eine Beziehung zwischen zwei Objekten *derselben* Klasse besteht. Im UML-Diagramm führt dann der von einer Klasse ausgehende Pfeil auf dieselbe Klasse zurück. In C++ wird eine einfache gerichtete Assoziation durch ein Attribut `zeigerAufKlasse2` realisiert:

Listing 22.4: Gerichtete Assoziation: Klasse1 kennt Klasse2

```

class Klasse1 {
public:
    Klasse1()
    : zeigerAufKlasse2(nullptr)
    { }

    void setKlasse2(Klasse2* ptr2)
    {
        zeigerAufKlasse2 = ptr2;
    }
private:
    Klasse2* zeigerAufKlasse2;
};
  
```

Ein Zeiger ist hier besser als eine Referenz geeignet, weil es sein kann, dass das Kennenlernen erst nach dem Konstruktoraufruf geschieht.

Gerichtete Assoziation mit Multiplizität

Die Multiplizität, auch Kardinalität genannt, gibt an, zu wie vielen Objekten eine Verbindung aufgebaut werden kann. In Abbildung 22.5 bedeutet die 1, dass jedes Objekt der Klasse2 zu genau einem Objekt der Klasse1 gehört. Das Sternchen * bei Klasse2 besagt, dass einem Objekt der Klasse1 beliebig viele Objekte der Klasse2 zugeordnet sind, also möglicherweise auch keins.

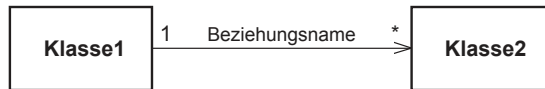


Abbildung 22.5: Gerichtete Assoziation mit Multiplizitäten

Im folgenden C++-Beispiel entspricht Fan der Klasse1 und Popstar der Klasse2. Ein Fan kennt N Popstars. Die Beziehung ist also »kennt«. Der Popstar hingegen kennt seine Fans im Allgemeinen nicht. Um die Multiplizität auszudrücken, bietet sich ein vector an, der Verweise auf Popstar-Objekte speichert. Wenn die Verweise eindeutig sein sollen, ist ein set die bessere Wahl.

Listing 22.5: Gerichtete Assoziation mit Multiplizität: Ein Fan kennt Popstars, aber nicht umgekehrt.

```

class Fan {
public:
    void werdeFanVon(Popstar* star)
    {
        meineStars.insert(star);           // einfügen
    }

    void denKannsteVergessen(Popstar* star)
    {
        meineStars.erase(star);          // entfernen. Rückgabewert ignoriert
    }
    // Rest weggelassen

private:
    std::set<Popstar*> meineStars;
};
  
```

Die Objekte als Kopie abzulegen, also Popstar als Typ für den Set statt Popstar* zu nehmen, hat Nachteile. Erstens ist es wenig sinnvoll, die Kopie zu erzeugen, wenn es doch das Original gibt, und zweitens kostet es Speicherplatz und Laufzeit. Es gibt nur einen Vorteil: Es könnte ja sein, dass es das originale Popstar-Objekt nicht mehr gibt, zum Beispiel durch ein delete irgendwo. Ein noch existierender Zeiger wäre danach auf eine undefinierte Speicherstelle gerichtet. Eine noch existierende Kopie könnte als Wiedergänger auftreten.

Einfache ungerichtete Assoziation

Eine ungerichtete Assoziation wirkt in beiden Richtungen und heißt deswegen auch bidirektionale Assoziation. Die Abbildung 22.6 zeigt das UML-Diagramm.



Abbildung 22.6: Ungeriichtete Assoziation

Wenn zwei sich kennenlernen, kann das mit einer ungerichteten Assoziation modelliert werden. Zur Abwechslung sei die Umsetzung in C++ nicht mit zwei, sondern nur mit einer Klasse (namens Person) gezeigt. Das heißt, die Klasse hat eine Beziehung zu sich selbst, siehe Abbildung 22.7. Solche Assoziationen werden auch rekursiv genannt und dienen zur Darstellung der Beziehung verschiedener Objekte derselben Klasse.

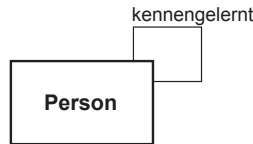


Abbildung 22.7: Rekursive Assoziation

Die Umsetzung in C++ wird am Beispiel von Personen gezeigt, die sich gegenseitig kennenlernen. Ein Aufruf `A.lerntkennen(B)`; impliziert, dass `B` auch `A` kennenernt. Natürlich kann es vorkommen, dass es zwei Personen mit demselben Namen gibt, hier Frau Holle.

Listing 22.6: Assoziation: Personen lernen sich kennen (*cppbuch/k22/bidirektAssoziation/main.cpp*)

```

#include "Person.h"

int main()
{
    Person mabuse("Dr._Mabuse");
    Person klicko("Witwe_Klicko");
    Person holle1("Frau_Holle");
    Person holle2("Frau_Holle");           // eine Namensvetterin!
    mabuse.lerntkennen(klicko);
    holle1.lerntkennen(klicko);
    holle1.lerntkennen(holle2);
    mabuse.bekannteZeigen();
    klicko.bekannteZeigen();
    holle1.bekannteZeigen();
}
  
```

Die entscheidende Methode der Klasse `Person` ist `lerntkennen(Person& p)` (siehe unten). Beim Eintrag in die Menge der Bekannten wird festgestellt, ob der Eintrag vorher schon vorhanden war. Wenn nicht, wird er auch auf der Gegenseite vorgenommen. Wenn in der Menge der Bekannten nur die Namen als `String` gespeichert würden, könnten sich zwei Personen mit demselben Namen nicht kennenlernen. Deswegen werden die Adressen der `Person`-Objekte gespeichert (siehe Attribut `set<Person*>` in der Klasse unten).

Listing 22.7: Klasse Person (*cppbuch/k22/bidirektAssoziation/Person.h*)

```

#ifndef PERSON_H
#define PERSON_H
#include <iostream>
#include <set>
#include <string>
#include <utility>

class Person {
public:
    Person(std::string name_)
        : name(std::move(name_))
    {}

    auto getName() const
    {
        return name;
    }

    void lerntkennen(Person& p)
    {
        bool nichtvorhanden = bekannte.insert(&p).second; // siehe Hinweis im Text
        if (nichtvorhanden) { // falls unbekannt, auch bei p eintragen
            p.lerntkennen(*this);
        }
    }

    void bekannteZeigen() const
    {
        std::cout << "Die_Bekanntten_von_" << getName() << "_sind:\n";
        for (const auto& bekannt : bekannte) {
            std::cout << bekannt->getName() << '\n';
        }
    }

private:
    std::string name;
    std::set<Person*> bekannte;
};
#endif

```

**Hinweis**

Die Methode `insert()` eines Sets gibt ein `pair`-Objekt zurück. Das ist eine Struktur mit den Elementen `first` und `second`. `second` ist ein Wahrheitswert, der angibt, ob das Einfügen stattgefunden hat. Wenn nein, war das Element schon vorhanden. `first` ist ein Iterator auf das Element, ob gerade eingefügt oder schon vorhanden gewesen.

■ 22.3.1 Aggregation

Die »Teil-Ganzes«-Beziehung (englisch *part of*) wird auch *Aggregation* genannt. Sie besagt, dass ein Objekt aus mehreren Teilen besteht (die wiederum aus Teilen bestehen können). Die Abbildung 22.8 zeigt das UML-Diagramm. Die Struktur entspricht der gerichteten Assoziation, sodass deren Umsetzung in C++ hier Anwendung finden kann. Ein Teil kann für sich allein bestehen, also auch vom Ganzen gelöst werden. Letzteres geschieht in C++ durch Nullsetzen des entsprechenden Zeigers.

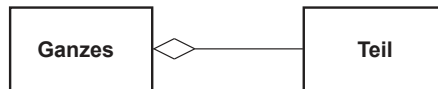


Abbildung 22.8: Aggregation

■ 22.3.2 Komposition

Die Komposition ist eine spezielle Art der Aggregation, bei der die Existenz der Teile vom Ganzen abhängt. Damit ist gemeint, dass die Teile zusammen mit dem Ganzen erzeugt und auch wieder vernichtet werden. Ein Teil ist somit stets genau einem Ganzen zugeordnet; die Multiplizität kann also nur 1 sein. Formal ist auch 0 erlaubt. Für ein isoliertes Objekt ist jedoch der Begriff »Teil« nicht sinnvoll. Die Abbildung 22.9 zeigt das UML-Diagramm.



Abbildung 22.9: Komposition

Es empfiehlt sich, bei der Umsetzung in C++ Werte statt Zeiger zu nehmen. Dann ist gewährleistet, dass die Lebensdauer der Teile an das Ganze gebunden ist:

Listing 22.8: Umsetzung der Komposition

```

class Ganzes {
public:
    Ganzes(int datenFuerTeil1, int datenFuerTeil2)
        : ersterTeil(datenFuerTeil1),
          zweiterTeil(datenFuerTeil2)
    {
        // ...
    }
    // ...
private:
    Teil ersterTeil;
    Teil zweiterTeil;
};
  
```

Register

Symbole

* 45, 218, 463
*= 45, 383
+, +=, -, -= 45
++ 45, 385, 459, 463
, 59, 81, 519
-> 221
->* 265
-- 45, 388
.* 265
... *siehe* Ellipse
/, /= 45
/* ... */ 30
// 30
:: 62, 180, 315
::* 265
; 32, 70
<, <=, >, >= 45, 57
<=> 45, 398
<< 45, 107, 258, 371, 427
<<=, >>= 45
=, == 45, 57
== 372
>> 45, 105, 258, 425, 449
?: 70
[] 222, 225, 377
[][]
Matrixklasse 415

Zeigerdarstellung 250

142
%, %= 45
& Adress-Operator 124
&, &= Bit-Operatoren 45
&& logisches UND 57
&& Shell 658
&& R-Wert 480
\ 31, 55, 140
\0 227, 231–233
\", \a, \b 55
\f, \n, \r, \t, \v 55, 105
\x 55
\\ 55
~ 45
^ 45
|= 45
|| 57
! 45, 57
!= 57, 463
\$<, \$^, @\$ 655
@D, @F 665
" 33, 227, 228

A

abgeleitete Klasse 302, 310, 314
und virtueller Destruktor 326
Abhängigkeit (make) 652

- automatische Ermittlung 657
- abort() 955
- abs() 51, 789, 790, 953, 954
- abstrakte Klasse 319, 977
- abstrakter Datentyp 175, 977
- accumulate() 737
- Achterbahnzahlen 98
- acos() 790, 953
- acosh() 790
- Adapter, Iterator- 899
- Additionsoperator 369
- adjacent_difference() 742
- adjacent_find() 772
- adjustfield 435
- Adresse 218
 - symbolische 33
- Adressoperator 219
- advance() 897
- Aggregat 89, 224, 862
- Aggregation 712, 977
- Aktualparameter 118
- <algorithm> 713, 803, 905
- Algorithmus 28, 459
 - accumulate() 737
 - adjacent_difference() 742
 - adjacent_find() 772
 - all_of, any_of 751
 - binary_search() 774
 - clamp() 812
 - copy(), copy_backward() 800
 - copy_if(), copy_n() 802
 - count(), count_if() 750
 - equal() 788
 - equal_range() 776
 - exclusive_scan() 741
 - fill(), fill_n() 735
 - find(), find_if(), find_if_not() 767
 - find_end() 771
 - find_first_of() 768
 - for_each(), for_each_n() 799
 - generate(), _n() 736
 - includes() 778
 - inclusive_scan() 740
 - inner_product() 739
 - inplace_merge() 766
 - iota() 737
 - is_heap(), is_heap_until() 786
 - is_partitioned() 758
 - is_permutation() 754
 - is_sorted(), is_sorted_until() 760
 - iter_swap() 803
 - lexicographical_compare() 755
 - lexicographical_compare_three_way() 756
 - lower_bound() 775
 - make_heap() 784
 - make_pair() 836
 - make_tupel() 837
 - max(...) 810
 - max_element() 743
 - merge() 765
 - mergesort() 766
 - min(...) 810
 - min_element() 743
 - minmax() 811
 - minmax_element() 743
 - mismatch() 786
 - move(), move_backward() 834
 - next_permutation() 753
 - none_of 751
 - nth_element() 764
 - partial_sort(), --copy 762
 - partial_sum() 740
 - partition() 757
 - partition_copy(), partition_point() 758
 - pop_heap() 783
 - prev_permutation() 752
 - push_heap() 784
 - remove(), --if(), --copy(), --copy_if() 807
 - replace(), --if(), --copy(), --copy_if() 806
 - reverse(), reverse_copy() 749
 - rotate(), rotate_copy() 744
 - sample() 749
 - search() 770, 771
 - search_n() 773
 - set_difference() 780
 - set_intersection() 779
 - set_symmetric_difference() 781
 - set_union() 779

- shuffle() 746
- sort() 760
- sort_heap() 785
- split() 714
- stable_partition() 757
- stable_sort() 761
- swap(), swap_ranges() 803
- transform() 804
- transform_exclusive_scan() 741
- transform_inclusive_scan() 741
- unique(), unique_copy() 746
- upper_bound() 775
- Alias 124, 219, 221
 - *this 244
- alignment_of, alignof() 527
- all_of 751
- allgemeiner Konstruktor 184
- allocator 830
- alternative Funktions-Syntax 283
- and_then() 364
- Anführungszeichen 33, 227, 228
- Anker (bei regulärem Ausdruck) 538
- anonymer Namespace 154
- Anweisung 64
- any() (Bitset) 842
- any_of 751
- app 446
- append()
 - Pfad 818
 - String 934
- apply() 839
- Äquivalenz 399, 775
 - klasse 674
- arg() 789, 790
- argc 243
- Argument *siehe* Parameter
- Argument Dependent Lookup (ADL) 978
- argv[] 243
- Arithmetik
 - mit Iteratoren 462
 - mit Zeigern 224
- arithmetische Operatoren 45
- Arität (Template) 512
- Array
 - char 229
 - von C-Strings 229
 - dynamisches 234, 374
 - Freigabe 238
 - als Funktionsparameter 240, 248
 - vs. Zeiger 223
 - zweidimensionales
 - Matrixklasse 415, 416
- <array> 852, 862
- array 95, 862
- Array2d 251
- ASCII 915
 - Dateien 258
 - Tabelle 55, 959
- asctime() 958
- asin() 790, 953
- asinh() 790
- assert() 143
- assign() 858, 935
- assignable_from 534
- Assoziation (UML) 708
- Assoziativität von Operatoren 58, 963
- async() 575
- at() 91, 96, 859, 862, 867, 878, 887, 933
- atan() 790, 953
- atan2() 953
- atanh() 790
- ate 446
- atexit() 955
- atof(), atoi(), atol() 955
- Atom-Uhr 618
- atomic 572
- atomic_ref 574
- Attribut
 - Compilersteuerung 965
 - einer Klasse 177, 978
- Aufforderung 978
- Aufzählungstyp 85
- Ausdruck
 - Auswertung 58, 59
 - Definition 39
 - mathematischer 51, 131
- Ausgabe 104, 107, 427
 - benutzerdefinierter Typen 428
 - Datei- 108, 423
 - Formatierung
 - mit Flags 433
 - mit std::format() 429

- mit Manipulatoren 437
- Weite der 431, 433
- Ausgabeoperator 371, 427
- Ausnahme 349, 978
- Auswertungsreihenfolge 51, 59, 964
- auto 44, 97, 100, 468, 692
 - als Rückgabetyt 159, 182, 318
- auto(), auto{} 809
- auto[] 102, 837
- automatische Variable 150
 - make 655
- Autotools (GNU) 671

B

- back() 859, 862, 864, 867, 870, 933
- back_inserter(), _insert_iterator 901
- Backslash
 - Zeichenkonstante \ 55
 - Zeilenfortsetzung 140
- Backspace 55
- bad() 445
- bad_alloc 355
- badbit 443
- bad_cast 340, 355
- bad_function_call 355
- bad_typeid 343, 355
- bad_weak_ptr 355
- base() 899
- basefield 435
- basic_string 931
- basic_~Streamklassen 424
- Basisklasse 302
 - virtuelle B. 336
 - Konstruktor 334
 - Subobjekt 338
 - und virtueller Destruktor 326
- Bedingungsausdruck 67
- Bedingungsoperator ?: 70
- beg 447
- begin()
 - Container 465, 854
 - Namespace std 226, 855, 898
 - string 275, 932
 - vector 226
- Belegungsgrad 883
- benutzerdefinierte
 - Datentypen 85, 88
 - Klassen 371
 - Literale 412
 - Typen (Ausgabe) 428
 - Typen (Eingabe) 449
- Benutzungszählung 946
- Bereichsnotation 856, 980
- Bereichsoperator :: 62, 180, 315
 - namespace 152
- Bibliothek
 - C 167, 951
 - C++ 827
- Bibliotheksmodul 146
 - dynamisch 668
 - statisch 666
- Bidirectional-Iterator 893
- Big Three (Regel) 256
- Big Three/Five/Zero (Regel) 496
- binary 111, 446
- binary_search() 774
- bind 845
- Binden 146
 - dynamisches *siehe* dynamisches B.
 - statisches *siehe* statisches Binden
- Binärdatei 260
- binäre Ein-/Ausgabe 257
- binärer Operator 369
 - optimiert 493
- binäres Prädikat 748, 788, 906
- binäre Zahlendarstellung 46
- Binärzahl 42
- Bit
 - feld 103
 - Operatoren 45, 46
 - pro Zahl 40
 - Verschiebung 46
- bit_cast 104
- bitset 839
- bitweises ODER, UND, XOR 45
- Block 30, 32, 61, 65, 209
 - und dyn. Objekte 237
- bool 57
- boolalpha 57, 434, 438
- break 71, 82
- bsearch() 955
- Bstatic (Makefile) 667

- Bucket 883
- bucket() 885
- Byte 54
 - std::byte 87, 954
 - Reihenfolge 618
- C**
- C++ Core Guidelines 113
- C++-Schlüsselwörter 961
- call wrapper 557
- Callback-Funktion 262, 846
- canonical() (Filesystem) 818
- capacity() 860, 934
- capturing group 536
- C-Array 222
 - mehrdimensionales 246
- case 71
 - lokale Variablen 74
- <cassert> 143, 951
- cast *siehe* Typumwandlung
- catch 350
- cbegin()
 - Container 854
 - Namespace std 855, 898
 - string 933
- <cctype> 804, 952
- cdecl 269
- ceil() 953
- cend()
 - Container 854
 - Namespace std 855, 898
 - string 933
- cerr 105, 424
- C-Funktionen einbinden 169
- char 54
- char* 227
- char* const vs. const* char 221
- char_traits 228, 281, 529
- char8_t, char16_t, char32_t 411, 916
- ChatGPT 635
- C-Header 951
- <chrono> 385, 548
- cin 32, 105, 424, 444
- clamp() 812
- class 178, 308
- class (bei Template-Parametern) 161
- clear() 445, 858, 874, 936
- Client-Server
 - Beziehung 179
 - und callback 262
- clock(), clock_t 958
- clog 105, 424
- close() 108
- CMake 671
- <cmath> 51, 951, 953
- co_await 583
- code bloat 298
- Code-Formatierung 113
- collate 920
- combine() 914
- <compare> 399
- compare() 921, 938
- Compilationsmodell 299
- Compiler 29, 30, 33, 145, 177, 179
 - befehle 962
 - direktiven 137
 - und Templates 164
 - Typumwandlung 201
- <complex> 789
- Computerarithmetik 51
- Concepts 530
- conditional 529
- configure 671
- conj() 790
- connect() 588
- const 53
 - correctness 181
 - Elementfunktionen 178, 180
 - globale Konstante 151
- const& *siehe* Referenz auf const
- const char* vs. char* const 221
- consteval 159
- constexpr
 - Funktion 156
 - Konstante 53
 - Konstruktor/Methode 195
- constinit 292
- const_iterator 853
- const_local_iterator 885
- const_pointer 853
- const_reference 853
- const_reverse_iterator 855, 900

constraint, Vererben von 331
Container 458
 implizite Datentypen 853
 Methoden 854
Container-Adapter 868
container_type 868
contains()
 Container 874
 string 938
Contiguous-Iterator 893
continue 82
convertible_to 534
copy semantics 484
copy() (Filesystem) 820
copy() 800, 933
copy_backward() 800
copy_if() 802
copy_n() 803
copy_constructible 534
copy_options 821
copy_result (Ranges) 734
copysign() 953
co_return 581
Coroutinen 579
cos(), cosh() 789, 953
count() 842, 874
 Algorithmus 750
count_if() 750
cout 32, 105, 424
co_yield 580
__cplusplus 169
crbegin()
 Container 855
 Namespace std 855, 898
 string 933
create_directory() 821
crend()
 Container 855
 Namespace std 855, 898
 string 933
critical section 560
CRLF 621
<cstdlib> 40, 220, 225, 954
<cstdliblib> 130, 261
c_str() 933
C-String 227

 Länge 230, 231
<cstring> 227, 263, 273, 276, 955
<ctime> 957
ctype 721, 722, 920, 921
cur 447
curr_symbol 925
current_path 818
<cwctype> 952
CXXFLAGS 654

D

DALL·E 2 635
dangling
 pointer 237
 ranges 735
 reference 482
data race 560, 562
data() 859, 862, 933
Datagramm 616
Datei
 ASCII 258
 binär 260
 Ein-/Ausgabe 108, 423
 kopieren 111, 820
 löschen 818
 Öffnungsarten 446
 öffnen 111
 Positionierung 447
 schließen 109
 umbenennen 822
 Zugriffsrechte 815
Daten
 als Attributwerte 979
 static-Element- 286
Datenbankanbindung 639
Datenkapselung 979
Datentypen 33, 39, 175
 abstrakte *siehe* abstrakter
 Datentyp
 benutzerdefinierte 85
 int und unsigned 60, 70
 logische 57
 parametrisierte 161, 293
 polymorphe 323
 strukturierte 88
 zusammengesetzte 85

- Datum
 - Klasse 386
 - regulärer Ausdruck 791
 - days 386
 - daytime (Port 13) 611
 - Deadlock 579
 - dec 434, 438
 - decay, decay_t 528
 - decimal_point() 923, 924
 - decltype 283
 - decltype(auto) 285, 525, 834
 - declval 286
 - default (in switch-Anweisung) 71
 - = default 191
 - default constructor 182
 - default_delete<X[]> 698
 - defaultfloat 434
 - Default-Parameter *siehe* vorgegebene P.
 - #define 137, 140
 - Definition 148, 979
 - von static-Elementdaten 287
 - von Objekten 185
 - Deklaration 32, 33, 148, 979
 - einer Funktion 117
 - Funktionszeiger 260
 - Lesen einer D. 267
 - in for-Schleifen 79
 - Deklarationsanweisung 64
 - Dekrementierung 45, 46
 - Dekrementoperator 388
 - Delegation 345
 - delegierender Konstruktor 194
 - delete 234, 236, 289, 324, 326
 - überladen 404
 - delete [] 238
 - = delete 191, 694
 - Deleter 699
 - <deque> 852, 867
 - deque 867
 - Dereferenzierung 218, 262
 - derived_from 534
 - Destruktor 208, 335, 496
 - implizite Deklaration 208
 - und exit() 210
 - virtueller 324
 - detach() 553
 - Dezimalpunkt 48, 923
 - Dialog 599
 - diamond problem 338
 - difference_type 853
 - Differenz (Menge) 780
 - difftime() 958
 - digits, digits10 810
 - distance() 897
 - Distribution 657, 979
 - div(), div_t 954
 - divides 844
 - Division durch 0 356
 - DNS 609
 - do while 76
 - domain_error 355
 - double 48, 224
 - nicht als Laufvariable 80
 - korrekter Vergleich 690
 - downcast 340
 - Drei (die großen Drei) 256, 496
 - Drei-Wege-Vergleich *siehe* Spaceship-Operator
 - drop() 471
 - Dubletten entfernen 746
 - Durchschnitt (Menge) 779
 - DYLD_LIBRARY_PATH 669
 - dynamic_cast<>() 340
 - dynamic_pointer_cast 948
 - dynamischer Typ 342
 - dynamisches
 - Array 374
 - Binden 260, 315, 980
 - Datenobjekt 233
- ## E
- e, E 48
 - Editor 29
 - egrep 535
 - Ein- und Ausgabe 104
 - Einbinden von C-Funktionen 169
 - Eingabe 425
 - Datei- 108, 423
 - von Strings 106
 - benutzerdefinierter Typen 449
 - Einschränkung *siehe* constraint
 - Elementdaten, Zeiger auf 266
 - Elementfunktion 176

- als Funktionsobjekt 848
 - spezielle 496
 - Zeiger auf 265
 - Ellipse
 - in catch-Klausel 351
 - template parameter pack 514
 - else 66
 - #else, #elif 137
 - emplace() 857, 869, 870, 872
 - emplace_back() 558, 859, 865, 867
 - emplace_front() 864, 867
 - empty() 854, 869–871, 933
 - Namespace std 855
 - enable_if 528
 - end 447
 - end()
 - Container 465, 854
 - Namespace std 226, 855, 898
 - string 275, 932
 - vector 226
 - #endif 139
 - endl 55, 438
 - oder '\n'? 107
 - ends 438
 - ends_with() 938
 - ENTER** 31, 105
 - »enthält«-Beziehung 336
 - enum 85
 - Environment, env[] 243
 - EOF 426
 - eof() 351, 426, 427, 445, 460
 - eofbit 443
 - epsilon() 810
 - equal() 788
 - equal_range() 776, 874
 - equalsIgnoreCase() 722
 - equal_to 845
 - erase() 858, 874, 936
 - ereignisgesteuerte Programmierung 586
 - errc 717
 - errno 348
 - #error 144
 - error_code 816
 - Escape-Sequenz 55
 - Exception 978
 - arithmetische Fehler 356
 - und Destruktor 349
 - Handling 349
 - Hierarchie 353
 - Speicherleck durch Exc. 696
 - <exception> 355
 - exception 353
 - Exception-Sicherheit 359
 - exchange() 804
 - exclusive_scan() 741
 - ExecutionPolicy 814
 - exists() (Filesystem) 819
 - exit() 130, 955
 - und Destruktor 210
 - Exklusiv-Oder (Menge) 781
 - exp() 790, 953
 - expected 361
 - explicit 191
 - explizite Instanziierung von
 - Templates 300
 - Exponent 48–50
 - export 170
 - extension() (Filesystem) 818
 - extent 527
 - extern 149–151
 - extern "C" 169
 - extern template 299
 - external linkage 154
 - extract() 875
- ## F
- f, F (Suffix) 48
 - fabs() 953
 - Facette 920
 - fail() 445
 - failbit 443, 451
 - fakultaet() 116
 - [[fallthrough]] 73
 - Fallunterscheidung 71
 - false 57
 - false_type 522
 - falsename() 923
 - Fehlerbehandlung 347
 - Ein- und Ausgabe 443
 - Fibonacci 512, 743
 - __FILE__ 145
 - filename() 818

- Filesystem
 - canonical() 818
 - copy() 820
 - create_directory() 821
 - current_path() 818
 - exists() 819
 - extension() 818
 - filename() 818
 - is_directory() 819
 - recursive_directory_iterator 824
 - remove() 818
 - remove_all() 819
 - stem() 818
- filesystem 108
- fill() 433, 735
- fill_n() 735
- Filter, filter() 470
- final 327, 695
- find()
 - Algorithmus 767
 - assoziative Container 874
 - string 937
- find_end() 771
- find_first_of() 768
- find...-Methoden (string) 937
- fixed 434, 436, 438
- Fixture 677
- flache Kopie 254
- flags() 434
- flip() 861
 - Bitset 841
- float 48
- float16_t und weitere float-Typen 52
- floatfield 435
- floating_point 534
- floor() 953
- flush 428
- flush() 107
- flush (Manipulator) 438
- fmod() 953
- fmtflags 434
- Fold-Expression 516
- for 78
 - Kurzform 99
- foreach(), for_each_n() 799
- Formalparameter 118
- Formatierung 429
- forward() 834
- Forward-Iterator 892
- <forward_list> 852
- forwarding reference 492
- frac_digits() 925
- Fragmentierung (Speicher) 238
- Framework 587
- free store 234
- free() 407
- frexp() 953
- friend 279
- from_chars() 717
- front() 859, 862, 864, 867, 870, 933
- front_inserter(), _insert_iterator 901
- <fstream> 108
- fstream 424, 447
- Füllzeichen 430, 433
- __func__ 145
- function 846
- <functional> 355, 844
- Funktion 116
 - frei oder global 153
 - mit Gedächtnis (static) 120
 - mit initializer_list 856
 - klassenspezifische 287
 - mathematische 51, 953
 - vorgegebene Parameterwerte 127
 - Parameterübergabe
 - per Referenz 124
 - per Wert 122
 - per Zeiger 239
 - rein virtuelle 319
 - mit Definition 320
 - static 287
 - alternative Syntax 283
 - Überschreiben 314
 - virtuelle *siehe* virtuelle Funktionen
- Funktionsobjekte 396, 440
 - function 846
 - mem_fn 848
- Funktions-Template 161
- Funktork *siehe* Funktionsobjekte
- <future> 355
- future 577

Fünf (die großen Fünf) 496

G

Ganzzahlen 40
 garbage collection 238
 gcd() 203, 813
 gegenseitige Abhängigkeit von
 Klassen 215
 Genauigkeit 49
 Generalisierung 302
 generate(), generate_n() 736
 generische Programmierung 458
 GET (http) 621
 get() 105, 258, 425, 426
 getenv() 955
 getline() für Strings 107, 939
 getline(char*,...) 426
 getloc() 925
 get_money() (Manipulator) 438
 ggT 75
 std::gcd() 813
 schnell 203
 Gleichheitsoperator 372
 bei Vererbung 420
 Gleichverteilung 795
 Gleitkommazahl 53
 Syntax 48
 global 62
 Funktion 153
 Namensraum 167
 Variable 149, 150
 glvalue 479
 gmtime() 958
 GNU Autotools 671
 good() 445
 goodbit 443
 goto 84
 grafische Benutzungsschnittstelle 585
 greater, greater_equal 845
 greedy (regex-Auswertung) 538
 Grenzwerte von Zahltypen 809
 grouping() 923, 924
 Groß- und Kleinschreibung 31
 größter gemeinsamer Teiler *siehe* ggT
 guard (Threads) 561
 Gültigkeitsbereich 130

Block 61
 Datei 154
 Funktion 119
 Klassen 178
 und new 237

H

hängender Zeiger 237
 hardware_concurrency() 549
 has_facet() 914
 hash() 921
 hasher 885
 Hash-Funktion 883, 884
 has_infinity 810
 __has_include 140
 has_sort_function 522
 has_value() (optional) 362
 »hat«-Beziehung 712
 Header 33, 167
 Datei 145
 Inhalt 149
 Http 621
 der Standardbibliothek 828
 Heap 782
 hex 434, 438
 Hexadezimalzahl 42
 hexfloat 434
 Host Byte Order 618
 hours 548
 hängende Referenz 482

I

-I Compileroption 137
 iconv 919
 IDE 36
 identity 734
 Identität von Objekten 175, 980
 IEC 60559, IEEE 754 49
 if 66
 if consteval 158
 if constexpr 142, 516
 #if, #ifdef, #ifndef 137
 ifstream 108, 424
 ignore() 426
 imag() 789, 790
 imbue() 721, 912

- Implementation 145
 - sdatei, Inhalt 149
 - svererbung 343
- implizite Deklaration
 - Destruktor 208
 - Konstruktor 182
 - Zuweisungsoperator 379, 419
- import 170
- in 446
- #include 32, 137
- Include-Guard 138
- includes() 778
- inclusive_scan() 740
- Indexoperator 90, 222, 225, 250, 377
 - mehrdimensionaler 417
- index_sequence 842
- infinity() 810
- Initialisierung
 - array 862
 - direkte I. der Attribute 184
 - C-Array 224, 247
 - einfacher Datentypen 43
 - mit Element-Initialisierungsliste 183
 - Konstante in Objekten 183, 288
 - globaler Konstanten 149, 151
 - Reihenfolge 292
 - mit {}-Liste 192, 856, 898
 - mit konstruktor-interner Liste 288
 - und move() 490
 - von Objekten 182
 - von Referenzen 970
 - Reihenfolge der Initialisierung
 - von Attributen 183
 - von Funktionsargumenten 136
 - in for-Schleife 78
 - von static-Elementdaten 287
 - und virtuelle Basisklassen 338
 - und Vererbung 306
 - und Zuweisung 44, 187
- initializer_list 193, 377, 811, 856
 - für zweidimensionales Array 856
 - und for-Schleifen 194
- Inklusionsmodell 299
- Inkrementierung 45, 46
- Inkrementoperator 385
- inline
 - Elementfunktion 181
 - Funktion 155
 - Konstante 151, 290
 - Variable 155, 290
- inner_product() 739
- innere Klasse 466, 641
- inplace_merge() 766
- Input-Iterator 892
- insert() 858, 874, 882, 935
- inserter() 902
- insert_iterator 902
- insert_or_assign 878, 887
- Instanz 174, 980
- Instanziierung von Templates 295
 - explizite 300
 - ökonomische (bei vielen Dateien) 298
- int 32, 40
- int-Parameter in Templates 296
- intX_t, int_fastX_t, int_leastX_t
 - (X = 8, 16, 32, 64), intmax_t 47
- integer_sequence 842
- integral 534
- integral_constant 522
- integral promotion 60
- Interface (UML) 706
- internal 434, 438
- internal linkage 154
- Internet-Anbindung 607
- Intervall (und Notation) 980
- invalid_argument 355
- <iomanip> 438, 439
- ios 424, 443, 445
 - failure 445
 - Flags zur Dateipositionierung 447
 - Methoden 434, 445
- <ios> 438
- ios_base 424
 - binary 111
 - Fehlerstatusbits 443
 - Flags 434, 435
 - Manipulatoren 438
- iostate 443
- <iostream> 33, 424, 425, 428, 438
- iota, iota_view 737

- IPv4, IPv6 609
 - IPv4-Adresse (regulärer Ausdruck) 793
 - is() 921
 - is_abstract 527
 - isalnum(), isalpha() 920, 952
 - is_arithmetic 525, 526, 531
 - is_array 526
 - is_base_of 527
 - isblank() 952
 - is_bounded 810
 - is_class 521, 526
 - isctrl() 920, 952
 - is_const 527
 - is_convertible 527
 - isdigit() 135, 920, 952
 - is_directory() (Filesystem) 819
 - is_enum 526
 - is_exact 810
 - is_final 527
 - is_floating_point 526
 - is_function 526
 - is_fundamental 527
 - isgraph() 920, 952
 - is_heap(), is_heap_until() 786
 - is_iec559, is_integer 810
 - is_integral 526
 - islower() 920, 952
 - is_lvalue_reference 526
 - is_modulo 810
 - isnan() 400
 - is_null_pointer 526
 - ISO 10646 916
 - ISO 8859-1, ISO 8859-15 915
 - is_partitioned() 758
 - is_permutation() 754
 - is_pointer 526
 - is_polymorphic 527
 - isprint() 920, 952
 - ispunct() 920
 - is_reference 526
 - is_rvalue_reference 526
 - is_same 527
 - is_signed 527, 810
 - is_sorted(), is_sorted_until() 760
 - isspace() 920, 952
 - Ist-ein-Beziehung 302, 311, 330
 - istream 424, 425
 - Istream-Iterator 902
 - istream::seek(), tellg() 447
 - istream::ws 438
 - istreamstring 424, 448
 - is_unsigned 527
 - isupper() 920, 952
 - is_void 526
 - isxdigit() 920, 952
 - iter_swap() 803
 - Iterator 226, 275, 459, 463, 891
 - Adapter 899
 - Bidirectional 893
 - Contiguous 893
 - Forward 892
 - Input 892
 - Insert 900
 - Output 892
 - Random Access 893
 - Reverse 899
 - Stream 902
 - Tag 893
 - Zustand 464
 - <iterator> 891
 - iterator 853
 - iterator_category 892
- ## J
- Jahr 957
 - join() 552, 553
 - jthread (Klasse) 554
- ## K
- Kardinalität 709
 - Kategorie (locale) 920
 - key_equal 885
 - key_type 873, 880
 - key_comp(), key_compare 875
 - KI 635
 - Klammerregeln 58
 - Klasse 174, 177, 981
 - abgeleitete *siehe* abgeleitete Klasse
 - abstrakte 319
 - Basis- *siehe* Basisklasse
 - Deklaration 179

innere 466, 641
 konkrete 320
 Ober- *siehe* Oberklasse
 für einen Ort 178
 Unter- *siehe* Unterklasse
 für rationale Zahlen 199
 Klassenname (typeid) 343
 klassenspezifische
 Daten und Funktionen 286
 Konstante 290
 Klassen-Template 293
 Klassifikation 302, 981
 Kleinschreibung 31
 kleinstes gemeinsames Vielfaches
 siehe lcm()
 Kollisionsbehandlung 883
 Kommandointerpreter 653
 Kommandozeilenparameter 243
 Kommaoperator 59, 81, 519
 Kommentar 30
 komplexe Zahlen 789
 Komplexität 986
 Komposition 712
 konkrete Klasse 320
 Konsole
 auf UTF-8 einstellen 915
 Konstante 52
 globale 149, 151
 klassenspezifische 290
 konstante Objekte 180
 Konstruktor 179, 182
 allgemeiner 184
 implizite Deklaration 182
 delegierender 194
 erben 312
 Kopier- *siehe* Kopierkonstruktor
 vorgegebene Parameterwerte 185
 Typumwandlungs- *siehe*
 Typumwandlungskonstruktor
 Kontrollstrukturen 64
 Konvertieren von Datentypen *siehe*
 Typumwandlung
 Kopie, flache/tiefe 254
 Kopieren
 von Dateien 111
 von Zeichenketten 232

Kopierkonstruktor 187, 377, 496
 Auslassung durch Compiler 189
 Kreuzreferenzliste 731
 kritischer Bereich 560
 Kurzform-Operatoren 45

L

l, L, ll, LL (Suffix) 42
 Lambda-Funktionen 501
 LANG 912
 late binding 260
 Laufvariable 78, 79
 Laufzeit 218
 und Funktionszeiger 260
 und new 234
 und Polymorphie 315
 Typinformation 342
 lcm() 813
 LD_LIBRARY_PATH 669
 ldd 669
 ldexp() 953
 ldiv(), ldiv_t 954
 left 434, 438
 length() (C-String, constexpr) 228, 281,
 529
 length() (string) 933
 length_error 355
 less, less_equal 845
 lexicographical_compare() 755
 lexicographical_compare_three_way() 756
 lexikografischer Vergleich 401, 981
 <limits> 41, 48, 809
 __LINE__ 145
 Linken 150, 167
 dynamisches 668, 981
 internes, externes 154
 statisches 666, 981
 Linker 35
 linksassoziativ 58, 246
 list 864
 <list> 832, 852
 Liste
 Initialisierungs- 183, 288
 Initialisierungs- (bei C-Arrays)
 247
 Liste (Klasse) 465

Literal 228, 981
 benutzerdefiniert 412
 String 411
 Zahl- 53
 Zeichen- 54, 916
load_factor() 885
local_iterator 885
<locale> 911
localtime() 958
log(), log10() 789, 953
logic_error 354, 355
logical_and, !_not, !_or 845
logischer Datentyp 57
logische Negation 57
lokal (Block) 61
lokale Objekte 221
long 40
long double 48
lower_bound() 775, 875
lvalue 480
L-Wert 480
Länge eines Vektors 739

M

magic number 982
main() 30, 32, 130
MAKE 664
make 651
 automatische Ermittlung von
 Abhängigkeiten 657
 parallelisieren 665
 rekursiv 664
 Variable 654
Makefile 146, 652
make_from_tuple() 838
make_heap() 784
make_index_sequence 842
make_integer_sequence 842
make_pair() 836
make_shared 697, 947
make_tuple() 837
make_unique 270, 697, 945
Makro 140
malloc() 407
Manipulatoren 437
Mantisse 49

<map> 852, 876
mapped_type 878
match_results 542
mathematische Funktionen 953
mathematischer Ausdruck 51
Matrix
 C-Array 246
 Klasse 251
 operator[] 415
max() 810
max(initializer_list<T>) 811
max_bucket_count() 885
max_element() 743
max_exponent, max_exponent10 810
max_load_factor() 886
max_size() 854
[[maybe_unused]] 965
mehrdimensionaler Indexoperator 417
mehrdimensionales C-Array 246
Mehrfachvererbung 304, 333, 335
MeinString (Klasse) 273
mem_fn() 848
member function *siehe* Element-
 funktion
memcpy() 376
<memory> 355, 832
memory leak 237, 696
Mengenoperationen auf sortierten
 Strukturen 777
merge() 765, 865, 874
mergesort() 766
messages 920, 927
Metaprogrammierung 509
Methode 174, 176, 982
 Regeln zur Konstruktion
 von Prototypen 688
microseconds 549
midpoint() 813
milliseconds 549
MIME 982
min() 810
min(initializer_list<T>) 811
min_element() 743
min_exponent, min_exponent10 810
minmax(...) 811
minmax_element() 743

- minus 844
 - Minute 957
 - minutes 548
 - mischen 765
 - mismatch() 786
 - mkdir 659
 - mktime() 958
 - modf() 953
 - modulare Programmgestaltung 145
 - Module 169
 - Modulo 45
 - modulus 844
 - monadische Operationen 364
 - Monat 957
 - monetary 920, 924
 - money_get 925
 - money_punct 924
 - money_put 926
 - Monitor-Konzept 570
 - move() 489
 - Initialisierung 490
 - move semantics 484
 - move(), move_backward()
 - Container-Bereich 834
 - move_constructible 534
 - moving constructor 487
 - mt19937 746, 794
 - multimap 880
 - multiplies 844
 - Multiplikationsoperator 383
 - Multiplizität (UML) 709
 - multiset 882
 - mutable
 - Attribut 180
 - Lambda-Funktion 506
 - mutex 560
- N**
- '\n' 33
 - oder endl? 107
 - und regex_replace 544
 - Nachbedingung 136, 982
 - Nachkommastellen 48
 - precision 436
 - Name 39
 - einer Klasse (typeid) 343
 - name() 343, 914
 - Named Return Value Optimization (NRVO) 189
 - Namenskonflikte bei Mehrfach-
vererbung 335
 - Namespace 63, 151
 - anonym 154
 - in Header-Dateien 154
 - Verzeichnisstruktur 661
 - namespace 151
 - namespace std 63
 - NaN (not a number) 400
 - nanoseconds 548
 - narrow() 922
 - ationale Sprachumgebung 912
 - NDEBUG 143
 - negate 844
 - Negation
 - bitweise 45, 47
 - logische 57, 58
 - negative_sign() 925
 - neg_format() 925
 - Network Byte Order 618
 - Netzwerkprogrammierung 607
 - neue Zeile 55, 66
 - new 233, 236, 289
 - Fehlerbehandlung 358
 - Placement-Form 949
 - überladen 404
 - <new> 355, 949
 - new_handler 358
 - next() 897
 - next_permutation() 753
 - noboolalpha 438
 - Nodehandle 875
 - [[nodiscard]] 118, 202
 - noexcept 352
 - none() (Bitset) 842
 - none_of 751
 - norm() 789, 790
 - Normalverteilung 797
 - noshowbase, -point, -pos 438
 - noskipws 438
 - not_equal_to 845
 - nothrow 359
 - notify_one(), -_all() 566, 703

- nounitbuf, nouppercase 438
 - now 386, 549
 - npos 932
 - nth_element() 764
 - NTP – Network Time Protocol 618
 - NULL 220, 954
 - nullopt 361
 - nullptr 220
 - Null-Zeiger und new 359
 - <numbers> 196
 - numeric 920, 923
 - numeric_limits 48, 809
 - numerische Auslöschung 50
 - numerische Umwandlung 715, 718, 940
 - num_get, num_put 923
 - NumeriertesObjekt (Klasse) 287
 - numpunct 923
- O**
- O-Notation 986
 - Oberklasse 302, 314, 982
 - Subobjekt einer 306
 - Subtyp einer 310
 - Zugriffsrechte vererben 308
 - Oberklassenkonstruktor 303, 306
 - object slicing 311, 319
 - Objekt 28, 175, 179, 983
 - code 35
 - dynamisches 233
 - als Funktions- 396
 - hierarchie 336
 - Identität *siehe* Identität von Objekten
 - Initialisierung 182
 - konstantes 180
 - orientierung 173
 - Übergabe per Wert 188
 - verkettete Objekte 236
 - verwitwetes 237
 - vollständiges 338, 986
 - oct 434, 438
 - ODER
 - bitweises 45
 - logisches 58
 - Öffnungsarten für Streams 446
 - offsetof 954
 - ofstream 108, 424
 - Oktalzahl 42
 - omanip 439
 - one definition rule 149
 - open() 108
 - Open Source 983
 - Operator
 - arithmetischer 45
 - binärer 369
 - Bit- 45
 - für char 57
 - als Funktion 368
 - Kurzform 46
 - für Literale 410
 - für logische Datentypen 57
 - Präzedenz 58, 963
 - relationale 45, 57
 - Syntax 368
 - Typumwandlungs- 389
 - unärer 369
 - für ganze Zahlen 45
 - operator delete() 404
 - operator new() 404
 - operator()() 396
 - operator*() 384, 390, 463
 - operator*=() 383
 - operator++() 385, 387, 463
 - operator++(int) 692
 - operator+=() 371
 - operator->() 390
 - operator<=>() 398
 - operator<<() 371, 427
 - operator=() 380
 - operator==() 463, 842
 - bei Vererbung 420
 - operator==() 372
 - operator>>() 425
 - operator[]() 416, 859, 862, 867, 893
 - operator!=() 463
 - Optimierung
 - Compileroption 963
 - Vermeiden temporärer Objekte 189
 - optional 361
 - or_else() 364
 - Ort (Klasse) 178
 - ostream 371, 424, 427

- ostream::endl, ends, flush() 438
 - Ostream-Iterator 902
 - ostream::seekp(), tellp() 447
 - ostringstream 424, 448
 - osyncstream 568
 - out 446
 - out_of_range 355
 - Output-Iterator 892
 - overflow 43, 50
 - overflow_error 355
 - override 317, 694
- P**
- packaged_task 577
 - pair 835
 - Parameter
 - expansion 515
 - einer Funktion 117
 - Pack 514
 - übergabe
 - per Referenz 124
 - per Wert 122
 - per Zeiger 239
 - parametrisierte Datentypen 161, 293
 - »part-of«-Beziehung 712
 - partial_ordering 400
 - partial_sort(), partial_sort_copy 762
 - partial_sum() 740
 - partielle Spezialisierung von
 - Templates 892
 - partition() 757
 - partition_copy(), partition_point() 758
 - path 108, 815
 - patsubst 657
 - peek() 427
 - perfect forwarding 834
 - Performance 475
 - Permutationen 752
 - Pfad 108
 - Pfeiloperator 221
 - PHONY 654
 - Pipe (ranges) 470
 - Placement new/delete 949
 - plus 844
 - pointer 853
 - Pointer, smarte 390
 - polar() 790
 - polymorpher Typ 323, 342
 - Polymorphismus 315, 983
 - pop() 869, 870, 872
 - pop_back() 860, 865, 868
 - pop_front() 865, 867
 - pop_heap() 783
 - portabel (Zeichensatz) 918
 - pos_format() 925
 - Positionierung innerhalb einer Datei 447
 - positive_sign() 925
 - POSIX 717, 912
 - POST (http) 626
 - postcondition *siehe* Nachbedingung
 - Postfix-Operator 385
 - pos_type 447
 - pow() 790
 - precision() 435, 436
 - precondition *siehe* Vorbedingung
 - prev() 897
 - prev_permutation() 752
 - PRINT (Makro) 142
 - printf() 513
 - Priority-Queue 871
 - private 178, 307
 - private Vererbung 343
 - Programm
 - ausführbares 35
 - Strukturierung 115
 - Programmierrichtlinien 113, 696
 - Projection (Ranges) 734
 - proj() 790
 - Projekt 36, 146
 - promise 577
 - protected 307
 - protected-Vererbung 345
 - Prototyp
 - Funktions- 116
 - einer Methode 178
 - Regeln zur Konstruktion 688
 - prvalue 480
 - Prädikat
 - Algorithmus mit P. 906
 - binäres 748, 788, 906
 - unäres 750
 - Präfix-Operator 385

Präprozessor 33, 136, 657
 Präzedenz von Operatoren 58, 963
 ptrdiff_t 40, 225, 855, 954
 public 178, 307
 Pufferung (Ein-/Ausgabe) 105, 428
 push() 869, 870, 872
 push_back() 860, 865, 867
 vector 94
 push_front() 865, 867
 push_heap() 784
 put() 108, 258, 428
 putback() 426
 put_money() (Manipulator) 438

Q

qsort() 261, 955
 Qt 587
 QThread 602
 Quantifizierer 538
 Quellcode 35
 Queue 870
 <queue> 832, 852, 870
 quoted() 438

R

race condition 560, 578
 radix 810
 RAI 561, 677, 697, 983
 <random> 746
 random access 464
 Random-Access-Iterator 893
 random_access_iterator 534
 random_device 795
 range based for 99
 range_error 355
 Ranges (Bereiche), <ranges> 469
 rank 527
 <ratio> 848
 Rationale Zahl
 Klasse 199
 Template std::ratio 848
 rbegin()
 Container 855, 899
 Namespace std 855, 898
 string 933
 rdstate() 445

read() 257
 real() 789, 790
 Rechengenauigkeit 49, 80
 rechtsassoziativ 58, 246
 recursive_directory_iterator 824
 reelle Zahlen 48
 ref(), reference_wrapper 557, 850
 reference
 bitset 840
 Container 853
 vector<bool> 860
 reference collapsing rules 491
 reference counting 946
 Referenz 124, 133
 auf Basisklasse 318
 auf const 126, 187
 auf istream 425, 449
 auf Oberklasse 310, 318
 auf ostream 372, 427
 Parameterübergabe per 124
 auf R-Wert 484
 Rückgabe per 378
 -semantik 255, 475
 weiterleitende 492
 Referenz-Qualifizierer 482
 Regel der 0/3/5 *siehe* Rule of 0/3/5
 <regex> 355, 543
 regex_iterator 542
 regex_match() 543
 regex_replace() 544, 726
 regex_search() 544, 724
 reguläre Ausdrücke 535
 Reihenfolge
 Auswertungs- 51, 59
 der Initialisierung
 von Attributen 183
 von Funktionsargumenten 136
 umdrehen 749
 rein virtuelle Funktion 319
 mit Definition 320
 reinterpret_cast<>() 225, 257
 Rekursion 123
 Template-Metaprogrammierung 510,
 514
 rekursiver Abstieg 130, 131
 rekursiver Make-Aufruf 664

- relationale Operatoren 45, 57
 - remove()
 - Algorithmus 807
 - Datei/Verzeichnis 818
 - Liste 865
 - remove_all() Dateien/Verzeichnisse 819
 - remove_const 528
 - remove_if() 807, 865
 - remove_reference 527, 834
 - rename() Datei/Verzeichnis 822
 - rend()
 - Container 855, 899
 - Namespace std 855, 898
 - string 933
 - replace() 806, 936
 - replace_copy(), _if(), _copy_if() 806
 - requires 531
 - reserve() 860, 934
 - reset() (Bitset) 841
 - resetiosflags() 438
 - resize() 860, 865, 868, 934
 - resume() 580
 - return 33, 189
 - Return Value Optimization (RVO) 189
 - reverse() (list) 865
 - reverse(), reverse_copy() 749
 - reverse (Ranges) 471
 - reverse_iterator 855
 - Reverse-Iterator 899
 - reversible Container 855
 - right 434, 438
 - »rohes« Stringliteral 411
 - rotate(), rotate_copy() 744
 - round_error(), round_style() 810
 - RTTI 342
 - Rückgabotyp auto 159, 182, 318
 - Rule of zero/three/five 496
 - runtime_error 355
 - rvalue 480
 - R-Wert, Referenz auf R-Wert 480
- S**
- safe_iterator_t 735
 - safe_subrange_t 735
 - same_as 533
 - sample() 749
 - scan_is(), scan_not() 922
 - Schleifen 74
 - und Container 98
 - do while 76
 - for 78
 - und C-Strings 230
 - Tabellensuche 93
 - terminierung 76
 - while 74
 - Schlüsselwörter 961
 - Schnittmenge 779
 - Schnittstelle 145, 984
 - einer Funktion 121
 - Regeln zur Konstruktion 688
 - scientific 434, 436, 438
 - scope 61
 - scoped locking 561
 - scoped_lock 561
 - search() 770, 771
 - search_n() 773
 - seconds 548
 - seekg(), seekp() 447
 - Seiteneffekt 67, 117, 136, 231, 233
 - im Makro 143
 - Seitenvorschub 55
 - Sekunde 957
 - Selbstzuweisung 381, 498
 - Selektion 66
 - sentinel 93, 225
 - Sequenz
 - konstruktor 192, 193, 377
 - methoden (Container) 858
 - Server-Client
 - Beziehung 179
 - und callback 262
 - <set> 852, 880
 - set() (Bitset) 841
 - setbase() 438
 - set_difference() 780
 - setf() 434, 435
 - setfill() 438
 - set_intersection() 779
 - setiosflags() 438
 - setprecision() 438
 - setstate() 445
 - set_symmetric_difference() 781

- set_terminate() 356
- set_union() 779
- setw() 438
- SFINAE 523, 984
- shared_ptr 395, 697, 946
 - für C-Arrays 698
- short 40
- showbase, showpoint, showpos 434, 438
- showContainer() 524
- shrink_to_fit() 860, 868, 934
- shuffle() 746
- Sichtbarkeit 61
 - sbereich (namespace) 151
- sign() 953
- Signal 588, 590
- Signalton 55
- Signatur 128, 304, 316, 318, 984
- signed char 54
- signed_integral 534
- sin(), sinh() 789, 953
- single entry/ single exit 82
- size()
 - Container 854
 - Namespace std 90, 223, 855
 - string 96
 - vector 90
- size_t 40, 954
- size_type 853
- sizeof 224
- sizeof 40
- sizeof... (variadische Templates) 514
- Skalarprodukt 739
- skipws 434, 438
- sleep_for(), sleep_until() 548, 553
- Slot 588, 590
- Small String Optimization 689, 984
- Smart Pointer 390
 - und Exceptions 696
- Socket 611
- Sommerzeit 957
- Sonderzeichen 56
- sortable 533
- sort_heap() 785
- Sortieren
 - mit qsort() 262
 - mit sort() 760
 - stabiles 760
 - durch Verschmelzen 766
- source_location 144
- Spaceship-Operator 398, 854
- 852
- span 242, 889
- Speicher
 - klasse 150
 - leck 237, 696
 - platzfreigabe 220
- Spezialisierung
 - von Klassen 302
 - von Templates 163
- spezielle Elementfunktionen 496
- splICE() 865
- split() 714
- Sprachumgebung 912
- SQL 639
- sqrt() 51, 790, 953
- ssize() 99, 855
 - Namespace std 223
- <sstream> 448
- stable_partition() 757
- stable_sort() 761
- Stack 61
 - Klasse 293
- <stack> 832, 852, 868
- stack unwinding 349
- Standard
 - bibliothek
 - C 167, 951
 - C++ 827
 - header 168, 831
 - klassen 831
 - Typumwandlung 59, 264
 - Zeiger 264
- Standard-Ein-/Ausgabe 105
- starts_with() 938
- static 150
 - Attribute und Methoden 286
 - in Funktion 120
 - Initialisierungsreihenfolge 292
 - static und -Bstatic (Makefile) 667
- static_assert 143
- static_cast<>() 56, 340
- static operator() 398

- statisches Binden 315, 984
- Statusabfrage einer Datei 445
- std 63, 153
- <stdexcept> 355
- <stdfloat> 52
- stdio 434
- Stelligkeit (Template) 512
- stem() (Filesystem) 818
- Stichprobe 749
- STL 457
- stod() 716
- stoi() 716
 - und verwandte numerische
Konversionsfunktionen 940
- stop_requested(), stop_token() 555
- strcat(), strchr(), strcmp() 956
- strncat(), strncmp() 957
- strpbrk(), strrchr(), strstr() 956
- strcpy() 956
- strcspn() 956
- Stream
 - Iterator 902
 - Öffnungsarten 446
- stream 423
- streamsize 425
- strerror() 717, 956
- Streuspeicherung 882
- strftime() 958
- String 95
 - in Zahl umwandeln 715
 - Klasse MeinString 273
 - Literal 411, 916
- string 95, 931
 - append() 934
 - assign() 935
 - at() 96, 933
 - back() 933
 - begin() 932
 - capacity() 934
 - cbegin(), cend(), crbegin(), crend() 933
 - clear() 936
 - compare() 938
 - copy() 933
 - c_str() 933
 - data() 933
 - empty() 933
 - end() 932
 - erase() 936
 - find() 937
 - find...-Methoden 937
 - front() 933
 - insert() 935
 - length() 96, 933
 - max_size() 933
 - operator+=() 934
 - rbegin(), rend() 933
 - replace() 936
 - reserve() 934
 - resize() 934
 - shrink_to_fit() 934
 - size() 96, 933
 - substr() 938
 - swap() 933
- <string> 832
- stringstream 718
- string_view 282, 940
- <string_view> 832
- strlen() 228, 956
- strncpy() 233, 957
- strong_ordering 400
- strtod(), strtol(), strtoul() 955
- strtok() 956
- struct 88, 308
- strukturierte Bindung 102
- Stunde 957
- Subobjekt 303, 310, 334
 - in virtuellen Basisklassen 337
 - verschiedene 336
- subrange 472
- Substitutionsprinzip 330
- substr() 938
- Subtyp 304, 310, 330, 985
- Suffix 42, 48, 97
- suspend_always 582
- swap() 380, 854, 933
 - Algorithmus 803
- swap-Trick 256
- swap_ranges() 803
- switch 71
- symmetrische Differenz (Menge) 781
- Synchronisation 559

- Syntax [53](#)
- Syntaxdiagramm
 - ? : Bedingungsoperator [70](#)
 - do while-Schleife [76](#)
 - enum-Deklaration [85](#)
 - for-Schleife [78](#)
 - Funktions-
 - aufruf [118](#)
 - definition [117](#)
 - prototyp [117](#)
 - Template [161](#)
 - if-Anweisung [66](#)
 - mathematischer Ausdruck [131](#)
 - operator-Deklaration [368](#)
 - struct-Definition [88](#)
 - switch-Anweisung [71](#)
 - Typumwandlungsoperator [389](#)
 - while-Schleife [74](#)
- system() [955](#)
- system_clock [386](#), [548](#)
- system_error [355](#), [445](#)
- Szenario [211](#)
- T**
- Tabellensuche [93](#)
- Tabulator [55](#)
- Tag (des Monats) [957](#)
- Tag Dispatching (und Alternative) [894](#)
- tan(), tanh() [789](#), [953](#)
- target (make) [652](#)
- Taschenrechnersimulation [130](#)
- Tastaturabfrage [105](#)
- TCP [608](#)
- »Teil-Ganzes«-Beziehung [712](#)
- tellg(), tellp() [447](#)
- Template
 - Alias [268](#)
 - für Funktionen [161](#)
 - Instanziierung von T. [295](#)
 - explizite [300](#)
 - ökonomische (bei vielen Dateien) [298](#)
 - int-Parameter [296](#)
 - für Klassen [293](#)
 - Metaprogrammierung [510](#)
 - Method (Design-Muster) [328](#), [420](#)
 - Spezialisierung [163](#)
 - partielle [892](#)
 - als template-Parameter [298](#)
 - variable Parameterzahl [512](#)
- temporäres Objekt (Vermeidung) [189](#)
- terminate() [355](#)
- terminate_handler [356](#)
- test() (Bitset) [842](#)
- Test Driven Development [684](#)
- Test-Suite [675](#)
- Textersetzung [140](#)
- this [244](#)
- this->, *this bei Zugriff auf Oberklasselement [384](#)
- this_thread [552](#)
- thousands_sep() [923](#), [924](#)
- Thread [547](#)
- thread (Klasse) [550](#)
- ThreadGroup [558](#)
- Thread-Sicherheit [578](#)
- throw [350](#)
- tiefeKopie [254](#)
- time [920](#)
- time() [958](#)
- time_t [957](#)
- tm [957](#)
- to_array() [863](#)
- tolower() [721](#), [920](#), [922](#), [952](#)
- top() [869](#), [872](#)
- to_string()
 - bitset [842](#)
 - Zahlkonvertierung [940](#)
- to_ulong() (Bitset) [841](#)
- toupper() [721](#), [917](#), [920](#), [922](#), [952](#)
- trailing return type [283](#)
- traits [891](#)
- traits::eof() [426](#)
- transform()
 - Algorithmus [804](#)
 - collate [921](#)
 - monadische Funktion [364](#)
 - Ranges [471](#)
- transform_exclusive_scan() [741](#)
- transform_inclusive_scan() [741](#)
- tree (Programm) [660](#), [824](#)

- Trennung von Schnittstellen und Implementation 146
 - true 57
 - trunename() 923
 - true_type 522
 - trunc 446
 - try 350
 - try_emplace() 887
 - Tupel, <tuple> 837
 - Typ 985
 - polymorpher bzw. dynamischer Typ 342
 - type cast *siehe* Typumwandlung
 - typedef 267
 - typeid() 342
 - type_info 342
 - <typeinfo> 355
 - typename (bei Template-Parametern) 161
 - Type Traits 521
 - Typinformation 324
 - zur Laufzeit 342
 - Typumwandlung
 - cast 56, 220, 262
 - durch Compiler 201
 - dynamic_cast<>() 340
 - mit explicit 191
 - implizite 60, 191
 - mit Informationsverlust 129
 - skonstruktor 190, 201
 - soperator 389
 - ios 445
 - Standard- 59
 - Zeiger 264
 - static_cast<>() 340
- U**
- u, U (Suffix) 42
 - u8 916
 - u8string, u16string, u32string 411
 - UCS 916
 - UDP 608, 616
 - Überladen
 - von Funktionen 128
 - von Operatoren *siehe* operator
 - Überlauf 43, 50
 - Überschreiben
 - von Funktionen 314
 - Übersetzung 146
 - seinheit 148
 - uintX_t, uint_fastX_t, uint_leastX_t (X = 8, 16, 32, 64), uintmax_t 47
 - Umgebungsvariable 243
 - UML 705
 - Umleitung der Ausgabe auf Strings 448
 - UND
 - bitweises 45, 47
 - logisches 58
 - #undef 139
 - undefined behaviour 238
 - underflow 51
 - underflow_error 355
 - unsigned_integral 534
 - unexpected 363
 - Unicode 423, 915
 - uniform_int_distribution 795
 - uniform_real_distribution 796
 - union 104
 - unique() Sequenzen 865
 - unique(), -_copy() Algorithmen 746
 - unique_lock 561
 - unique_ptr 270, 395, 697, 943
 - für C-Arrays 699
 - Unit-Test 673
 - unitbuf 428, 434, 438
 - unordered_map 886
 - unordered_multimap 888
 - unordered_multiset 889
 - unordered_set 888
 - unsigned 40
 - unsigned char 54
 - Unterklasse 302, 985
 - unärer Operator 369
 - unäres Prädikat 750
 - upper_bound() 775, 875
 - uppercase 434, 438
 - URI, URL 608, 726
 - URL-Codierung 621
 - use case 211
 - use_facet() 721, 722, 914
 - using
 - enum 87
 - Deklaration 309, 344

- Namespace
 - Deklaration 152
 - Direktive 152
 - statt typedef 267
 - Template-Alias 268, 365
- UTC 958
- UTF 411, 985
- UTF-8 55, 915
- <utility> 286, 489, 803, 834, 837

V

- valarray 251
- valgrind 409
- value(), value_or() (optional) 362
- value_comp(), value_compare 875
- value_type 853, 873, 878
- Variable 33
 - automatische 150
 - globale 149, 150
 - make 654
 - Name 39
- variadic templates 512
- variant 843
- vector 859
 - at() 91
 - push_back() 94
 - size() 90
- <vector> 832, 852, 859
- vector<bool> 860
- Vektor 89
 - Klasse 374
 - Länge (geom.) 739
- Verbundanweisung 65
- verdecken (Methode) 304, 309
- Vereinigung (Menge) 779
- Vererbung 301, 985
 - der abstrakt-Eigenschaft 320
 - von constraints 331
 - der Implementierung 344
 - Mehrfach- 333
 - private 343
 - protected 345
 - von Zugriffsrechten 308
 - und Zuweisungsoperator 419
- Vergleich
 - von double-Werten 690

- bei Vererbung 420
- Verschiebung (*move*) 484
- verschmelzen (*merge*) 765
- Vertrag 331, 986
- verwitwetes Objekt 237
- Verzeichnis
 - anlegen 821
 - anzeigen 823
 - kopieren 820
 - löschen 818
 - umbenennen 822
- Verzeichnisbaum
 - anzeigen 824
 - make 661
- Verzweigung 66
- View
 - Definition 281
 - ranges 469
- virtual 316, 318, 326
- virtuelle Basisklasse 336
- virtuelle Funktionen 316, 318
 - private 328
 - rein- 319
- virtueller Destruktor 324
- void 220
 - als Funktionstyp 117
- void* 262
 - Typumwandlung nach 220
- volatile 986
- vollständiges Objekt 338, 986
- Vorbedingung 136, 986
- vorgegebene Parameterwerte
 - in Funktionen 127
 - in Konstruktoren 185
- Vorkommastellen 48
- Vorrangregeln 58, 963
- Vorwärtsdeklaration 215

W

- Wahrheitswert 57
 - zufällig erzeugen 798
- wait() 565
 - mit Lambda-Funktion 570
- #warning 144
- Warteschlange 870
- Wartung 113

- wchar_t 54, 916, 954
 - weak_ordering 401
 - weak_ptr 948
 - Webserver 627
 - Weite der Ausgabe 431, 433
 - weiterleitende Referenz 492
 - Wert
 - eines Attributs 978
 - Parameterübergabe per 122
 - Wertebereich ganzer Zahlen 42
 - Wertsemantik 255, 459, 475
 - Performanceproblem 477
 - what() 354
 - while 74, 230, 232
 - whitespace *siehe* Zwischenraum-
zeichen
 - wide character 54
 - widen() 922
 - Widget 590
 - width() 433
 - Wiederverwendung
 - durch Delegation 345
 - wildcard 657
 - Winterzeit 957
 - Wochentag 957
 - wofstream 919
 - Wrapperklasse für Iterator 899
 - write() 257, 428
 - ws 438
 - wstring 411, 919, 931
 - Wächter (Tabellenende) 93, 225
- X**
- XOR, bitweises 45
 - xvalue 480
- Y**
- year_month_day 385
 - yield() 552
- Z**
- z, Z (Suffix) 42
 - Zahl in String umwandeln 718
 - Zahlenbereich 41, 49
 - Zeichen 54
 - Zeichenkette 33, *siehe auch* String
 - C-String 227
 - Kopieren einer 231
 - Zeichenklasse (Regex) 538
 - Zeichensatz 54, 915
 - Zeiger 217, 234
 - Arithmetik 224
 - vs. Array 223
 - auf Basisklasse 318, 324
 - Darstellung
 - von [] 225
 - von [] [] 250
 - auf Elementdaten 266
 - auf Elementfunktionen 265
 - auf Funktionen 260
 - hängender 237
 - intelligente *siehe* Smart Pointer
 - Null-Zeiger 219
 - auf Oberklasse 310, 318
 - auf Objekt (Mehrfachvererbung) 335
 - auf lokale Objekte 221
 - Parameterübergabe per Z. 239
 - Zeile
 - einlesen *siehe* getline()
 - neue 55
 - Zeit-Server 619
 - Zeitkomplexität 986
 - Ziel (make) 652
 - Ziffernzeichen 54
 - Zufallszahlen 794
 - Zugriffsspezifizierer und -rechte 307
 - zusammengesetzte Datentypen 85
 - Zusicherung 143
 - Zustand 986
 - eines Iterators 464
 - Zuweisung 65, 69, 986
 - und Initialisierung 187
 - und Vererbung 310, 419
 - Zuweisungsoperator 188, 379, 496
 - implizite Deklaration 379, 419
 - und Vererbung 419
 - zweidimensionale Matrix 414
 - Zweierkomplement 41
 - Zwischenraumzeichen 105, 228, 425