

Programmieren mit modernem C++

eine „kurze“ Einführung

René Richter

Version: 2020-07-24

C++ wird verbreitet in Lehre und Forschung eingesetzt. Dies hat manche überrascht, die – zu Recht – darauf hinwiesen, dass C++ weder die kleinste noch die reinste Sprache ist, die jemals entwickelt wurde. Aber C++ ist

*klar genug, um Basiskonzepte erfolgreich zu lehren,
praxisnah, effizient und flexibel genug für anspruchsvolle Projekte,
verfügbar genug für Organisationen und Projektgruppen,
umfassend genug, um fortgeschrittene Konzepte und Techniken zu lehren und
kommerziell genug, um das Gelernte in nicht akademischen Umgebungen zu nutzen.*

C++ ist eine Sprache, mit der man wachsen kann.

– Bjarne Stroustrup

We broke all books on the planet. [C++11]

If you can look at a screenful of code and tell that it's C++17, then we've changed the way we program C++.

...our biggest nine-year-cycle yet...in terms of new features added. [C++20]

– Herb Sutter

Einsatz als Schulungsmaterial „Gelbes Heft“:

1994–2001 Schülerrechenzentrum Dresden, <https://srz.tu-dresden.de>

2000–2012 Bildungszentrum für informationsverarbeitende Berufe Dresden /
b.i.b. International College Dresden

2005–2011 Fachhochschule der Wirtschaft Dresden

5. überarbeitete Fassung, Dresden 2020.

(c) Alle Rechte vorbehalten: René Richter, <https://namespace-cpp.de>

Inhaltsverzeichnis

A	Allgemeine Bemerkungen	1
A.1	Sprichst du modernes C++?	1
A.2	Hallo, Welt	3
B	Bücher zu C++	4
B.1	Referenzen	4
B.1.1	Standards	4
B.1.2	Sprachbeschreibungen	4
B.2	Lehrbücher	5
B.2.1	Anfänger	5
B.2.2	Fortgeschrittene	5
C	C++ Sprachbeschreibung	6
C.1	Lexikalische und syntaktische Grundbegriffe	6
C.1.1	Zeichen	6
C.1.2	Symbole	6
C.1.3	Weitere syntaktische Einheiten	8
C.2	Datentypen, Variablen, Operationen	9
C.2.1	Elementare Datentypen	9
C.2.2	Variablen	11
C.2.3	Konstanten und Aufzählungen	13
C.2.4	Operationen	15
C.2.5	Auswerteregeln	19
C.3	Gruppierung von Daten	20
C.3.1	Felder	20
C.3.2	Strukturen	21
C.3.3	Typ-Aliasnamen	21
C.4	Steueranweisungen	22
C.4.1	Schleifen	22
C.4.2	Verzweigungen	24
C.4.3	Sprunganweisungen	25
C.5	Funktionen	26
C.5.1	Programm-Grundbausteine	26
C.5.2	Vereinbarung	26
C.5.3	Parameter	28
C.5.4	Hauptprogramm	29
C.5.5	Deklarationsdateien	29
C.6	Ausnahmebehandlung	30
C.6.1	Ausnahmen werfen	30
C.6.2	Ausnahmefreiheit erklären	30
C.6.3	Ausnahmen abfangen	30
C.7	Programmorganisation	32
C.7.1	Module	32

C.7.2	Modul-Bindung	33
C.7.3	Übersetzungsprozess	34
C.7.4	Abschied vom Präprozessor?	34
C.7.5	Namensräume	35
C.7.6	Standardbibliothek	36
C.8	Klassenkonzept	38
C.8.1	Objektbasierte Programmierung	38
C.8.2	Überladen von Operatoren	41
C.8.3	Vererbung	44
C.9	Generische Programmierung	50
C.9.1	Funktionschablonen	50
C.9.2	Variablenschablonen	50
C.9.3	Concepts	51
C.9.4	Klassenschablonen	53
C.10	Datencontainer	54
C.10.1	Datenfolgen und Datenhaltung	54
C.10.2	Containerarten	56
C.10.3	Allgemeine Containereigenschaften	58
C.10.4	Spezielle Containeroperationen	59
C.10.5	Kosten von Operationen	60
C.10.6	Container-Adapter	61
C.10.7	Iteratoren	62
C.10.8	Iterator-Adapter	63
C.11	Algorithmen	64
C.11.1	Grundidee	64
C.11.2	Nichtmodifizierende Algorithmen	66
C.11.3	Modifizierende Algorithmen	68
C.11.4	Mutierende Algorithmen	70
C.11.5	Numerische Algorithmen	74
C.11.6	Parallele Algorithmen	76
C.11.7	Ranges	78
C.12	Hilfsmittel	80
C.12.1	Funktoren	80
C.12.2	Funktorenbibliothek	82
C.12.3	Smarte Zeiger	84
C.12.4	Datenkapseln für Einzelwerte	85
C.13	Zeichenketten	88
C.13.1	Nullterminierte Zeichenfolgen	88
C.13.2	Die Klasse <code>string</code>	88
C.13.3	Lokalisierung und Zeichenarten	96
C.13.4	Reguläre Ausdrücke	97
C.14	Ein- und Ausgabe	100
C.14.1	Datenströme	100
C.14.2	Formatierung	104
C.15	Mathematik	108

C.15.1	Mathematische Funktionen und Konstanten	108
C.15.2	Tupel	108
C.15.3	Komplexe Zahlen	110
C.15.4	Verhältnisse	110
C.15.5	Zufallszahlen	111
C.15.6	Bitmengen	114
C.15.7	Wertfelder	114
C.16	Zeit	116
C.16.1	Abstraktion vom Rechnertakt	116
C.16.2	Rückgriff auf C-Bibliothek	117
C.17	Parallelverarbeitung	118
C.17.1	Leichtgewichtige Prozesse	118
C.17.2	Gemeinsam genutzte Ressourcen	119
C.17.3	Verzögerte Auswertung	122
C.17.4	Sperrenfreie Kommunikation	123
C.18	Dateisystem	124
C.18.1	Pfade	124
C.18.2	Arbeit mit Verzeichnissen und Dateien	126
D	Dunkle Ecken	127
D.1	Sprachbarrieren	127
D.1.1	Plattformabhängigkeiten	127
D.1.2	C++ und C	127
D.1.3	Übersetzungseinheiten aus C und anderen Sprachen	128
D.1.4	C++ von 1998 nach 2011 und später	128
D.2	Geschmacksfragen	129
D.2.1	Stil	129
D.2.2	Empfehlungen	129
D.3	Vorverarbeitung	131
D.3.1	Makrokonstanten und -funktionen	131
D.3.2	Bedingte Übersetzung	132
D.3.3	Einlesen von Dateien	132
D.3.4	Zeichenkettenmanipulation	133
D.3.5	Vordefinierte Makros	133
D.4	Zeiger	134
D.4.1	Deklaration und Initialisierung	134
D.4.2	Fehlerquellen (wild pointer)	134
D.4.3	Zeigerarithmetik	135
D.4.4	Besondere Zeiger	136
D.4.5	Freispeicherverwaltung hinter den Kulissen	137
D.5	Bitfelder und Vereinigungen	139
E	Extras	140
E.1	Coroutinen	141

*Kenner der Semantik würden ++C gegenüber C++ vorziehen.
Die Sprache wurde auch nicht D genannt, denn sie ist eine Erweiterung von C
und versucht nicht, Probleme dadurch zu lösen, dass Funktionen weggelassen werden.*
– Bjarne Stroustrup

A Allgemeine Bemerkungen

A.1 Sprichst du modernes C++?

Hervorgegangen aus der Systemprogrammiersprache des Betriebssystems UNIX, wurde C++ von anderen Sprachen (vor allem Simula) beeinflusst (Tab. 1). C++ lässt sich zu einem gewissen Grad als Obermenge von C auffassen¹ (Tab. 2) und kombiniert mehrere Programmierstile (Multi-Paradigmen-Sprache). Der Schwerpunkt liegt auf Abstraktion und Erweiterbarkeit, ohne Effizienz aufzugeben. C++-Programme bilden ein wesentliches Fundament der heutigen Datenverarbeitungs-Infrastruktur.

Das *Klassenkonzept* unterstützt Modularisierung und Geheimnisprinzip. Typunabhängiges *generisches* Programmieren verwendet Quelltext wieder (*Schablonen*, statische Polymorphie). Dynamische Polymorphie erlaubt komplexes Verhalten verwandter Datentypen (*Vererbung*) zur Laufzeit. Die Standardbibliothek stellt *Container* (Zeichenketten, Felder, Listen, Tabellen, Stapel, Warteschlangen) zur Datenorganisation, typische *Algorithmen* (Suchen, Sortieren, Ersetzen), Mittel zur Ein-/Ausgabe u.a. bereit. Daneben gibt es eine Unzahl nicht standardisierter Bibliotheken.

Überarbeitungen des Standards räumen mit Ungereimtheiten auf, fügen neue Sprach-elemente und Bibliotheken hinzu. In vielem fühlt sich „modernes“ C++11/14/17/20 wie eine neue Sprache an. Mittlerweile arbeitet das ISO-Komitee WG21 an C++2b (b==3?).

¹Selbst der Name C++ ist ein Insiderwitz mit einem wahren Kern: C incremented.

Tabelle 1: Entwicklung von C++.

1953 FORTRAN	1980 C with classes
1960 ALGOL	1983 C++
1967 Simula, BCPL	1990 Annotated Reference Manual (ARM)
1970 Unix, B	Komitees ANSI X3J16/ISO WG21
1973 K&R C ↗	1998 Standard ISO 14882:1998 (C++98)
1983 ANSI C	2005 Technical Report TR1, „C++0x“
1989 C ISO 9899:1989 (C89)	2011 ISO 14882:2011 (C++11)
1999 C ISO 9899:1999 (C99)	2014 ISO 14882:2014 (C++14)
2011 C ISO 9899:2011 (C11)	2017 ISO 14882:2017 (C++17)
	2020 ISO 14882:2020 (C++20)

Tabelle 2: Schlüsselwörter (C++^{Jahr}, aus **C** übernommen).

Grunddatentypen	
– Wahrheitswerte	<code>bool false true</code>
– Zeichen	<code>char char8_t²⁰ char16_t¹¹ char32_t¹¹ wchar_t</code>
– Zahlen	<code>double float int</code>
– Platzbedarf, Vorzeichen	<code>long short signed unsigned</code>
– weitere	<code>auto¹¹ enum typedef void</code>
– Modifizierer	<code>const mutable volatile</code>
	<code>alignas¹¹ constexpr²⁰ constexpr¹¹ constexpr²⁰</code>
– Lebensdauer/Ort	<code>extern static thread_local¹¹</code>
Zusammengesetzte Typen	<code>class struct union</code>
– Klassen	<code>explicit this virtual</code>
– Zugriffsrechte	<code>friend private protected public</code>
Concepts	<code>concepts²⁰ require²⁰</code>
Typinformation	<code>alignof¹¹ auto¹¹ decltype¹¹ sizeof typeid typename</code>
Typumwandlung	<code>const_cast dynamic_cast reinterpret_cast static_cast</code>
Ablaufsteuerung	
– Verzweigung/Schleife	<code>do else for if switch while</code>
– Sprung	<code>break case continue default goto</code>
– Fehlerbehandlung	<code>catch noexcept¹¹ static_assert¹¹ throw try</code>
– Coroutinen	<code>co_await²⁰ co_return²⁰ co_yield²⁰</code>
Assembler	<code>asm</code>
Freispeicher	<code>delete new nullptr¹¹</code>
Funktionen	<code>inline operator return</code>
Operatornamen	<code>and bitand bitor compl not or xor and_eq not_eq or_eq xor_eq</code>
Namensbereiche	<code>namespace using</code>
Module	<code>export²⁰</code>
Schablonen	<code>template</code>
reserviert	<code>register</code>

A.2 Hallo, Welt

Das kleinste Programm passt auf eine Zeile und macht gar nichts:

```
int main() {}
```

Innerhalb der geschweiften Klammern stehen *Anweisungen*, die das Programm ausführen soll, z.B. zum Ausgeben eines Textes. Teile von Bibliotheken (`std::cout`) müssen vor ihrer Nutzung erklärt (*deklariert*) werden, z.B. durch Einbinden (`#include <...>`) von *Headern* bzw. `import` von *Modulen* (ab C++20):

```
#include <iostream>
```

```
int main()
{
    std::cout << "Hallo, Welt\n";
    return 0; // kann entfallen
}
```

Das *Hauptprogramm* `main()` meldet mit `return` einen ganzzahligen (`int`) Wert an das aufrufende Programm oder Betriebssystem zurück (0 steht für Erfolg).

```
import <iostream>; // C++20,
import <map>;      // wird evtl. vereinfacht zu
import <string>;  // import std.core; in C++2b

int main()
{
    std::map<std::string, int> table;
    for (std::string s; std::cin >> s;) ++table[s];
    for (auto const& [word, frequency] : table)
        std::cout << frequency << '\t' << word << '\n';
}
```

erzeugt beim Aufruf auf der Konsole

```
wordcnt < input > output
```

eine sortierte Tabelle `output` mit der Häufigkeit aller Wörter² aus `input`.

Zeichen wie `::` `>>` `++` `&` `<<` wirken für Sprachfremde seltsam. C++ gilt zu Unrecht als *schwer* erlernbar, allerdings gibt es *viel* zu lernen. Modernes C++ macht aber auch vieles einfacher.

²„Wörter“ sind hier alle Zeichenfolgen ohne Leerraum.

BOOK = Bio-Optic Organized Knowledge device.
– Internet joke

B Bücher zu C++

B.1 Referenzen

B.1.1 Standards

[C++] *ISO/IEC 14882:2017 Programming Languages - C++*. 5th edn. ISO, Geneva (CH) (2017-12).

Entwürfe zu C++11/14/17/20 sind kostenlos einsehbar:

<http://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/docs/papers/2011/n3242.pdf>

<http://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/docs/papers/2013/n3797.pdf>

<http://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/docs/papers/2017/n4659.pdf>

<http://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/docs/papers/2020/n4861.pdf>

[C] *ISO/IEC 9899:1999 Programming Languages - C*. ISO, Geneva (CH) (1999-12-01).

<http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/docs/n1256.pdf>.

Draft International Standard für C11 (2011-04-12):

<http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/docs/n1570.pdf>.

B.1.2 Sprachbeschreibungen

[C++Tour] Bjarne Stroustrup: *A Tour of C++* Addison-Wesley (2013).

Schnellbesohlung auf ca. 180 Seiten in Englisch.

[TC++PL4] Bjarne Stroustrup: *Die C++ Programmiersprache*. 4. Auflage. Addison-Wesley (2010).

Dicht und informativ. In Englisch: *The C++ Programming Language*.

[D&E] Bjarne Stroustrup: *The Design and Evolution of C++*. Addison-Wesley (1994).

Rückblick des Entwicklers, welche Entscheidungen C++ zu dem machten, was es heute ist. Sehr lesenswert, auch in deutsch (1994).

[ARM] Margareth A. Ellis, Bjarne Stroustrup: *The Annotated C++ Reference Manual*. Addison-Wesley (1990).

Vorlage für den ersten Standardentwurf, kommentiert und begründet Sprachkonstruktionen und Compilerregeln.

[K&R] Brian W. Kernighan, Dennis M. Ritchie: *The C Programming Language*. 2nd edn. Prentice-Hall 1988.

Beschreibung und Lehrbuch zu ANSI C.

B.2 Lehrbücher

B.2.1 Anfänger

[**Koenig&Moo**] Andrew Koenig, Barbara Moo: *Intensivkurs C++*. Pearson (2003).

Für Anfänger ohne Programmierkenntnisse, beschränkt auf wichtige Sprachmerkmale und Bibliotheken.

[**IntroC++**] Bjarne Stroustrup: *Einführung in die Programmierung mit C++*. Addison-Wesley/Pearson (2009).

Lehrt allgemeine Programmierkonzepte und übersetzt dies mit modernem C++03. Engl. Programming Principles and Practice using C++.

[**TiC++**] Bruce Eckel: *In C++ denken*. 2. Aufl. Markt & Technik (1998).

Betont den objektorientierten Ansatz. Nicht ganz frisch, aber als Einstieg in OOP geeignet. Engl. *Thinking in C++*: <http://eckelbooks.starlinger.org/>.

[**Kaiser**] Ulrich Kaiser: *C/C++*. Galileo (2000).

Beschreibt zuerst C, dann C++, enthält aber viele gute Übungsaufgaben und Beispiele.

B.2.2 Fortgeschrittene

[**Ruminations**] Andrew Koenig, Barbara Moo: *Ruminations on C++*. Addison-Wesley (1997).

Einblicke in den Entwurf objektorientierter und generischer Programme.

[**C++Challenge**] Marius Bancila: *Die C++Challenge*. dpunkt (2019).

100 Aufgaben und Lösungen mit modernem C++.

[**Effective C++**] Scott Meyers: *Effective C++*. 3rd edn, Addison-Wesley (2005).

55 ways to improve your programs...

[**Exceptional C++**] Herb Sutter: *Exceptional C++*. Addison-Wesley (2000).

Ausnahmebehandlung richtig gemacht: Beiträge aus Guru of the Week.

[**SciEng**] John J. Barton, Lee R. Nackman: *Scientific and Engineering C++: An Introduction with advanced techniques and examples*. Addison-Wesley (1994).

Objektorientierte und generische Programmierung, Umsetzung algebraischer Strukturen in C++, Einkapselung von Legacy-Systemen (FORTRAN).

[**CLR**] Thomas Cormen, Charles Leiserson, Ronald Rivest, Clifford Stein: *Algorithmen. Eine Einführung*. Oldenburg (2007).

Studienkurs Algorithmen und Datenstrukturen. Wer Rot-Schwarz-Bäume selbst implementieren will, sollte dieses Buch studieren (Quellen in C).

C C++ Sprachbeschreibung

C.1 Lexikalische und syntaktische Grundbegriffe

C.1.1 Zeichen

Unabhängig von der internen Darstellung besteht ein *Quelltext* aus

Buchstaben A...Z a...z sowie Unterstrich `_` (gilt als Buchstabe)

Ziffern 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Sonderzeichen + - * / % ? : = [] () { } , . < > ! | & ~ ^ # ' " \

Leerzeichen, Tabulatoren und Zeilenumbrüche (*white spaces*) dienen zur Gliederung des Quelltextes.

►D.2

C.1.2 Symbole

Namen (*Bezeichner*) müssen mit einem Buchstaben oder Unterstrich³ beginnen. Anschließend können sich Buchstaben, Ziffern und Unterstriche in beliebiger Folge. Groß- und Kleinbuchstaben werden unterschieden. Als *Schlüsselwörter* sind reserviert:

<code>alignas</code>	<code>const</code>	<code>false</code>	<code>public</code>	<code>true</code>
<code>alignof</code>	<code>const_cast</code>	<code>float</code>	<code>register</code>	<code>try</code>
<code>asm</code>	<code>constexpr</code>	<code>for</code>	<code>reinterpret_cast</code>	<code>typedef</code>
<code>auto</code>	<code>constexpr</code>	<code>friend</code>	<code>requires</code>	<code>typeid</code>
<code>bool</code>	<code>constexpr</code>	<code>goto</code>	<code>return</code>	<code>typename</code>
<code>break</code>	<code>continue</code>	<code>if</code>	<code>short</code>	<code>union</code>
<code>case</code>	<code>decltype</code>	<code>inline</code>	<code>signed</code>	<code>unsigned</code>
<code>catch</code>	<code>default</code>	<code>int</code>	<code>sizeof</code>	<code>using</code>
<code>char</code>	<code>delete</code>	<code>long</code>	<code>static</code>	<code>virtual</code>
<code>char8_t</code>	<code>do</code>	<code>mutable</code>	<code>static_assert</code>	<code>void</code>
<code>char16_t</code>	<code>double</code>	<code>namespace</code>	<code>static_cast</code>	<code>volatile</code>
<code>char32_t</code>	<code>dynamic_cast</code>	<code>new</code>	<code>struct</code>	<code>wchar_t</code>
<code>class</code>	<code>else</code>	<code>noexcept</code>	<code>switch</code>	<code>while</code>
<code>co_await</code>	<code>enum</code>	<code>nullptr</code>	<code>template</code>	
<code>co_return</code>	<code>explicit</code>	<code>operator</code>	<code>this</code>	
<code>co_yield</code>	<code>export</code>	<code>private</code>	<code>thread_local</code>	
<code>concept</code>	<code>extern</code>	<code>protected</code>	<code>throw</code>	

An bestimmten Stellen haben die Namen `final`, `import`, `module` und `override` besondere Bedeutung. Operatornamen sind für einige Operationszeichen reserviert (Tab. 3). Implementationsabhängig können weitere Namen reserviert sein.

³Auch Unicode ist zugelassen (UTF-8, siehe E). Vordefinierte Bezeichner beginnen oft enden mit `...`

Tabelle 3: Reservierte Operatornamen.

and	&&		
bitand	&	and_eq	&=
bitor		or_eq	=
compl	~		
not	!	not_eq	!=
or			
xor	^	xor_eq	^=

Zahlen beginnen mit einer Ziffer. *Ganzzahlen* sind unterschiedlich darstellbar:

Darstellung	Basis	Ziffern	Anfangszeichen	Beispiel
dezimal	10	0..9	keine 0	127
binär	2	0..1	0b	0b101010
oktal	8	0..7	0	0177
hexadezimal	16	0..9, a..f, A..F	0x	0x7F

Durch Anfügen von `l` oder `L` erhält die Konstante den Datentyp `long int`. Durch `u` oder `U` am Ende wird die Zahl als vorzeichenlos interpretiert.⁴ Sonst wird stets der kleinstmögliche vorzeichenbehaftete ganzzahlige Typ angenommen. Hochkomma kann als Stellentrennzeichen eingesetzt werden:

```
65 255L 65535U -1UL 4'294'967'295
```

Gleitkommazahlen enthalten einen Dezimalpunkt, einen Exponenten⁵ oder beides. Sie haben den Typ `double`. Mit `f` oder `F` am Ende wird der Typ `float` erzwungen, mit `l` oder `L` der Typ `long double`:

```
123.0    0.123    1.602E-19f
123.     .123     299792.458e+8L
```

Hochkomma und Gänsefüßchen schließen einzelne Zeichen `'a'` bzw. *Zeichenketten* `"Hallo"` ein. In Zeichenketten darf kein Zeilenende auftreten. Aufeinander folgende durch *white space* getrennte Zeichenketten werden zu einer verschmolzen:

```
"Das ist eine" "Zeichenkette"
```

Durch vorangestelltes `L` erfolgt die Codierung als *wide character*, durch `u8`, `u` oder `U` als *Unicode* (UTF-8, 16 bzw. 32 bit). Einige Zeichen müssen durch Kombination mit dem *Backslash* `\` gebildet werden (Tab. 4). Bei einem *raw string* werden keine Ersetzungen mit dem Backslash durchgeführt, der eigentliche Inhalt wird in eine Begrenzerfolge mit runden Klammern eingeschlossen: `R"delim(...)delim"`.

⁴Die meisten Computer verwenden für negative Werte die Darstellung im Zweierkomplement.

⁵Die Zahl `1.6E-19` ist zu lesen als $1,6 \cdot 10^{-19}$.

Tabelle 4: Sonderzeichen.

<code>\a</code>	alert	Warnton bei Bildschirmausgabe
<code>\b</code>	backspace	löscht vorhergehendes Zeichen
<code>\f</code>	form feed	Blattvorschub (bei Druckern)
<code>\n</code>	new line	Zeilenumbruch
<code>\r</code>	return	rückt zum Zeilenanfang (ohne Zeilenumbruch)
<code>\t</code>	tab	rückt zur nächsten Tabulatorposition
<code>\\</code>	backslash	druckt \
<code>\v</code>	vertical tab	rückt eine Zeile nach unten
<code>\'</code>	quote	druckt Hochkomma '
<code>\"</code>	double quote	druckt Gänsefüßchen "
<code>\0</code>	nul	Endekennung von Zeichenketten
<code>\ooo</code>	octal value	Zeichenwert oktal (1..3 Oktalziffern <i>ooo</i>)
<code>\xhh</code>	hex value	Zeichenwert hexadezimal (1..2 Hex-Ziffern <i>hh</i>)
<code>\uhhhh</code>	wide char	Unicode-Zeichen (<code>wchar_t</code> <code>char16_t</code> <code>char32_t</code>)
<code>\Uhhhhhhhh</code>		(4 oder 8 Hex-Ziffern <i>hhhh</i>)

C.1.3 Weitere syntaktische Einheiten

Kommentare `//` bis zum Zeilenende oder

`/*` mit beidseitigem Begrenzer `*/`

sind nicht schachtelbar und werden bei der Programmübersetzung ignoriert. Sie sind nur für die menschliche Kommunikation bestimmt.

Semikolon `;`

schließt jede *Anweisung* ab. Was vor dem Semikolon steht, heißt *Ausdruck* (der auch leer sein kann). *Ausdrücke* sind u. a. Deklarationen, Funktionsaufrufe, Zuweisungen.

Geschweifte Klammern `{ }`

umschließen *Blöcke* (Deklarations- oder Anweisungsfolgen). Sie können auch leer sein und sind ineinander schachtelbar.

Doppelkreuze `#`

►D.3 am Zeilenanfang leiten Anweisungen für den *Präprozessor* ein und gehören (strenggenommen) nicht zur Sprache. Allerdings kommt kaum ein Programm ohne sie aus.

C.2 Datentypen, Variablen, Operationen

C.2.1 Elementare Datentypen

Neben `void` als Markierung für leere Plätze⁶ gibt es die Grundtypen:

<code>bool</code>	mit zwei Werten <code>true</code> und <code>false</code>
<code>char</code> <code>wchar_t</code>	Zeichen
<code>int</code>	Ganzzahlen in maschinentypischer Größe ⁷ ,
<code>float</code>	einfach genaue und
<code>double</code>	doppelt genaue Gleitkommazahlen.

Modifikationen sind für einige Typen erlaubt: `int`'s existieren als

<code>short int</code>	(mindestens 2 Byte) und
<code>long int</code>	(mindestens 4 Byte).

Die Angabe `int` kann dann weggelassen werden. `long double` kann noch mehr Stellen als `double` besitzen (IEEE-Extended-Format). Durch die Modifikatoren `signed` und `unsigned` vor `char` und `int` werden Werte mit gesetztem höchstwertigem Bit unterschiedlich interpretiert (heute übliches *Zweierkomplement*). Ohne Angabe gelten `int` als `signed`. Ob `char` als `signed char` oder `unsigned char` gelten, hängt vom Compiler ab und damit auch ihre Ganzzahlrepräsentation:

<code>signed char</code>	0..127	-128..-1	(Zweierkomplement)
<code>unsigned char</code>	0..127	128..255	
hexadezimal	0..0x7F	0x80..0xFF	(interne Darstellung)

Speicherbedarf und Wertebereich sind hardware- und implementationsabhängig. Zugesichert wird für die Speichergröße in Byte:⁸

$$1 \equiv \text{sizeof}(\text{char}) \leq \text{sizeof}(\text{short}) \leq \text{sizeof}(\text{int}) \leq \text{sizeof}(\text{long})$$

Für die *Wertebereiche* der Typen auf einem 32-Bit-System könnte gelten:

Typ	Byte	Wertebereich	Genauigkeit	
<code>signed char</code>	1	-128	127	
<code>unsigned char</code>	1	0	255	
<code>short</code>	2	-32768	32767	
<code>unsigned short</code>	2	0	65535	
<code>long</code>	4	-2147483648	2147483647	
<code>unsigned long</code>	4	0	4294967295	
<code>float</code>	4	$\pm 1.2 \cdot 10^{-38}$	$\pm 3.4 \cdot 10^{38}$	7 Stellen
<code>double</code>	8	$\pm 2.3 \cdot 10^{-308}$	$\pm 1.7 \cdot 10^{308}$	15 Stellen
<code>long double</code>	10	$\pm 1 \cdot 10^{-4927}$	$\pm 1 \cdot 10^{4932}$	19 Stellen

⁶Eine *Funktion* `void f()` liefert keinen Rückgabewert.

⁷Maschinentypisch ist etwa die Größe eines Prozessorregisters, `char16_t` `char32_t` und in `<stdint.h>` definierte Typen wie `int8_t` `int_least64_t` `uint128_t` kommen zum Einsatz, wenn der exakte Speicherbedarf bzw. Wertebereich von Bedeutung ist.

⁸Ein `char` ist 1 Byte groß, kann aber `CHAR_BIT` Speicher belegen. So hat auf einer DEC-20 der kleinste adressierbare Speicherbereich 36 Bit. Es passen also `char`, `short`, `long` und `float` hinein.

Tabelle 5: Informationen in `std::numeric_limits<T>`.

Komponente	Bedeutung
<code>is_specialized</code>	Limit-Angaben für diesen Typ verfügbar
<code>min()</code>	kleinster Wert, für Gleitkommatypen kleinster positiver Wert
<code>max()</code>	größter Wert
<code>digits</code>	Anzahl der Ziffern im Basissystem
<code>digits10</code>	Anzahl der Ziffern im Dezimalsystem
<code>is_signed</code>	ist vorzeichenbehaftet
<code>is_integer</code>	ist ganzzahlig
<code>is_bounded</code>	ist beschränkt
<code>is_exact</code>	alle Werte sind exakt darstellbar
<code>is_modulo</code>	Summe zweier positiver Werte kann negativ sein (Überlauf)
<code>radix</code>	Zahlenbasis (meist 2)
<code>min_exponent</code>	kleinste Ganzzahl e mit radix^e im Wertebereich
<code>min_exponent10</code>	kleinste Ganzzahl e mit 10^e im Wertebereich
<code>max_exponent</code>	größte Ganzzahl e mit radix^e im Wertebereich
<code>max_exponent10</code>	größte Ganzzahl e mit 10^e im Wertebereich
<code>has_infinity</code>	Darstellung für ∞ verfügbar
<code>infinity()</code>	∞
<code>epsilon()</code>	kleinste Zahl ε mit $1 + \varepsilon > 1$ (bei Gleitkommazahlen)
<code>round_error()</code>	maximaler Rundungsfehler
<code>round_style</code>	Art der Rundung: <code>round_indeterminate</code> , <code>round_toward_zero</code> , <code>round_to_nearest</code> , <code>round_toward_infinity</code> oder <code>round_toward_neg_infinity</code>

Die Template-Klasse `numeric_limits<T>` (Tab. 5) bietet eine einheitliche Schnittstelle für Größeninformationen, die auch für eigene numerische Typen `T` erweitert werden kann:

```
#include <iostream>
#include <limits>

int main()
{
    std::cout << std::numeric_limits<int>::digits << " Bits, "
              << std::numeric_limits<int>::min() << "... "
              << std::numeric_limits<int>::max() << '\n';
}
```

liefert Informationen zum Datentyp `int`, z. B. auf einem 32-Bit-System

```
31 Bits, -2147483648...2147483647
```

C.2.2 Variablen

Die Deklaration $\langle typ \rangle \langle name \rangle;$

legt für jeden Variablennamen fest, welchen Datentyp er besitzt, bevor er benutzt werden kann. Durch Einrichtung des Speichers, der den Wert der Variable aufnimmt, wird die Variable *definiert*. Dabei kann die Variablen *initialisiert* werden.⁹ Der Typ einer `auto`-Variable wird durch ihren Initialisierer festgelegt. Mit `decltype` kann man sich auf den Typ von Variablen und Ausdrücken beziehen.

```
int ganzzahl;
auto c = 'A';    // char
float f = 1.23f;
long i = 0, j;
decltype(i) k = i; // long
```

Der Gültigkeitsbereich von Variablen wird durch den Kontext festgelegt, in dem die Deklaration erfolgt. Variablen und Konstanten sind erst nach (unterhalb) ihrer Deklaration im Quelltext bekannt und verwendbar. Außerhalb von Blöcken definierte Variablen sind *global* gültig. Globale Variablen gleichen Namens in verschiedenen Dateien sind voneinander unabhängig (*file scope*¹⁰), sofern auf sie nicht `extern` Bezug genommen wird.

In einem Block $\{ \dots \}$ festgelegte Variablen sind *lokal* zu diesem Block, außerhalb des Blocks ist der Variablenname unbekannt (*block scope*). Gleichnamige lokale Variablen in verschiedenen Blöcken sind unabhängig voneinander. Innere lokale Variablen verdecken äußere globale und lokale Variablen gleichen Namens. *Funktionsparameter* gelten als lokal deklarierte Variablen.

►C.5

```
#include <iostream>

float x = 2.5f;           // globales x

float sqr(float x) { return x*x; } // Parameter x lokal

int main()
{
    float x2 = sqr(x);    // globales x
    {
        float x = x2;    // lokales x
        std::cout << x << ' ' << ::x << '\n';
    }                    // ^ lokal      ~~~ global

    return x2 == x*x;    // wieder globales x
}
```

⁹Ohne Startwert erhalten statische Variablen den Wert 0, nichtstatische sind undefiniert (Müll).

¹⁰Programme können aus mehreren, getrennt übersetzbaren Quelldateien bestehen.

Die Lebensdauer und damit der Speicherplatzbedarf globaler Variablen erstreckt sich über die gesamte Programmdauer (*statische* Variablen). Für lokale Variablen wird beim Eintritt in den Block *automatisch* Speicherplatz auf dem Stapel reserviert und beim Verlassen des Blocks wieder freigegeben. Damit geht auch der gespeicherte Wert verloren.

Eine Speicherklasse `extern static`

kann einer Deklaration vorangestellt werden.

`extern` erklärt, dass der deklarierte Name an anderer Stelle global definiert ist, z. B. in einer anderen Quelldatei des Programms.¹¹

`static` vor einer globalen Deklaration versteckt diese vor dem `extern`-Zugriff aus anderen Quelldateien.¹² Als `static` deklarierte lokale Variablen werden beim Programmstart initialisiert und behalten ihren Wert auch nach dem Verlassen einer Funktion. Eine globale Deklaration ist in solchen Situationen unnötig:

```
int noch_ein_Bier_bitte()
{
    static int biere = 0;
    return ++biere;    // Anzahl der bestellten Biere
}
```

Referenzvariablen `<typ> & <aliasname> = <variable>;`

definieren feste Aliasnamen, die für ihre Lebensdauer fest mit der Speicheradresse einer Variable verbunden sind. Sie erlauben die Übergabe von *Referenzparametern* an Funktionen (Zurückliefern von Rechenergebnissen aus Funktionen). Seltener werden Referenzen solo verwendet (Vermeidung wiederholter aufwendiger Adressberechnungen, Lesbarkeit).

```
void spur(int& diagonalsumme)    // Referenzparameter
{
    int matrix[3][3];           // ein 3x3-Feld
    // ...
    int& linksoben   = matrix[0][0];
    int& mitte       = matrix[1][1]; // oft benutzte Stellen
    int& rechtsunten = matrix[2][2];
    mitte = 15;                // dasselbe wie matrix[1][1]=15;
    // ...
    diagonalsumme = linksoben + mitte + rechtsunten;
}
```

¹¹Globale Variablen besitzen *externe Bindung*. Namen, auf die mit `extern`-Deklarationen Bezug genommen wird, dürfen nur in einer Datei definiert werden. Ohne `extern` wären gleichnamige globale Variablen in verschiedenen Quelltexten unabhängig voneinander.

¹²Diese Verwendung von `static` wird im Standard missbilligt. Stattdessen sollte durch unbenannte Namensbereiche `namespace {...}` der externe Zugriff verhindert werden. Generell sind globale Variablen problematisch.

C.2.3 Konstanten und Aufzählungen

Mit `const` markierten Variablen kann nach Initialisierung kein neuer Wert zugewiesen werden.¹³

```
double const euro = 1.95833; // in DM
```

Konstante Referenzen müssen nicht unbedingt auf Konstanten zeigen. Sie sind vielmehr eine „freiwillige Selbstverpflichtung“, die Variable nicht zu ändern:

```
int jahr = 1999;
int const& cref = jahr; // nur lesen, nicht schreiben
```

Als `mutable` deklarierte Variablen dürfen auch dann geändert werden, wenn die Instanz der umgebenden Struktur oder Klasse logisch konstant ist:

```
struct Count { mutable int counter; };

void f(Count const& s) { ++s.counter; }
```

Aufzählungen `enum classopt <Typname>[:Basistyp]opt { <Liste> };` sind Sammlungen ganzzahliger Konstanten, denen ein gemeinsamer Typname zugewiesen werden kann. Die Konstanten werden mit 0 beginnend aufsteigend numeriert, falls keine anderen Werte angegeben werden. Der gleiche Wert kann auch mehrmals vorkommen. Gleichnamige Bezeichner kollidieren nur in typsicheren Aufzählungen (`enum class`) nicht miteinander. Ein Grundwertebereich kann angegeben, Operatoren können definiert werden. Sie lassen die implizite Umwandlung in einen Ganzzahltyp nicht zu:

```
enum class Weekday : uint8_t { sun, mon, tue, wed, thu, fri, sat };
enum class Star : char { sun, sirius, rigel };
Star s = Star::sun;
char c = char(s); // ok
// char c = s;    // nicht erlaubt

enum Muenzen // nicht typsicher
{ einer=1, zweier, fuenfer=5, groschen=10, fuffziger=50 };
```

Werte vom unsicheren Aufzählungstyp lassen sich problemlos einer Ganzzahlvariablen zuweisen, umgekehrt jedoch nicht (explizite Typumwandlung erforderlich). Damit können auch die Operatoren `++` und `--` nicht angewendet werden.

¹³`const` wirkt auf das unmittelbar links davorstehende („east const“) — außer wenn nicht davor steht („const west“). Die Bezeichnung Konstante ist aus historischen Gründen vom Präprozessor belegt.

constexpr-Ausdrücke sind konstant, aber können im Gegensatz zu `const`-Variablen wie *Literale* (z.B. Zahlkonstanten) schon zur Übersetzungszeit ausgewertet werden. Zur ihrer Berechnung werden ebenfalls nur solche Werte herangezogen, die schon bei der Übersetzung festgelegt sind:

```
constexpr int size = sizeof(int);
constexpr char const* s = "Hallo"; // char const * const s
```

- C.8 Auch Rückgabewerte als `constexpr` markierter Funktionen und Konstruktoren sind vom Compiler auswertbar, sofern zu ihrer Berechnung nur Anweisungen herangezogen werden, die schon bei der Übersetzung auswertbar sind¹⁴:

```
constexpr int sqr(int x) { return x*x; }
constexpr int vier = sqr(2);
char arr[sqr(4)];

struct Punkt
{
    int x, y;
    constexpr Punkt(int a = 0, int b = 0) : x(a), y(b) {}
};

constexpr Punkt p = { 2, 3 };
```

constexpr-Funktionen werden garantiert nur beim Übersetzen berechnet. `constexpr` wiederum garantiert die Anfangswertbelegung statischer Variablen. Das *static initialization order fiasco* wird verhindert.

```
constexpr auto dim(size_t m, size_t n) { return m*n; }
constexpr auto size = dim(2,3);
```

Zusicherungen mit `static_assert` liefern schon beim Übersetzen einen Fehler, wenn der logische Ausdruck nicht zutrifft. Dabei können als `constexpr` markierte Ausdrücke in die Berechnung einfließen:

```
static_assert(sizeof(int) == 4, "keine 32bit-Architektur");
static_assert(vier == sqr(2)); // ab C++17 auch ohne Fehlerbeschreibung
```

Zur Laufzeit kann die Einhaltung von Bedingungen mit

```
assert(auswahl < 4); // #include <cassert>
```

geprüft werden. Trifft der Ausdruck nicht zu, wird der Programmablauf mit einer (implementierungsabhängigen) Fehlermeldung beendet:

```
Assertion "auswahl < 4" failed in file: assert.cpp, Line 29.
```

¹⁴Die Regeln hierfür wurden seit der Einführung in C++11 mehrfach gelockert.

C.2.4 Operationen

Zuweisungen $\langle Lvalue \rangle = \langle Ausdruck \rangle;$

ändern Variablenwerte. Die linke Seite (das Ziel der Zuweisung) muss nicht unbedingt ein Variablenname sein, vielmehr ein Ausdruck¹⁵, der einen modifizierbaren Speicherplatz besitzt:

```
int j=1;
char p[2][4] = {"du", "ich"};
*p[j] = 'a'; // Ergebnis: "ach"
```

Eine Zuweisung ist ebenfalls wieder ein Ausdruck. Ihr Wert ist gleich dem des Linkswertes nach der Zuweisung. Zuweisungen können dadurch in einer Kette erfolgen oder an Stellen auftreten, wo man sie nicht erwartet. Mehrere Zuweisungen werden von rechts nach links abgearbeitet (*rechtsassoziativ*).

```
a = b = c = 123;
x = sqrt(a=3*x); // kryptisch!
```

Verbundzuweisungen $\langle Lvalue \rangle \langle Binäroperator \rangle = \langle Ausdruck \rangle;$

mit den Verbundoperatoren (Operatornamen darunter)

```
+= -= *= /= %= &= |= ^= <<= >>=
and_eq or_eq xor_eq
```

sind *Kurzschreibweisen* für binäre (zweistellige) arithmetische oder bitweise Operationen mit anschließender Zuweisung an den linken Operanden:

```
j += 10; // j = j+10; => 10 hinzu addieren
j *= 1+2; // j = j*(1+2); => verdreifachen, beachte Rangfolge!
*p[j] += 3; // *p[j] = *p[j]+3;
```

Die Speicheradresse des linksseitigen Ausdrucks der Operationen muss auf diese Weise nur einmal ermittelt werden.

Arithmetische Operationen $x+y$ $x-y$ $x*y$ x/y $x\%y$

zur Addition, Subtraktion und Multiplikation sind auf alle Grunddatentypen anwendbar. Die Division liefert einen Gleitkommawert, falls mindestens ein Operand vom Gleitkommatyp ist. Bei ganzzahligen Operanden ist das Ergebnis der ganzzahlige Anteil des Bruches. Der Divisionsrest lässt sich bei ganzzahligen Operanden mit dem Modulo-Operator % berechnen:

```
std::cout << 22/3.0 <<' ' << 22.0/3 <<' ' << 22/3 <<' ' << 22%3 <<'\n';
// Ausgabe: 7.3333... 7.3333... 7 1
```

¹⁵Ein Linkswert ist ein Ausdruck, der links von = stehen darf (engl. *Lvalue*).

Typumwandlungen erfolgen *implizit* vor Operationen bei Operanden unterschiedlichen Typs, immer zum „größeren“ Typ hin:

```
double f(char ch, int i, float f, double d)
{
    return i%ch + f/i - d*i;
        // int + float - double
        // float - double
        // also: double
}
```

Explizite Typumwandlung $\langle typ \rangle(\langle ausdruck \rangle)$ oder $(\langle typ \rangle)\langle ausdruck \rangle$ ¹⁶ kann manchmal notwendig sein, um etwa eine bestimmte Art der Division zu erzwingen:

```
double dezimal(int x, int y) // Beispiel: x = 3, y = 2
{
    return double(x)/y; // 3.0/2 = 1.5 statt 1
}
```

Typumwandlungen bei der Zuweisung und Wertrückgabe in Funktionen erfolgen automatisch und ohne Warnung, falls rechte und linke Seite bzw. Ausdruck und Rückgabetyptyp verschieden sind. Der rechte Ausdruck wird in den Typ der linken Seite ohne Warnung umgewandelt:

```
void g(int i, long l, float f, double d)
{
    signed char c = -128; // signed char <== int
    d = f = l = i = c; // double <== float <== long <== int <== char
}
```

Passt der Wert des Ausdrucks in den Wertebereich des Lvalues, bleibt der Wert erhalten, auch Vorzeichen werden korrekt behandelt. Bei Umwandlung von Gleitkommazahlen in Ganzzahlen wird der gebrochene Anteil abgeschnitten:

```
int pi = 3.1415926535; // pi=3!
```

Passt der rechtsseitige Ausdruck nicht in den Wertebereich der linken Seite, so werden bei ganzzahligen Typen höherwertige Bits weggelassen, bei Gleitkommatypen ist das Ergebnis nicht definiert:¹⁷

```
signed char c = 65535; // c= -1
```

Umwandlungen zwischen **signed** und **unsigned** erfolgen über das Zweierkomplement.

¹⁶C-Notation, siehe auch bei Typecast-Operationen

¹⁷Das ist eine verharmlosende Umschreibung für maschinenabhängig.

Inkrement- und Dekrementoperatoren `++` `--` erhöhen bzw. senken den Wert ihres Lvalue-Operanden um 1:

```
x++; --y; // bedeuten: x = x+1; y = y-1;
```

In zusammengesetzten Ausdrücken hängt von der Stellung des Operators ab, ob der alte oder der neue Wert des Operanden weiterverwendet wird. *Präfix*- (vorangehende) Operatoren verändern ihren Operanden *vor* der Weitergabe des Wertes. *Postfix*- (nachgestellte) Operatoren liefern den alten Wert zur weiteren Auswertung und verändern *nachher* den Wert ihres Operanden:

```
x = 10;
y = x++; // y = x; x = x+1; also: x = 11 y = 10
y = ++x; // x = x+1; y = x; also: x = 12 y = 12
```

Vergleiche und logische Verknüpfungen liefern als Ergebnis `false` oder `true`¹⁸:

<code>x < y</code>	x kleiner als y	<code>a && b</code>	a und b	<code>a and b</code>
<code>x <= y</code>	x kleiner/gleich y	<code>a b</code>	a oder b	<code>a or b</code>
<code>x == y</code>	x gleich y	<code>!a</code>	nicht a,	<code>not a</code>
<code>x != y</code>	x nicht gleich y	<code>x not_eq y</code>	(<code>a == 0</code>)	
<code>x >= y</code>	x größer / gleich y			
<code>x > y</code>	x größer als y			

Logische Ausdrücke werden, von links beginnend, nur soweit ausgewertet, bis das Ergebnis feststeht: Der Ausdruck `x != 0 && 1/x < 1` vermeidet eine Division durch Null bei `1/x`.

Bitweise Operationen werden auf allen Bits ganzzahliger Typen ausgeführt:

<code>i&j</code>	<code>i bitand j</code>	bitweise UND
<code>i j</code>	<code>i bitor j</code>	bitweise ODER
<code>i^j</code>	<code>i xor j</code>	bitweise XOR (Exklusiv-Oder)
<code>~j</code>	<code>compl j</code>	Bitkomplement (vertauscht 0 und 1)
<code>i << n</code>		Linksschieben um n Bits ¹⁹
<code>i >> n</code>		Rechtsschieben um n Bits

Der bedingte Ausdruck `<Ausdruck1> ? <Ausdruck2> : <Ausdruck3>`

mit dem dreistelligen Entscheidungsoperator kann Verzweigungen kompakt darstellen. Ist `<Ausdruck1>` wahr (ungleich Null), so wird der Wert von `<Ausdruck2>` berechnet, sonst `<Ausdruck3>`. `<Ausdruck2>` und `<Ausdruck3>` müssen typgleich sein:

```
min = x<y ? x : y; // Minimum von x und y
x<y ? x : y = 100; // Variable mit kleinerem Wert wird 100 zugewiesen
```

¹⁸Jeder Wert ungleich 0 gilt als wahr: C++-Programmierern fällt „Ja“-Sagen leichter.

¹⁹Beim Bitschieben muss der rechte Operand positiv sein. Das Ergebnis des Rechtsschiebens bei negativen `signed`-Werten des linken Operanden ist maschinenabhängig.

Der Kommaoperator $\langle \text{Ausdruck1} \rangle, \langle \text{Ausdruck2} \rangle \dots$

verbindet mehrere Ausdrücke zu einer Liste und wertet diese von links nach rechts aus. Der letzte Wert ist der Wert des Ausdrucks, alle vorhergehenden werden verworfen. Dies erlaubt mehrere „Anweisungen“ dort, wo nur ein Ausdruck stehen darf, z. B. in einem Schleifenkopf:

```
for(i = 0, j = 10, n = 0; i < j; ++i, --j) ++n;
```

Typinformationen zum *Speicherbedarf* von Datentypen und Variablen lassen durch `sizeof($\langle \text{Typ} \rangle$)` bzw. `sizeof $\langle \text{Ausdruck} \rangle$` ermitteln. Die Abfrage `typeid($\langle \text{Ausdruck} \rangle$)` erzeugt ein `std::type_info`-Objekt, welches zur Analyse verwendet werden kann:

```
#include <iostream>
#include <typeinfo>

void typtypen()
{
    std::cout << typeid(int).name() << ' ' << sizeof(int) << '\n';
}
}
```

Typecasting $\langle \langle \text{Typ} \rangle \rangle \langle \text{Ausdruck} \rangle$

erzwingt die Umwandlung des $\langle \text{Ausdruck} \rangle$ in einen anderen $\langle \text{Typ} \rangle$. Die Sinnhaftigkeit des Dateninhaltes wird dabei aber nicht garantiert. Typecasts setzen das Typen- und Schutzsystem von C++ außer Kraft und sind im Quelltext schwer zu erkennen. Um genauer anzugeben, warum ein *Typecast* notwendig war, sollten die auffälligeren Cast-Formen benutzt werden:

- `static_cast $\langle \text{Typ} \rangle$ ($\langle \text{Ausdruck} \rangle$)`
konvertiert verwandte Typen wie verschiedene Zeigertypen, Aufzählungen, ganzzahlige und Gleitkommatypen und erlaubt noch eine minimale Typprüfung,
- `dynamic_cast $\langle \text{Typ} \rangle$ ($\langle \text{Zeiger oder Referenz} \rangle$)`
um in einer Klassenhierarchie einen *Downcast* oder *Crosscast* zu erlangen; der Compiler prüft die Zulässigkeit zur Laufzeit, bei Scheitern wird ein Nullzeiger geliefert oder eine `bad_cast`-Ausnahme geworfen,
- `const_cast $\langle \text{Typ} \rangle$ ($\langle \text{konstanter Ausdruck} \rangle$)`
um Schreibrechte auf einen konstanten Ausdruck zu erlangen (Einbrecher!),
- `reinterpret_cast $\langle \text{Typ} \rangle$ ($\langle \text{Ausdruck} \rangle$)`
konvertiert nicht verwandte Typen wie Zeiger und `int` (ohne Typprüfung):

```
IO_device* d1 = reinterpret_cast<IO_device*>(0xFF00);
```

Weitere Operatoren (Bereichsauflösung `::` in Klassen und Namensbereichen, Werfen einer Ausnahme `throw`, Freispeicherverwaltung `new delete`, Zeigerzugriff `& *`, Strukturkomponentenzugriff `.` \rightarrow `.*` \rightarrow `*` und Feldelementzugriff `[]`) werden an geeigneter Stelle beschrieben.

Tabelle 6: Rangfolge der Operatoren.

Bereichsauffösung	::	(höchster Rang)
unär (Postfix)	++ -- <Typ>() [] . ->	
unär (Präfix)	++ -- ! ~ - + * & delete new	
Elementselektion	.* ->*	
multiplikativ	* / %	
additiv	+ -	
Bitschieben	<< >>	
Dreiwegevergleich	<=>	
Vergleich	< <= > >=	
	== !=	
bitweise	&	
	~	
logisch	&&	
Entscheidung	? :	
Zuweisung	= += -= *= /= %= <<= >>= &= = ^=	
Liste	,	(niedrigster Rang)

*Effektives Schreiben (oder Lesen) in C ohne Kenntnis dieser Regeln ist unmöglich.
Bitte studiere die Rangtabelle jeden Abend beim Zähneputzen.
– Numerical Recipes*

C.2.5 Auswerteregeln

Die Rangfolge (*Präzedenz*) der Operatoren (Tab. 6) lässt sich durch Klammersetzung ändern: $2*(3+5)$ statt $2*3+5$. Aufeinander folgende unäre Präfix-Operatoren und Zuweisungen gleichen Ranges binden von rechts nach links (*rechtsassoziativ*), alle anderen Operatoren binden von links nach rechts (*linksassoziativ*):

```
int i = 2+3+5;      // i= (2+3)+5;
x = y += z=5;      // x= (y+=(z=5));
```

Die Auswertungsreihenfolge der Operanden ist außer bei `&& || ?: ,` compiler-abhängig. Nicht portable und unklare Konstruktionen sind zu meiden:

►D.1.1

```
int x = 0, i = 1;
v = (x=4) - (--x); // v = 1 oder v = 5 ?
a[i] = i++;       // a[1] = 1 oder a[2] = 1 ?
```

C.3 Gruppierung von Daten

C.3.1 Felder

Eine Anzahl typgleicher Elemente $\langle Typ \rangle \langle Feldname \rangle [\langle Anzahl \rangle]$;
belegt einen zusammenhängenden Speicher von `sizeof($\langle Typ \rangle$) * $\langle Anzahl \rangle$` Bytes:

```
int a[10]; // 10 int-Elemente a[0]..a[9]
```

Der Zugriff auf die einzelnen Elemente `a[0]` bis `a[9]` erfolgt ohne Bereichsprüfung.²⁰
Schreibzugriffe außerhalb der Feldgrenzen haben schwer findbare, häufig fatale Folgen.²¹

```
a[-10] = 5; // zehnter int vor dem Feldanfang
a[1000] = 16; // tausendster danach (irgendwo)
```

► **C.13.2 Zeichenketten** sind `char`-Felder, die mit einem Nullbyte `'\0'` abschließen.²²

```
void C_Zeichenketten()
{ char s1[6] = {'H','a','l','l','o','\0'}; // 6 Byte
  char s2[] = "kurzer Prozess"; // 15 Byte inklusive '\0'
  s2[4] = 0; // abschneiden: "kurz"
  std::cout << "noch " << std::string(s2).size() << " Zeichen.\n"; // 4
}
```

Mehrdimensionale Felder werden durch Aufreihungen von eckigen Klammern erklärt (Felder von Feldern). Zwischen benachbarten Speicherplätzen ändert sich der rechteste Index am schnellsten („zeilenweise“ Anordnung). Bei der Definition kann das Feld mit Anfangswerten belegt werden:

```
int rechteck[2][3] = { {1, 2, 3}, {4, 5, 6} };
```

Die inneren geschweiften Klammern können bei der Initialisierung weggelassen werden, der äußerste Index ebenfalls — er wird dann automatisch vom Compiler bestimmt. Andernfalls ist auch unvollständige Initialisierung möglich. Die Belegung der Feldwerte erfolgt dann mit steigendem Index, falls durch innere geschweifte Klammern nichts anderes erzwungen wird:

```
int y[2][3] = {1, 2, 3}; // nur erste Zeile y[0][j] festgelegt
int z[2][3] = {{1}, {4}}; // nur erste Spalte z[i][0] festgelegt
```

²⁰Sogenannte *C-Index-Konvention*. Jedem seine Extrawurst (erschwert Portierungen):

BASIC	<code>a(0)..a(anz)</code>	zeilenweise	<code>a(i,j)</code>
C	<code>a[0]..a[anz-1]</code>	zeilenweise	<code>a[i][j]</code>
FORTRAN	<code>a(1)..a(anz)</code>	spaltenweise	<code>a(i,j)</code>
PASCAL	<code>a[1]..a[anz]</code>	zeilenweise	<code>a[i,j]</code>

²¹„Wilde“ Veränderung von Daten bis zum Systemabsturz.

²² Die Klasse `std::string` bietet mehr Sicherheit und Komfort.

C.3.2 Strukturen

Inhaltlich zusammengehörende Daten unterschiedlicher Typen lassen sich als *Komponenten* unter einem *Strukturnamen* zusammenfassen:

```
struct <Strukturname>opt { <Komponenten> } <Variablenliste>opt;
```

Vorwärtsdeklarationen

```
struct <Strukturname>;
```

können benutzt werden, solange der Compiler keine Information über den Strukturinhalt benötigt, z. B. um einen Zeiger zu bilden.

Die Initialisierung von Strukturvariablen kann bei ihrer Definition erfolgen. Dazu sind die Initialisierungswerte in der Reihenfolge der Komponentendeklaration anzugeben.

Zuweisungen kopieren Strukturen als Ganzes (Byte für Byte), auch enthaltene Felder. Der Zugriff auf einzelne Komponenten erfolgt durch $\langle Variable \rangle . \langle Komponente \rangle$.

```
struct Atom
{
    char symbol[3];
    double mass;           // bezogen auf 1u = 1/12 m(12 C 6)
};

Atom const elements[] =
{
    "n" , 1.0086,
    "H" , 1.0079,
    "He", 4.0026,         // usw.
};

Atom H = elements[1],    // Zuweisung kopiert gesamte Struktur
    He = elements[2];

double const u = 1.6605655e-27, // atomare Masseeinheit (in kg)
           c = 2.99792458e+8; // Lichtgeschwindigkeit (in m/s)

float mass_defect = (4*H.mass-He.mass)*u, // in kg
      fusion_energy = mass_defect*c*c;    // in Ws
```

Neben Datenfeldern dürfen Strukturen auch *Methoden* zur Manipulation der enthaltenen Daten enthalten (siehe Klassenkonzept).

C.3.3 Typ-Aliasnamen

```
using <neuer Typname> = <Typname>;
```

```
typedef <Typ> <neuer Typname>;
```

geben schon definierten oder gerade deklarierten namenlosen Typen neue Namen:

```
using Element = Atom;
```

```
typedef struct { int x,y; char color; } Pixel;
```

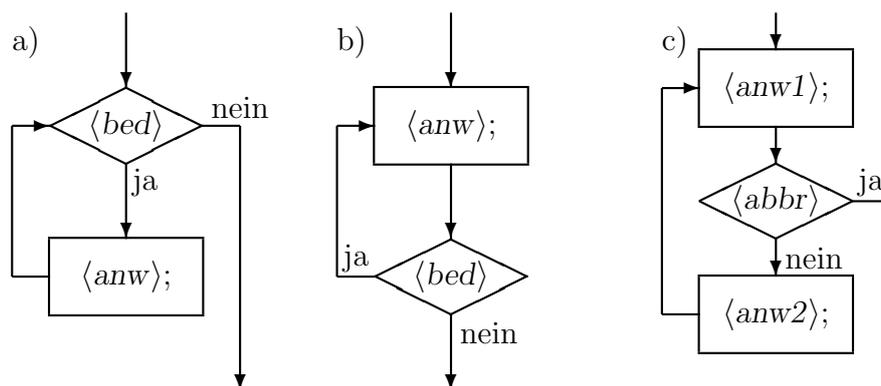


Abbildung 1: Schleifen mit Test (a) am Anfang, (b) am Ende und (c) in der Mitte.

C.4 Steueranweisungen

C.4.1 Schleifen

Bestimmte Programmteile müssen mehrfach durchlaufen werden. Sie werden solange ausgeführt, wie eine bei jedem Schleifendurchlauf ausgewertete *Testbedingung* wahr (ungleich 0) ist. Beim Testergebnis falsch wird die Schleife verlassen. Der Schleifentest kann an verschiedenen Stellen stehen (Abb. 1). *Schleifenanweisungen* können Einzelanweisungen $\langle \text{Anweisung} \rangle$; oder ganze Anweisungsblöcke sein. Auch die Leeranweisung `;` ist möglich.

Schleifen mit abweisendem Test `while(⟨Bedingung⟩) ⟨Anweisung⟩;`
 prüfen vor jeder Ausführung der Schleifenanweisung, ob die Bedingung erfüllt ist. Ist die Bedingung schon beim ersten Test falsch, wird der Schleifenrumpf überhaupt nicht ausgeführt.

```
double wurzel(double x) // Wurzelziehen, Heron von Alexandria um 75 u.Z.
{
    double a = x, y = 1; // Startbedingung x>=1
    while (x > y)
    {
        x = (x+y)/2;
        y = a/x;
    }
    return x;           // nach Schleifenende x=y=sqrt(a)
}
```

Zählschleifen `for(⟨Initialisierung⟩; ⟨Bedingung⟩; ⟨Inkrement⟩) ⟨Anweisung⟩;`
 werden in anderen Sprachen so benannt, weil ein *Schleifenzähler* bei jedem Durchlauf um einen bestimmte Schrittweite (*Inkrement*) erhöht bzw. abgesenkt wird und der Endwert des Zählers bei Schleifenbeginn feststeht.

```
for (fak = 1; n > 1; n--) // n! = 1*2*...*n
    fak *= n;
```

Hier sind `for()`-Schleifen wesentlich flexibler einsetzbar. Sie haben eine gleichwertige Formulierung als `while()`-Schleife:

```

    for (<Initialisierung>;
        <Bedingung>;
        <Inkrement>)
        <Anweisung>;

```

```

    { <Initialisierung>;
      while (<Bedingung>)
      { <Anweisung>;
        <Inkrement>;
      }
    }

```

Für `<Initialisierung>`, `<Bedingung>` und `<Inkrement>` dürfen beliebige Ausdrücke stehen. Zusammengesetzte, aber auch leere Ausdrücke sind möglich. Eine leere Bedingung gilt als wahr: `for(;;) <Anweisung>;` wird damit zur *Endlosschleife*.

Schleifen mit Test am Schleifenende `do <Anweisung>; while(<Bedingung>);` werden mindestens einmal durchlaufen, bevor die Bedingung getestet wird:

```

int eingabe_von_1_bis_5()
{ int num;
  do
    cin >> num;
  while (num < 1 || num > 5); // bei Fehleingabe wird wiederholt
  return num;
}

```

Schleifenabbruch kann mit `break;` innerhalb des Anweisungsblocks bewirkt werden. Die Schleife wird an dieser Stelle sofort verlassen (bei verschachtelten Schleifen nur die innerste). Eine Schleife mit Testbedingung in der Mitte:

```

for (;;) // Endlosschleife, auch while (true)
{ anw1;
  if (abbruchbedingung()) break; // bei Abbruchbedingung verlassen
  anw2;
}

```

Durch `continue;` wird ans Blockende gesprungen, ohne die Schleife abzubrechen:

```

while ((p = naechster_passagier()) != niemand)
{ ausweiskontrolle(p);
  if (scheinbar_harmlos(p)) continue;
  zollkontrolle(p);
}

```

Die Anweisungen `break;` und `continue;` sollten als „verkapptes `goto`“ mit Vorsicht benutzt werden, da sie sich meist vermeiden lassen, ohne die Lesbarkeit zu gefährden:

```

while ((p = naechster_passagier()) != niemand)
{ ausweiskontrolle(p);
  if (!scheinbar_harmlos(p)) zollkontrolle(p);
}

```

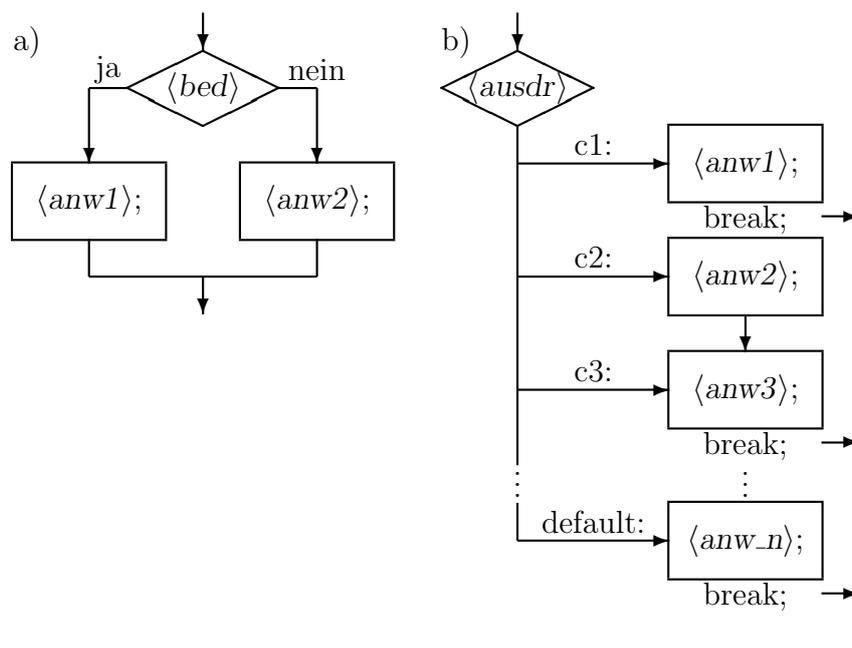


Abbildung 2: (a) Einfach- und (b) Mehrfachverzweigung.

C.4.2 Verzweigungen

Manche Anweisungen sind nur unter bestimmten Bedingungen auszuführen (Abb. 2). Ab C++17 können Initialisierer angegeben werden.

Entscheidungen `if (<init;>opt <Bedingung>) <Anweisung1>; elseopt <Anweisung2>;opt` erlauben die wahlweise Abarbeitung von Anweisungen:

```
if (gut(Erbse)) toepfchen++; // Aschenputtel's Tauben
else kroepfchen++;
```

Der `else`-Zweig muss, wenn vorhanden, unmittelbar der `<Anweisung1>` folgen. Bei verschachtelten Entscheidungen wird `else` immer an das unmittelbar vorhergehende `if()` gebunden. Eine andere Zuordnung ist durch Blockklammern `{ }` möglich. `if-else-if`-Leitern werden häufig verwendet:

```
if (<Bedingung1>)
    <Anweisung1>; // nur eine Anweisung erfolgt
else if (<Bedingung2>)
    <Anweisung2>;
...
else
    <Anweisung n>; // diese, falls nichts zutrifft
```

Mehrfachverzweigungen lassen sich als `switch()`-Anweisung schreiben, wenn der Ausdruck der Verzweigungsbedingung nur (wenige) ganzzahlige Werte annimmt:

```

switch (<init;>opt <Ausdruck>)           // Falls <Ausdruck>
{ case <c_1> : <Anweisungsfolge1>;      // einen Wert <c_i> annimmt,
  break;                               // wird ab entsprechender Stelle
  case <c_2> : <Anweisungsfolge2>;      // weitergearbeitet.
  break;                               // Bei break; endet Abarbeitung.
  :
  case <c_n> : <Anweisungsfolge n>;
  break;
  default : <sonstige Anweisungen>; // diese, falls nichts zutrifft
}

```

Jede Konstante $\langle c_i \rangle$ braucht ein eigenes *Label*. Es sind keine Bereichsangaben möglich.²³ Die Reihenfolge von Konstanten und `default`: ist frei wählbar. Mehrere `case`-Label können gemeinsamen Code besitzen, weil `break`; nicht nach jedem `case`-Zweig zu stehen braucht:

```

switch (ch = read_device())
{ case 1:
  case 2:
  case 3: flag=1;          // 1,2,3
    break;
  case 4: flag=2;          // nur 4
  case 5: error(flag);    // 4 und 5
    break;
  default: process(ch); // alle anderen ch
}

```

C.4.3 Sprunganweisungen

Obwohl wegen der Gefahr von Spaghetti-Code verpönt²⁴, kann es nützlich sein, innerhalb einer Funktion an beliebiger Stelle eine Sprungmarke $\langle Label \rangle$: zu definieren, und mit `goto <Label>;` an diese Stelle zu springen:

```

for (...;...;...)
{ for (...;...;...)
  { while (...)
    { ...
      if (katastrophe()) goto notfall;
      ...
    }
  }
}
... // normales Ende
notfall: ... // retten, was zu retten ist

```

²³Wie z. B. in der `case`-Anweisung von PASCAL.

²⁴Siehe E. Dijkstra: *Goto statements considered harmful*, Comm. of the ACM, Bd. 11, März 1968.

C.5 Funktionen

Funktionen erlauben uns, auf dem aufzubauen, was andere vor uns programmiert haben.
– Brian Kernighan & Dennis Ritchie

C.5.1 Programm-Grundbausteine

Ein Programm ist im Wesentlichen eine Ansammlung von einander aufrufenden Funktionen. Funktionen erleichtern die Gliederung von Anweisungskomplexen in kleinere, auch wiederholt abarbeitbare Einheiten und verbergen Details vor dem Nutzer. Sie lassen sich in allgemein nutzbare *Bibliotheken* zusammenfassen und in mehreren Programmen verwenden.

C.5.2 Vereinbarung

Funktionsdeklarationen $\langle \text{Ergebnistyp} \rangle \langle \text{Funktionsname} \rangle (\langle \text{Parameterliste} \rangle);$
erfolgen durch Angabe ihres *Funktionskopfes* (*Prototypen*), gefolgt von einem Semikolon. Eine Funktion kann mehrfach deklariert werden, sofern die Prototypen übereinstimmen. Eine Funktion muss vor dem Aufruf mindestens deklariert werden. Das kann auch noch innerhalb eines Anweisungsblocks geschehen, besser jedoch am Dateianfang:

► C.5.5

```
double parabel(double x);
```

Die Parameterliste enthält, durch Komma getrennt, die *Parameter* der Funktion, jeweils mit Typ und, bei Deklarationen optional, Name.²⁵ Bei parameterlosen Funktionen kann die Parameterliste leer bleiben:

```
void faul(); // gleichbedeutend mit void faul(void);
```

Funktionsdefinitionen

$\langle \text{Ergebnistyp} \rangle \langle \text{Funktionsname} \rangle (\langle \text{Parameterliste} \rangle) \{ \langle \text{Anweisungen} \rangle \}$
geben nach dem Funktionskopf anstelle des Semikolons den *Funktionsrumpf* an. Der Funktionskopf muss bei getrennter Deklaration und Definition übereinstimmen.

```
double parabel(double x) { return x*x-2*x+4; }
```

Eine Funktion kann nur außerhalb anderer Funktionen und nur einmal definiert werden.²⁶ Alle Funktionen haben externe Bindung (sind global im Programm).²⁷ Die Reihenfolge der Funktionsdefinitionen im Quelltext ist beliebig.

²⁵Dies führt zum *most vexing parse*, wenn eine Variablen-Initialisierung als Funktion aufgefasst wird: `int i(int(adouble));` — `i` als Funktion mit `int`-Parameter. Compiler geben im Unterschied zum Menschen dieser Lesart den Vorrang. Geschweifte statt runder Klammern für die Initialisierer lösen diese Mehrdeutigkeit auf: `int i{int(adouble)};`

²⁶Sprachen wie PASCAL erlauben Verschachtelungen (lokale Prozeduren).

²⁷Als `static` oder in `namespace{...}` deklarierte Funktionen sind nur innerhalb einer Datei sichtbar.

Die Rückkehranweisung `return <Ausdruck>;`

beendet die Abarbeitung der Funktion. Der Wert von `<Ausdruck>` wird an den Aufrufer der Funktion übergeben und kann, muss aber nicht, von diesem ausgewertet werden:

```
double y = 2 * parabel(2.7183);
```

Bei Funktionen vom Typ `void` kann die Anweisung `return;` ohne Ausdruck entfallen. Dann endet die Abarbeitung des Funktionsrumpfes bei der schließenden Klammer `}`. Rückkehranweisungen können mehrfach, auch mitten im Funktionsrumpf stehen:

```
long ggT(long a, long b)    // grösster gemeinsamer Teiler (a>=0, b>0)
{                          // Algorithmus von Euklid (365?-300? v.u.Z.)
    if (a == 0) return b;
    return a>b ? ggT(a%b, b) : ggT(b%a, a); // rekursive Funktion
}
```

inline deklarierte kleine Funktionen vermeiden uneffiziente Funktionsaufrufe. Statt dessen wird der Rumpf sinngemäß in den Code eingefügt. Sie sind typsicher und haben nicht die von Präprozessormakros her bekannten und berüchtigten Nebeneffekte.

```
inline int minimum(int x, int y) { return x<y ? x : y; }
// ...
{ int m = 3;
  int n = minimum(--m, 3); // n=2
}
```

Überladene Funktionen gleichen Namens, aber unterschiedlicher Parametertypen, sind definierbar. Der Compiler prüft beim Aufruf anhand der Parametertypen, welche Funktion aufgerufen werden soll:

```
char minimum(char x, char y) { return x<y ? x : y; }
float minimum(float x, float y) { return x<y ? x : y; }

char a = 2, b = 3;
float f1 = 1, f2 = 2;
char c = minimum(a, b); // minimum(char, char)
float f3 = minimum(f1, f2); // minimum(float, float)
```

Funktionsschablonen (engl. `template`) legen Parametertypen erst beim Funktionsaufruf fest: ►C.9

```
template <typename T>
T minimum(T x, T y) { return x<y ? x : y; }

int i = 2, j = 3;
double d1 = 1, d2 = 2;
int k = minimum(i, j); // minimum(int, int)
double d3 = minimum(d1, d2); // minimum(double, double)
```

C.5.3 Parameter

Wertparameter erhalten beim Aufruf einer Funktion eine Kopie der Werte der aktuellen Parameter. Die Werte sind innerhalb der Funktion frei änderbar, ohne Auswirkungen auf übergebene äußere Variable (*Kopiersemantik*):

```
int digits(long num) // Anzahl der Ziffern
{
    int dig = 1;
    while (num /= 10) dig++;
    return dig;
}
```

Beim Aufruf `n = digits(MAXINT);` wird der Wert von `MAXINT` nicht verändert.

Standardparameter setzen automatisch Vorgabewerte ein, wenn beim Funktionsaufruf Parameter (von rechts nach links) weggelassen werden:

```
float dezimal(int z1=0, int nn=1) // Dezimalwert eines Bruchs
{
    // nn != 0
    return float(z1)/nn;
}
```

```
float null = dezimal(), zehn = dezimal(10), ein_half = dezimal(1,2);
```

Referenzparameter können die Werte aufrufender Variablen verändern (*Referenzsemantik*). Sie führen nur einen neuen Namen (*Alias*) für sie ein:

```
void swap(int& x, int& y) { int t = x; x = y; y = t; }
// ...
int i = 2, j = 3;
swap(i, j); // i = 3; j = 2;
```

►D.4 In C sind Referenzparameter nur indirekt über Zeiger möglich:

```
void swap(int *x, int *y) { int t = *x; *x = *y; *y = t; }
// ...
int i = 2, j = 3;
swap(&i, &j); // i = 3; j = 2;
```

Rechtswertreferenzen (*rvalue references*) `&&` als Parameter bzw. Rückgabewerte erlauben *Verschiebesemantik* ohne teure Kopien, sofern der Typ `T` diese unterstützt:

```
template <typename T>
T&& move(T&& rvalue_ref) { return rvalue_ref; }

template <typename T>
void swap(T& x, T& y) { T t = move(x); x = move(y); y = move(t); }
```

Felder als Parameter werden nicht als Ganzes kopiert, sondern nur der Zeiger auf das Anfangselement übergeben (*pointer decay*). Größenangaben haben lediglich Informationswert für den Nutzer:

```
int f1(int a[10]);
int f2(int a[]);    /* dasselbe */
int f3(int *a);    /* meist so */
```

C.5.4 Hauptprogramm

```
int main(int argc, char *argv[])
{
    // ... Anweisungen
    return statuscode;
}
```

muss in jedem Programm enthalten sein. In dieser Funktion beginnt der Programmablauf und hier endet er mit der Rückgabe eines Statuscodes an das aufrufende Programm (Betriebssystem). Ein Programm, das 0 zurückliefert, gilt als erfolgreich beendet. Die Anweisung `return 0;` am Ende von `main()` kann entfallen. Die Parameter `argc` und `argv` enthalten Anzahl und Zeichenketten der Kommandozeilenparameter.²⁸

- `argv[0]` ist stets der Programmname des Aufrufes.
- `argv[argc-1]` ist der letzte gültige Parameter.

Programme können als `int main()` deklariert werden, wenn sie keine Kommandozeilenparameter auswerten.

C.5.5 Deklarationsdateien

Wird eine Funktion in mehreren Quelldateien verwendet, muss ihr Prototyp in allen Dateien übereinstimmen. Erleichtert wird das, indem die Deklarationen global nutzbarer (aus Modulen *exportierter*) Funktionen in *Deklarationsdateien* (*Header*) untergebracht werden.²⁹ Vor der Verwendung der Funktion wird die zugehörige Deklarationsdatei mit

```
#include <header1>    // Datei im Standard-Include-Verzeichnis
#include "header2.h"  // Datei im aktuellen Verzeichnis
```

eingebunden.

►C.7.4

►D.3.3

²⁸In einigen Umgebungen sind weitere Parameter möglich.

²⁹Üblich sind Dateinamen mit `.h` als Endung. Standardheader müssen nicht einmal Dateien sein.

C.6 Ausnahmebehandlung

C.6.1 Ausnahmen werfen

`throw` \langle *Ausnahme* \rangle ;

Eine *Ausnahme* (engl. exception) ist eine Situation, in der das Programm nicht wie erwartet fortgesetzt werden kann. Gleichzeitig besteht an dieser Stelle kaum die Chance, geeigneter auf diese Situation zu reagieren als durch das *Werfen* (engl. throw) einer \langle *Ausnahme* \rangle , mit der der Programmablauf unterbrochen wird. \langle *Ausnahme* \rangle ist ein Objekt beliebigen Typs, das Informationen über die Ausnahmesituation enthalten kann.

```
float dezimalbruch(long z=0, long n=1)
{ if (n == 0) throw NullDivision{__FILE__,__LINE__};
  return float(z)/n;
}
```

C.6.2 Ausnahmefreiheit erklären

In Funktionen können Ausnahmen aller Art geworfen werden.³⁰ Funktionen können sich jedoch verpflichten, keine zu werfen:

```
float mul(float a, float b) noexcept { return a*b; }
```

Wird dennoch eine Ausnahme geworfen, führt `std::unexpected()` zum Programmende.

C.6.3 Ausnahmen abfangen

Nach dem Werfen einer Ausnahme werden die bis zu diesem Programmpunkt auf dem *Stack* entstandenen Variableninstanzen abgebaut (*stack unwinding*) und das Programm so kontrolliert beendet. (Indirekte) Aufrufer von Ausnahmen werfenden Funktionen können dem unmittelbaren Programmabbruch durch Einschließen der unsicheren Aufrufe in einen `try`-Block vorbeugen. Diesem Block folgen unmittelbar ein oder mehrere `catch`-Blöcke, die für die Reaktion auf Ausnahmen bestimmter Klassen zuständig sind. Der Typ der geworfenen Ausnahme wird mit den `catch`-Parametern verglichen. Beim ersten passenden Typ einer `catch`-Bedingung wird die Ausnahme *gefangen* (engl. catch), der Block abgearbeitet und dann nach dem letzten `catch`-Block normal fortgesetzt. Trifft keine Bedingung zu, geht der Ausnahmezustand weiter.

```
try{  $\langle$ unsichere Anweisungen $\rangle$  }
catch(  $\langle$ Typ $\rangle$   $\langle$ name $\rangle$ opt ) {  $\langle$ Anweisungen $\rangle$  }
 $\langle$ weitere catch-Blöcke $\rangle$ 
```

³⁰Ausnahmetypen der Standardbibliothek finden sich in `<exception>` und `<stdexcept>` .

```

void ausnahmebehandlung()
{
    try
    { // unsicherer Block: u.a. Aufruf von dezimalbruch()
      // ...
    }
    catch(NullDivision& f)
    { cerr << f.warum() << endl;
    }
    catch(Fehler& f)
    { cerr << f.warum() << endl;
    }
    catch(HeisseKartoffel&)
    { cerr << "Autsch!" << endl;
      throw;      // weiterwerfen
    }
    catch(...) // Ausnahmen beliebigen Typs
    { cerr << "Noch ein anderer Fehler!" << endl;
    }
    // hier geht's ordentlich weiter
}

```

Eine gefangene Ausnahme kann mit `throw;` weitergeworfen werden, falls die Situation in diesem Quelltextabschnitt nicht vollständig geklärt werden kann.³¹ Konstruktoren können Ausnahmen in der Initialisiererliste abfangen:

```

class Zahl {
public:
    Zahl(long z=0, long n=1);
private:
    float wert;
};

Zahl::Zahl(long z, long n)
try
: wert{dezimalbruch(z,n)}
{
    // Konstruktorrumpf
}
catch(NullDivision&)
{
    wert = 0;
}

```

³¹Die Kombination aus `catch(...)` und `throw;`, in anderen Sprachen als `finally`-Block bezeichnet, wird in C++ kaum benötigt, da Destruktoren die Aufräumarbeiten erledigen (*RAII*-Prinzip).

C.7 Programmorganisation

C.7.1 Module

Module unterteilen umfangreiche Programme. Die Nutzung erfolgt über *Schnittstellen*.

Importieren und nutzen `import modulname;`

```
import hello;
int main()
{
    greeting();
}
```

Importierbar sind (übergangsweise?) auch C++-Header wie `<iostream>`.³² Modulnamen können durch Punkte unterteilt werden: `std.core` und `std.core.algorithm` wären trotz gleicher Namensteile voneinander unabhängige Module.

Schnittstellendatei `export module <modulname>;`

In der Schnittstellen werden alle zum Modul gehörenden und seine exportierbaren Namen aufgeführt. `export` steht vor einzelnen Deklarationen, vor Klassen, Funktionen, Schablonen, Namensräumen oder als Block `export {...}`. Makros werden nicht exportiert.

```
export module hello;
export void greeting();
```

Ein Modul besteht aus genau einer Schnittstellendatei und null bis vielen Implementierungsdateien. Jede dieser Dateien ist eine *Übersetzungseinheit*.

Implementierungsdatei `module <modulname>;`

Die Zugehörigkeit zum Modul wird durch `module modulname;` festgelegt. Auf alle in der Schnittstelle aufgeführten Namen kann zurückgegriffen werden. Modulname und `import`-Anweisungen stehen vor allem anderen Deklarationen eines Moduls. Funktionen werden in der Modulschnittstelle oder anderen zum Modul gehörenden Dateien definiert:

```
module hello;
import <iostream>;
void greeting() { std::cout < "Hello, world\n"; }
```

Reexportieren `export import <modulname>;`

Schnittstellen anderer Module können von einer Schnittstelle mit exportieren werden:

```
export module noodles;
export import spaghetti;
...
```

³² Die Standardbibliothek wurde in C++20 noch nicht modularisiert. Modulnamen, die mit `std`, evtl. gefolgt von Ziffern, beginnen, sind für die Standardbibliothek reserviert.

Partitionen (erkennbar am Doppelpunkt im Namen)

```
export module geometry:vector;
...
```

können nur vom übergeordneten Modul importiert und auch reexportiert werden:

```
export module geometry;
export import :vector;
```

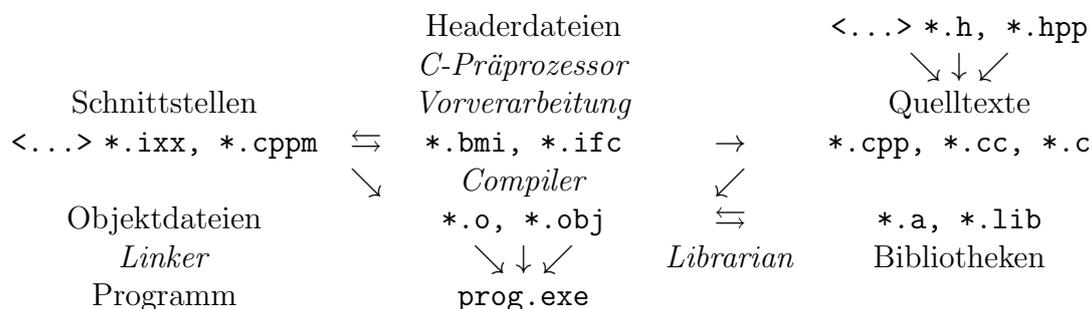
Auch Partitionen können neben der Schnittstelle Implementierungsdateien besitzen.

C.7.2 Modul-Bindung

In Modulschnittstellen definierte Variablen sind innerhalb aller Übersetzungseinheiten des Moduls nutzbar. Mit anderen externen Variablen kollidieren sie nicht, wenn sie nicht exportiert werden:

```
export module walk:position;
int x = 0;
-----
export module walk:steps;
import :position;
export void forward() { ++x; }
export void back() { --x; }
-----
export module walk;
export import :steps;
import :position;
export auto get_position() { return x; }
-----
int x = 7; // does not collide with x in module walk:
-----
import std.core; // Visual C++ 2019: statt import <iostream>;
import walk;
extern int x;
int main()
{
    forward();
    forward();
    back();
    std::cout << get_position() << " steps gone\n";
    std::cout << x << " is another, unaffected global variable\n";
}
```

Tabelle 7: Übersetzungsprozess.



C.7.3 Übersetzungsprozess

Um Module zu importieren, müssen zuerst deren Schnittstellen in der Reihenfolge ihrer Abhängigkeiten vorverarbeitet werden.³³ Zyklische Abhängigkeiten sind nicht erlaubt. Aus Übersetzungseinheiten entstehende *Objektdateien*³⁴ werden mit *Bibliotheken* zum ausführbaren Programm (*binary*) zusammengeführt (Tab. 7). Bibliotheken wie `libm.a` oder `math.lib` sind Sammlungen von Objektdateien, aus denen benötigte Teile zum Programm hinzugefügt (*gelinkt*) werden. Übersetzungsprozess und Projektverwaltung der Compiler ist systemabhängig unterschiedlich organisiert. Dies kann mit Befehlen

```
g++ hello.cpp -o hello
```

auf der Kommandozeile oder über `make`-Dateien geschehen, wobei nur geänderte Teile neu übersetzt werden müssen. Andere Systeme integrieren Projektverwaltung, Compiler und Linker in eine Entwicklungs-Umgebung.

C.7.4 Abschied vom Präprozessor?

Das vor C++20 unumgängliche Einbinden anderer Quellen per `#include` verlangsamt den Übersetzungsvorgang. Umfangreiche Header müssen immer wieder mit übersetzt werden. Manche Compiler behelfen sich mit Vorübersetzung (precompiled headers). Reihenfolge- und zyklische Abhängigkeiten (`#ifdef` und `#pragma once`), Verletzungen der „one definition rule“, die ungenügende Abschirmung von Implementierungsdetails (Pimpl-Idiom, `namespace xy::detail`) und vor unbeabsichtigten Wirkungen von Makros (vor denen `__Uglified_Names` in Bibliotheken schützen sollen) sind negative Folgen dieser Technik.

Module ändern die Organisation von Quelltexten, den Übersetzungsprozess und die Arbeit von Werkzeugen (Build-Systeme, Entwicklungsumgebungen) tiefgreifend. Der Umstellungsprozess wird aber Jahre dauern.

³³ Die Art, wie Compiler die Informationen der Schnittstellen aufbereiten, vorhalten und wiederfinden, z.B. als binary module interface (*.bmi, *.ifc), ist implementierungsabhängig. Hier kommt noch viel Arbeit auf die Hersteller von Buildsystemen zu.

³⁴Dateiendungen sind plattformspezifisch.

C.7.5 Namensräume

Namenskonflikte können das Zusammenspiel von Quellen, meist unterschiedlicher Herkunft, verhindern, wenn derselbe Name in ihnen unterschiedlich definiert wurde:

```
int init() { /* tue dies */ } // von Datei A exportiert
int init() { /* tue jenes */ } // von Datei B exportiert
```

Manchmal wird das erst spät bemerkt:

```
#include "dateiA"
#include "dateiB" // One Definition Rule verletzt ...
int i = init(); // welches init()? ... oder Linker error
```

Namensräume `namespace <Name>opt { <Deklarationen, Definitionen> }` begrenzen die globale „Umweltverschmutzung“:

```
namespace BereichA {
    int init() { /* tue dies */ }
}
namespace BereichB {
    int init() { /* tue jenes */ }
}
```

Beim Aufruf muss dann der Namensbereich mit angegeben werden (*Bereichsauflösung*):

```
int i = BereichA::init(); // o.k.
```

Einzelne Namen oder ganze Namensbereiche können in den aktuellen Block (oder global) importiert werden, solange dadurch kein Konflikt entsteht:

```
using BereichA::init; // einzelner Name
using namespace BereichA; // ganzer Bereich
int i = init(); // BereichA::init
int j = BereichB::init(); // o.k.
```

Ein Namensbereich darf mehrmals geöffnet und geschlossen werden:

```
namespace BereichA {
    struct Bruch { int z, n; };
    int nenner(Bruch b) { return b.n; }
}
```

In einem (geschachtelten) Namensbereich ist der Zugriff auf alle vorher im gleichen und in übergeordneten Namensbereichen deklarierten und importierten Namen erlaubt:

```
namespace std::literals {
    inline namespace string_literals {
        string operator ""s (char const* str, size len);
    } // "Hallo"s wird zu einem std::string
}
```

Tabelle 8: Header der C++-Standardbibliothek und ihr Einsatzgebiet (Auswahl). Von C geerbte Header sind durch * markiert.

<code><cstdint>*</code>	<code><cstdlib>*</code>	Grundlagen der C-Standardbibliothek
<code><typeindex></code> <code><typeinfo></code>	<code><type_traits></code>	Laufzeit-Typinformation
<code><limits></code>		Wertebereichsinformation
<code><cfenv>*</code>		Steuerung Gleitkommaeinheit
<code><memory></code> <code><new></code>	<code><memory_resource></code> <code><scoped_allocator></code>	Speicherverwaltung
<code><cassert>*</code> <code><exception></code> <code><system_error></code>	<code><cerrno>*</code> <code><stdexcept></code>	Fehlerbehandlung
<code><version></code>	<code><source_location></code>	Versions- und Quelltextinformation

Deklarationen eines `inline`-Namensbereiches sind auch im umgebenden sichtbar. Funktionen, deren Argumenttypen in demselben Namensbereich definiert wurden, können ohne Nennung des Namensbereiches aufgerufen werden (*argument dependent/Koenig lookup*):

```
BereichA::Bruch b = {4, 6};
int n = nenner(b);
```

Unbenannte Namensräume kapseln globale Namen, die nur in einer Übersetzungseinheit verfügbar sein sollen (`static file scope`):

```
namespace { int x = 1; } // x nur in dieser Datei
int y = x;
```

C.7.6 Standardbibliothek

Ihre Deklarationen befinden sich im Namensraum `std`. Die Header (Tab. 8, 9) werden durch `import`-Befehle bzw. `#include`-Anweisungen eingebunden:

►D.3

```
import <string>; // C++20
#include <iostream>
```

Tabelle 9: Header der C++-Standardbibliothek (Fortsetzung).

<code><cctype>*</code>	<code><cwctype>*</code>	Zeichenarten
<code><string></code>	<code><string_view></code>	Zeichenketten
<code><charconv></code>		Umwandlung von/in Zeichenketten
<code><format></code>	<code><iomanip></code>	Formatierung
<code><iostream></code>		Ein- und Ausgabeströme
<code><fstream></code>	<code><sstream></code>	Datei-, Zeichenkettenströme
<code><streambuf></code>	<code><syncstream></code>	Buffer, synchronisierte Ausgabe
<code><filesystem></code>		Dateisystem
<code><locale></code>		Internationalisierung
<code><regex></code>		reguläre Ausdrücke
<code><chrono></code>	<code><ctime>*</code>	Zeit und Kalender
<code><complex></code>		komplexe Zahlen
<code><cmath>*</code>	<code><numbers></code>	mathematische Funktionen, Konstanten
<code><random></code>		Zufallszahlen
<code><ratio></code>	<code><tuple></code>	Verhältnisse, Tupel
<code><any></code>		Wert eines beliebigen Typs
<code><optional></code>		evtl. vorhandener Wert
<code><variant></code>		typsicherer Ersatz für <code>union</code>
<code><bit></code>	<code><bitset></code>	Bitoperationen, Bitmengen
<code><initializer_list></code>		Anfangswertlisten
<code><valarray></code>		Zahlenfelder
<code><array></code>	<code><deque></code>	
<code><forward_list></code>	<code><list></code>	
<code><map></code>	<code><set></code>	Datencontainer
<code><unordered_map></code>	<code><unordered_set></code>	
<code><vector></code>		
<code><queue></code>	<code><stack></code>	Warteschlangen, Stapel
<code></code>		Datenbereiche
<code><algorithm></code>	<code><numeric></code>	Algorithmen und
<code><ranges></code>		koppelbare Bausteine
<code><compare></code>	<code><concepts></code>	Dreiwegevergleich, Typanforderungen
<code><functional></code>	<code><iterator></code>	Funktionsadapter, Iteratoren
<code><utility></code>		Hilfsfunktionen der Containerbibliothek
<code><atomic></code>	<code><barrier></code>	
<code><condition_variable></code>		
<code><coroutine></code>	<code><execution></code>	
<code><future></code>	<code><latch></code>	nebenläufige Prozesse
<code><mutex></code>	<code><shared_mutex></code>	
<code><semaphore></code>	<code><stop_token></code>	
<code><thread></code>		

C.8 Klassenkonzept

C.8.1 Objektbasierte Programmierung

Objekte (*Instanzen*) einer *Klasse* weisen bestimmte gemeinsame Merkmale (*Komponenten*) auf und verhalten sich gleichartig. Sie verfügen über eigene Funktionen (*Methoden*) zur Bearbeitung ihrer eigenen Daten (*Attribute*).

Die Klassendefinition `class <Klassenname> { <Komponenten> } <Instanzenliste>;` (öffentliche Schnittstelle) ist eine Typvereinbarung, die Daten und Methoden dieses Typs zusammenfasst. Bis auf die voreingestellten Zugriffsrechte sind `struct` und `class` gleichwertig. Der `<Klassenname>` ist Typname und zugleich Namensbereich.

►S. 40

```
class Stack {           // oder struct
public:
    Stack();           // Konstruktor
    void push(T x);   // Methoden
    T pop();
    int empty() const;
    int full() const;
private:
    static int const size = 100;
    T a[size];        // Datenkomponenten
    int pos;
};                    // noch keine Instanz
```

Instanzdeklarationen `<Klassenname> <Instanz>, *<Instanzzeiger>;` vereinbaren Variablen vom Typ `<Klassenname>`. Komponenten (Daten und Methoden) von Instanzen werden von außerhalb der Klasse als `<Instanz>.<Komponente>` bzw. `<Instanzzeiger>-><Komponente>` angesprochen:

```
void demo(Stack& s, T& x)
{
    if (!s.full() ) s.push(x);
    if (!s.empty()) x=s.pop();
}
```

Die Implementation der Methoden (Definition)

`<Ergebnistyp> <Klassenname>::<Methode>(<Parameterliste>) { <Methodenrumpf> }` kann außerhalb des Klassenrumpfes, auch für Nutzer unzugänglich, in einer getrennten Datei erfolgen. Die Methode hat Zugriff auf alle Komponenten ihrer Klasse.

Kleine Funktionen können `inline` deklariert werden. Dann muss der Quelltext der Implementierung allerdings im Header zugänglich bleiben. Innerhalb der Klassendefinition aufgeführte Methodenrumpfe gelten automatisch als `inline` deklariert.

Als `const` markierte Methoden dürfen keine Daten verändern, sondern nur lesend auf diese zugreifen, und nur konstante (lesende) Methoden aufrufen. Anders herum dürfen bei konstanten Instanzen auch nur konstante Methoden genutzt werden.

```
class Stack {
    // ...
    int empty() const { return pos == 0; }
    int full() const { return pos == size; }
};
inline void Stack::push(T x) { a[pos++] = x; }
inline T Stack::pop() { return a[--pos]; }
```

Konstruktoren $\langle \text{Klassenname} \rangle (\langle \text{Parameterliste} \rangle)$ und der parameterlose

Destruktor $\sim \langle \text{Klassenname} \rangle ()$ erledigen Routineaufgaben beim Erschaffen und Vernichten einer Instanz wie die Anfangswertbelegung der Komponenten (*Initialisiererliste*):

```
Stack::Stack() : pos{0} {}
```

Eine Klasse kann mehrere Konstruktoren besitzen, jedoch nur einen Destruktor. Der Compiler erzeugt für jede Struktur die speziellen Methoden:³⁵

► S. 43

```
struct Empty {
    Empty() {} // Standardkonstruktor
    Empty(const& X) {} // Kopierkonstruktor
    Empty(Empty&& X) {} // Verschiebekonstruktor
    Empty& operator=(const& X){return *this;} // Zuweisungsoperator
    Empty& operator=(Empty&& X) { return *this; } // Verschiebezuweisung
    ~Empty() {} // Destruktor
};
Empty a; // Standardkonstruktor
Empty b{a}; // Kopierkonstruktor
Empty c{std::move(a)}; // Verschiebekonstruktor, a nicht mehr nutzbar
b = c; // Zuweisungsoperator
b = std::move(c); // Verschiebezuweisung, c nicht mehr nutzbar
```

Kopie und Zuweisung sorgen für elementweise Übernahme der Attribute. Verschiebekonstruktor und -zuweisung können verschiebbare Daten billig aus dem rechtsseitigen Operanden holen. Sind eigene Konstruktoren definiert, muss einer aufgerufen werden:

```
struct X {
    X(char c) : X(int(c)) {} // delegiert Aufgabe
    explicit X(int i) {} // explicit gegen versehentliche Typumwandlung
    X() = default; // trotzdem erzeugen
    X(X const&) = delete; // keine Kopie erlaubt
};
X x{1}; // Konstruktor X(int)
x = 3; // Fehler: impliziter Aufruf x = X{3}
X z[5]; // Felder nutzen Standardkonstruktor
```

³⁵Werden eigene Konstruktoren/Zuweisungen/Destruktor definiert, erzeugt der Compiler einige der vorgefertigten Methoden nicht mehr (Tab. 27 auf S. 128). Das reservierte Wort **this** in Methoden ist ein Zeiger auf die aufrufende Instanz.

Zugriffsrechte auf ihre Komponenten (Daten und Methoden) werden von den Klassen verliehen und bieten Schutz gegen unbefugte Manipulationen. Während bei `struct` auf alle Komponenten *öffentlich* zugegriffen werden kann, sind `class`-Komponenten nur innerhalb der Klasse ansprechbar (*privat*).

►C.8.3

Nach `public`: deklarierte Bestandteile können von außerhalb angesprochen werden. `protected`:-Abschnitte erlauben *geschützten* Zugriff nur für die Klasse und ihre Erben. `private`:-Komponenten sind auch den Nachkommen nicht zugänglich. In der Klassendefinition können Abschnitte mit Zugriffsrechten in beliebiger Reihenfolge, beliebig oft aufgeführt werden.

Eine Klasse kann andere Klassen und Funktionen zu *Freunden* (`friend`) erklären, die dann Zugriff auf private Daten und Methoden haben.³⁶

```
class X {
public:
    X(int a) : x{a} {}
    friend sum(X xx, int i);
protected:
    int add(int i) { return x + i; }
private:
    int x;
} a(10);

int sum(X xx, int i) { return xx.x+i; } // Freund von X

int j = sum(a,2); // j = 12
int k = a.add(2); // Fehler: X::add() nicht public
```

Statische Klassenkomponenten können mit `<Klassenname>::<Komponente>` oder mit `<Instanz>.<Komponente>` aufgerufen werden. Als `static` deklarierte Methoden haben nur Zugriff auf statische Klassendaten. Solche Daten sind nur einmal pro Klasse vorhanden und müssen `inline` oder außerhalb der Klasse als globale Variable definiert und gelinkt werden:

```
class Count {
    inline static int cnt = 0; // oder: static int cnt; // (vor C++17)
public:
    Count() { ++cnt; }
    ~Count() { cnt--; }
    static int instances() { return cnt; }
};

// int Count::cnt = 0; // einmal im Programm, wenn nicht inline
```

³⁶Private Konstruktoren erlauben das Schaffen einer Instanz dieser Klasse nur über Freunde oder statische *Fabrikmethoden*. Von Klassen mit geschützten Konstruktoren können Erben erzeugt werden.

C.8.2 Überladen von Operatoren

Operatoren $\langle op \rangle$ können als Funktionen $\langle Typ \rangle \text{operator } \langle op \rangle (\langle Parameterliste \rangle)$ für benutzerdefinierte Typen *überladen* werden. Mathematische Strukturen erhalten dadurch ihre gewohnte Operator-Schreibweise.

```
struct Bruch {
    long z,n;
    Bruch(long z=0, long n=1) : z{z}, n{n} { kuerzen(); }
    Bruch& operator*=(Bruch b);
    // ...
};
```

Operatormethoden erhalten den ersten Operanden implizit (**this*). Das rechte Argument zweistelliger Operationen wird als Parameter übergeben.

```
Bruch& Bruch::operator*=(Bruch b)
{
    z *= b.z; n *= b.N; kuerzen();
    return *this;
}
```

Globale Operatorfunktionen erhalten Zugriff auf private Daten durch Deklaration als *friend*, wenn nötig. Zweistellige globale Operatoren erlauben implizite Konstruktion des linken Operanden. Auf zugehörige Verbundzuweisungen kann zurückgegriffen werden.

```
Bruch operator*(Bruch a, Bruch b) { return a *= b; }
```

```
Bruch a{1,2}, b{2,3}, c;
a *= b;      // a.operator*=(b);
c = a*b;     // c=operator*(a,b);
c = a*2;     // c = a * Bruch{2};
c = 2*a;     // c = Bruch{2} * a;
```

Ein- und Ausgabeoperatoren $\gg \ll$ sind als globale Funktionen zu definieren mit `std::istream`- bzw. `std::ostream`-Referenz als linkem Parameter und Rückgabewert. Scheitert das Einlesen, sollte das rechtsseitige Argument seinen alten Wert behalten.

```
std::istream& operator>>(std::istream& is, Bruch& b)
{
    long z, n; char c = ' ';
    if (is >> z >> c >> n && c == '/') b = Bruch{z, n};
    return is;
}
```

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& os, Bruch const& b)
{
    return os << b.z << '/' << b.n;
}
```

Inkrement-/Dekrementoperatoren mit einem zusätzlichen, nicht benutzten Parameter vom Typ `int` werden für die Postfix-Operation `b++` genutzt:

```
// in struct Bruch:
Bruch& operator++()    { z += n; return *this; }
Bruch operator++(int) { Bruch old(*this); ++(*this); return old; }
```

Vergleichsoperatoren werden mit *Dreiwegevergleich* `<=>` („operator spaceship“)

```
#include <compare> // ab C++20
struct Person
{
    string::string name, vorname;
    auto operator<=>(Person const&) const = default;
};
```

aus `a<op>b` nach `(a<=>b)<op>0` umgewandelt, `a==b` und `a!=b` jedoch nur für `=default`.

```
// in struct Bruch:
auto operator<=>(Bruch b) const { return z*b.n <=> n*b.z; }
bool operator==(Bruch b) const { return z*b.n == n*b.z; }
auto operator<=>(long i)  const { return z      <=> n*i; }
bool operator==(long i)  const { return z      == n*i; }
```

Die generierten Vergleiche sind symmetrisch bezüglich unterschiedlicher Typen: Für einen Bruch `b` würde `42>b` zu `(42<=>b)>0`; da `operator<=>(int,Bruch)` aber nicht existiert, wird das zu `0>(b<=>42)` umgeformt.

Der vom Compiler erzeugte Operator `<=>` vergleicht Komponenten in der Reihenfolge ihrer Definition. Ergebnistyp ist die stärkste gemeinsame Kategorie:

- `std::strong_ordering` vergleicht alle Elemente einer Struktur/Klasse,
- `std::weak_ordering` für unterscheidbare Objekte, die als gleich erachtet werden, wie Zeichenketten mit ignorierte Großschreibung,
- `std::partial_ordering` erlaubt als Vergleichsergebnis `unordered:` für NaNs von Gleitkommazahlen sind `a<b`, `a==b` und `a>b` zugleich `false`.

Funktionsklammern `()` machen Objekte zu Funktionen mit Zustand (*Funktoren*):

```
struct Linear
{
    Linear(float slope=0, float offset=0) : m{slope}, n{offset} {}
    float operator()(float x) const { return m*x + n; }
    float m,n;
};
```

```
Linear f{0.5, 2}; // y = 0.5*x + 2;
auto y = f(3);   // f.operator()(3)
```

Feldindexklammern [] werden für änderbare und const-Objekte überladen.³⁷

```
class Array {
    int *data; // Zeiger auf benutzten Freispeicher
public:
    int const& operator[](int index) const { return data[index]; }
    int&      operator[](int index)      { return data[index]; }
    // ...
};
```

```
Array arr;
Array const carr = arr;
arr[0] = 42; // operator[]()
carr[0] = 7; // operator[]() const : Schreiben verboten
```

Zuweisungsoperator =, Kopier- und Verschiebekonstruktoren werden umdefiniert, da solche Klassen Ressourcen verwalten, welche eines Destruktors bedürfen (z.B. Zeiger).³⁸

Typkonverter operator <Typ>(); erzeugen Objekte schon definierter Typen. Mit Konstruktoren sollten keine Zirkel entstehen (Mehrdeutigkeit). Die Umwandlung sollte ausdrücklich angefordert werden.

```
// in struct Bruch:
    explicit operator double() const { return double(z)/n; }
```

```
Bruch b{13,4}; double d;
d = double(b); // o.k.: 3.25
d = b; // Fehler: nicht explizit!
```

Literalsuffixe werden als globale Funktionen definiert. Sie wandeln Literalkonstanten (Zeichenkette, Zahl) in einen anderen Typ um: "Hallo"s (std::string) oder 3.0+2.0i (komplexe Zahl).³⁹

```
std::string operator""s (char const* s, std::size len)
    { return std::string(s, len); } // in namespace std::literal
```

Einschränkungen Nicht überladbar sind . .* :: ?:

Operatoren für eingebaute Typen, Rangfolge und Anzahl der Operanden sind nicht änderbar. Es sind keine neuen Operatorzeichen definierbar. Die Operatoren = [] () -> können nur als Methoden, alle anderen dürfen auch global (friend) überladen werden.

³⁷std::string, std::vector<T>, std::map<K,V> u.a.

³⁸Resource Acquisition Is Initialization (RAII), Rule of the Big Three (or Five)

³⁹Nutzerdefinierte Suffixe müssen mit einem Unterstrich beginnen.

C.8.3 Vererbung

Es ist niemand gestorben.

– Niklaus Wirth

Erweiterungen von Klassendefinitionen dienen zwei unterschiedlichen Zielen. Klassen und Strukturen können ihre Attribute und Methoden an *abgeleitete* Klassen *vererben*⁴⁰,

1. um gleichartiges oder ähnliches Verhalten verschiedener, aber verwandter Klassen auszudrücken (gemeinsame Schnittstelle und Konkretisierung / Spezialisierung von Methoden) und so die Schnittstellenkomplexität zu reduzieren oder
2. um einmal geschriebene Methoden und definierte Datenfelder in verschiedenen Klassen zu nutzen (gemeinsame Codenutzung und Erweiterung).

Eine abgeleitete Klasse kann *Erbe* mehrerer *Basisklassen* sein (*Mehrfachvererbung*).

Syntax `class <abgeleitete Klasse> : <Basisklassenliste> { <Erweiterungen> };`

Basisklassen bilden den Ausgangspunkt der Vererbung.

```
class Fehler
{
public:
    Fehler(std::string datei, int zeile) : datei{datei}, zeile{zeile} {}
    void warum(std::ostream& os) const
    {
        os << "Fehler in " << datei << ':' << zeile << endl;
    }
private:
    std::string datei;
    int zeile;
};
```

Diese Klasse könnte genutzt werden,

```
void report(Fehler& f)
{
    f.warum(std::cerr);
    std::cerr << "Programm gestoppt.\n";
    exit(1); // fascist solution
}
```

um Programmfehler mit Meldungen wie dieser zu lokalisieren:

```
Fehler in XYZ.CPP:nnnn
Programm gestoppt.
```

⁴⁰In anderen Sprachen wird Vererbung Ableitung, Spezialisierung, Typenerweiterung oder Typkoerzision genannt.

Abgeleitete Klassen können Methoden ändern oder ergänzen und / oder Datenfelder hinzufügen:

```
class NullDivision : public Fehler
{
public:
    Nulldivision(std::string datei, int zeile) : Fehler{datei, zeile} {}
    void warum(std::ostream& os) const
    {
        Fehler::warum(os);
        os << "Division durch Null" << endl;
    }
};
```

Die Übergabe von Werten an Basiskonstruktoren erfolgt bei Bedarf nach dem Doppelpunkt : im Konstruktor. Zuerst werden die Basiskonstruktoren in der Reihenfolge ihrer Deklaration aufgerufen, dann neue Elemente initialisiert, zum Schluss der Konstruktorrumpf ausgeführt. Destruktoren verfahren in umgekehrter Reihenfolge (ohne expliziten Aufruf).

Ererbte Methoden lassen sich auch nach dem Überschreiben mit qualifiziertem Bezeichner $\langle \text{Basisklassenname} \rangle :: \langle \text{Methode} \rangle ()$ ansprechen.

Die abgeleitete Klasse erzeugt in

```
void demo()
{
    NullDivision div0{__FILE__, __LINE__};
    div0.warum(std::cerr);
}
```

folgende Standardfehlerausgabe:

```
Fehler in XYZ.CPP:nmmn
Division durch Null
```

Öffentliche Vererbung drückt dagegen Verwandtschaft zwischen Klassen aus und bedeutet, dass eine Instanz der abgeleiteten Klasse überall dort eingesetzt werden kann, wo eine Instanz der Basisklasse als Referenz oder über Zeiger erwartet wird.⁴¹

„Die NullDivision ist ein Fehler.“

```
class NullDivision : public Fehler { /* ... */ };

float dezimalbruch(long z=0, long n=1)
{
    if (n == 0) report(NullDivision{__FILE__, __LINE__});
    return float(z)/n;
}
```

⁴¹Eine abgeleitete Instanz sollte nicht als Basisklassenwert zugewiesen werden. Die Daten der Instanz werden auf die Größe der Basisklasseninstanz zurechtgestimmt (*object slicing*)!

Tabelle 10: Zugriffskontrolle bei Vererbung.

Methode war in Basisklasse	Vererbungsart war		
	private	protected	public
private	nicht verwendbar	nicht verwendbar	nicht verwendbar
protected	nicht verwendbar	protected	protected
public	private	protected	public

Nicht-öffentliche Vererbung eignet sich zur schrittweisen Implementierung:

„NullDivision wurde implementiert mit Hilfe von Fehler.“

Klassen erben privat, Strukturen öffentlich, falls nicht anders in der Basisklassenliste angegeben:

```
class NullDivision : private Fehler { /* ... */ };
```

Die Zugriffskontrolle regelt bei der Vererbung, ob und wie die Erben Zugriff auf die Methoden der Basisklassen haben (Tabelle 10). Eine nachfolgende Heraufstufung auf die bisherige Zugriffsstufe

```
class Base
{
public:
    float z;
    void publ();
protected:
    int y;
    void prot();
private:
    char x;
    void priv();
};
```

ist bei nicht-öffentlicher Vererbung möglich durch die Angabe des qualifizierten Namens, jedoch nicht höher. Willkürliche Herabstufung ist nicht erlaubt.

```
class Derived : private Base
{
public:
    Base::z;
    Base::publ;
protected:
    Base::y;
    Base::prot;
};
```

Virtuelle Methoden garantieren, dass die verwandten Objekte mit überschriebenen Methoden tatsächlich (engl. `virtual`) richtig funktionieren.

Die Funktion `dezimalbruch()` sollte bei Aufruf mit `n=0` ausgeben:

```
Fehler in XYZ.CPP:nmmn
Division durch Null
Programm gestoppt.
```

Beim Zugriff auf Instanzen über Basisklassenzeiger oder -referenzen wird die zur aktuellen Instanz (*Nachkomme*) gehörende Methode nur dann aufgerufen, wenn sie in der Basisklasse als `virtual` deklariert wurde.

```
class Fehler
{ // ...
  virtual void warum(std::ostream& os) const;
  virtual ~Fehler() {}
};
```

Sonst bleibt es bei der Meldung der Basisklasse. Aus genau demselben Grund sollte jede Basisklasse mit virtuellen Methoden auch einen *virtuellen Destruktor* erhalten — um eine übergebene Instanz korrekt abbauen zu können und nicht nur die Basisinstanz zu vernichten (Gefahr eines Ressourcenlecks). Es ist erlaubt, virtuelle Methoden als überschreibend (`override`) zu einer virtuellen Basismethode mit gleicher Signatur zu kennzeichnen. Es ist ein Fehler, als abschließend (`final`) markierte virtuelle Methoden zu überschreiben:

```
class NullDivision : public Fehler
{ // ...
  void warum(ostream& os) const override final; // allerletzte Fassung
};
```

Abstrakte Methoden sind virtuelle Methoden, für die in der Basisklassendeklaration noch keine „vernünftige“ Implementierung (= 0) angegeben werden kann:

```
class Process
{
public:
  Process();
  virtual ~Process();
  void start();
  void stop();
  virtual void run() = 0;
  void wait(long milliseconds);
  // ...
};
```

Klassen mit abstrakten Methoden (*abstrakte Basisklassen*) definieren einheitliche Schnittstellen und bilden damit *Wurzeln* in *Klassenhierarchien*. Instanzen mit dieser Schnittstelle können nur von abgeleiteten Klassen gebildet werden, die *alle* abstrakten Methoden der Basisklassen mit einer Neudefinition überschreiben.

Mehrfachvererbung erlaubt, einen Klassenbegriff mehreren Basiskategorien zuzuordnen: Ein Dateifehler im Netz kann sowohl als Dateifehler als auch als Netzwerkfehler behandelt werden. Datenströme, die sowohl Ein- und Ausgabe beherrschen, werden durch Einmischen (engl. *mix-in*) aus Ein- und Ausgabeströmen erzeugt.⁴²

```
class NetFileError : public NetworkError, public FileError { /* ... */ };
class iostream : public istream, public ostream { /* ... */ };
```

Mehrfachvererbung bereitet Probleme⁴³,

- weil die relativen Adressen der Datenfelder und virtuellen Methodentabellen (der Offset bei Up-, Down- und Sidecasts) von der Deklarationsreihenfolge der Basisklassen abhängen.

Wenn nötig, sollte dafür `dynamic_cast<Derived*>(base_ptr)` genutzt werden.

- wenn Basisklassen gleichnamige Komponenten haben. Dann müssen diese mit ihrem Klassennamen qualifiziert werden.

```
void namenskonflikt1()
{
    struct Base1 { int x; };
    struct Base2 { int x; };
    struct Derived : Base1, Base2 {} d;

    // d.x = 0; ==> Fehler!
    d.Base1::x = 1;
    d.Base2::x = 2;
}
```

- wenn Basisklassen gleichnamige Funktionen mit gleichartigen Parametern haben.⁴⁴ Diese können überschrieben werden, um zu entscheiden, welche gemeint ist.

```
void namenskonflikt2()
{
    struct Base1 { void f() {} };
    struct Base2 { void f() {} };
    struct Derived : Base1, Base2 {
        void f() { Base1::f(); }
    } d;

    d.f(); // ah!
}
```

⁴²Wenigstens im Prinzip. In `<iostream>` sieht das etwas komplexer aus.

⁴³Einige Sprachdesigner würden Mehrfachvererbung deshalb gern verbieten.

⁴⁴Sonst sind sie anhand der Parameter unterscheidbar.

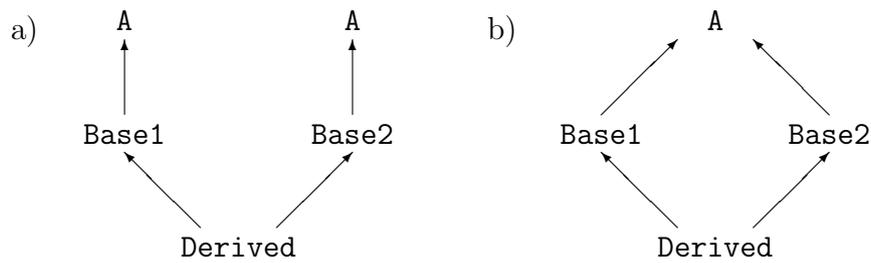


Abbildung 3: Mehrfachvererbung (a) ohne und (b) mit virtueller Basisklasse A.

- wenn Basisklassen von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen (Abb. 3a). Dieser Vorfahr ist dann mehrfach in der abgeleiteten Klasse vorhanden. Das kann „doppelte Buchführung“ bedeuten.

```

void namenskonflikt3()
{
    struct A { int x; };
    struct Base1 : A { };
    struct Base2 : A { };
    struct Derived : Base1, Base2 { } d;

    // d.x = 0; ==> Fehler!
    d.Base1::x = 1;
    d.Base2::x = 2;
}
  
```

Virtuelle Basisklassen erzeugen nur eine Instanz, auch von sie über mehrere Basis-
klassen vererbt werden (Abb. 3b).

```

void virtuelle_Basis()
{
    struct A { int x; };
    struct Base1 : virtual A { };
    struct Base2 : virtual A { };
    struct Derived : Base1, Base2 { } d;

    d.x = 0; // ah!
}
  
```

Falls es keinen Standardkonstruktor für die virtuelle Basisklasse gibt, muss ein Konstruk-
tor für A explizit und vor den Constructoren von Base1 und Base2 aufgerufen werden.

C.9 Generische Programmierung

C.9.1 Funktionschablonen

Funktionsschablonen `template<⟨Parameterliste⟩> ⟨Funktionsdefinition⟩`
sind Vorlagen für Funktionen, die sich in Parametertypen unterscheiden.

```
template <typename T>
void show(T x) { std::cout << x << '\n'; }
```

Spezialisierungen erlauben Sonderbehandlungen bei ausgewählten Parametern. Der gesamte Quelltext der Schablone muss vor der Nutzung definiert, die Implementierung ihrer Methoden sichtbar sein.

```
template <>
void show(int x) { std::cout << "int: " << x << '\n'; }
```

Beim Aufruf wird die Funktion mit den passenden Typen ausgewählt:

```
show(3.14);          // double
show<int>(3.14);    // erzwingt Typ int
```

Generische Lambda-Ausdrücke mit auto-Parametern

```
auto show = [](auto x) { std::cout << x << '\n'; } // C++14
```

und generische Funktionen mit auto-Parametern

```
void show(auto x) { std::cout << x << '\n'; } // C++20
auto add(auto x, auto y) { return x + y; }
```

sind Schablonen mit evtl. verschiedenen Typen für `x` und `y`:

```
template <typename X, typename Y>
auto add(X x, Y y) { return x + y; }
```

Sind Operationen für die Typen beim Aufruf nicht definiert, erzeugt der Compiler lange, schwer verständliche Fehlermeldungen, wenn Anforderungen tief in verschachtelten Schablonen benötigt werden:

```
std::cout << add("geht ", "schief!");
```

C.9.2 Variablenschablonen

Generische Variablen bilden Familien von Werten wie `std::numbers::pi_v<T>` oder

```
template <int N> constexpr auto fib = fib<N-1> + fib<N-2>; // N=0...93
template <>      constexpr auto fib<0> = 0ULL;
template <>      constexpr auto fib<1> = 1ULL;
auto x = fib<10>; // 55
```

C.9.3 Concepts

Anforderungen sind Prädikate, die Schablonen beschränken.⁴⁵

```
template <typename T>
  requires std::integral<T> || std::floating_point<T>
T add(T x, T y) { return x+y; }
```

Die Anforderungen können auch nach der Parameterliste angegeben werden. Sie begrenzen die Liste der verwendbaren Typen und werden beim Übersetzen ausgewertet.

Benannte Anforderungen (concept)

```
template <typename T>
concept Number = std::integral<T> || std::floating_point<T>;
```

können in der `requires`-Klausel angegeben werden.

```
template <typename T>
  requires Number<T>
T add(T x, T y) { return x+y; }
```

Shorthand notation nutzt concept-Namen statt `typename`:

```
template <Number T>
T add(T x, T y) { return x+y; }
```

Terse syntax setzt die Beschränkungen vor den Parametertyp `auto`:

```
Number auto add(Number auto x, Number auto y) { return x+y; }
```

Hier sind unterschiedliche Parametertypen möglich. Jeder Parametertyp ist unabhängig von dem anderen beschränkt. Der Ergebnistyp kann wiederum ein anderer sein, sofern er die Anforderung von `Number` erfüllt. Auch `auto`-Variablen sind einschränkbar:

```
Number auto x = add(1, 2);
Number auto y = add(1, 3.14);
Number auto z = add(1, "3"); // Fehler: char* Parameter ist nicht Number
Number auto s = "Hello";    // Fehler: char* ist nicht Number
```

⁴⁵Without named concepts syntax requires `requires requires!`

Concept-Definition erfolgt durch einen `requires`-Ausdruck mit

- einfachen Anforderungen wie `x+y`;
- Typanforderungen wie `typename T::value_type`;
- zusammengesetzte Anforderungen, die auch den Ergebnistyp einer Operation einschränken können,

oder logische Verknüpfungen (siehe `concept Number`).

```
template<typename T>
concept LessThanComparable = requires(T t)
{
    { t<t } -> std::convertible_to<bool>;
};
```

Die Standardbibliothek definiert grundlegende Anforderungen in `<concepts>`.

C.9.4 Klassenschablonen

Klassenschablonen `template<⟨Parameterliste⟩> ⟨Klassendefinition⟩`

definieren Entwürfe von Klassen, die sich durch in der Parameterliste aufgeführte Konstanten (Nicht-Typ-Parameter) oder in Datentypen (Typ-Parameter) von Komponenten, Methodenparametern und Rückgabewerten unterscheiden:

```
template <class T, int size>
class Stack
{
public:
    void push(T x) { a[pos++] = x; }
    T pop() { return a[--pos]; }
    int empty() const { return pos == 0; }
    int full() const ;
private:
    T a[size];
    int pos = 0;
};
```

Außerhalb der Schablone definierte Methoden werden mit `template<⟨Parameterliste⟩>` eingeleitet. Hinter dem Namen der Klassenschablone sind die Argumente der Parameterliste in spitzen Klammern aufzuführen. Auch für Klassen oder einzelne Methoden sind Spezialisierungen möglich.

```
template <class T, int size>
int Stack<T, size>::full() const { return pos == size; }

template <> // Extrawurst
int Stack<int,100>::full() const { std::cerr<<'a'; return pos == size; }
```

Konkretisierung von Schablonen erfolgt durch Angaben für die Parameter. Schablonen sind schachtelbar, Aliasnamen können definiert werden:

```
using IntStack = Stack<int, 100>; // Stack, 100 int's
using StackArray = std::vector<Stack<double, 256>>;
```

Die Nutzung ihrer Instanzen unterscheidet sich nicht von anderen Klassen:

```
int demo(int x, IntStack& s, StackArray& array)
{
    if (!s.full() ) s.push(x);
    if (!s.empty()) x = s.pop();
    array[8].push(1.2345); // auf achten Stapel schieben
    return x;
}
```

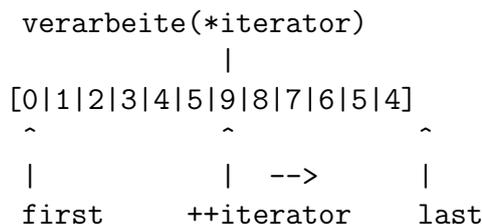


Abbildung 4: Daten-Sequenz als halboffener (Speicher-)Bereich.

C.10 Datencontainer

C.10.1 Datenfolgen und Datenhaltung

Häufig müssen Mengen gleichartiger Daten (*Sequenzen*) durchlaufen (*iteriert*⁴⁶) und in geeigneter Weise verarbeitet werden (Abb. 4). Die Organisation der Datenablage ist zur Lösung der Aufgabe unwichtig, aber mitunter entscheidend für die Effizienz des Ablaufs — eine ermüdende und fehlerträchtige Routineaufgabe. Felder `arr[]` werden als Zeiger verwaltet (mit allen Folgen), besitzen keine Kopiersemantik und ihre Behandlung (Kopie, Freigabe, Prüfung der Grenzen) liegt in der Verantwortung des Programmierers:

```

typedef int T;                                // irgendein Typ ...
T arr[] = { 0,1,2,3,4,5,9,8,7,6,5,4 };
T *first = arr;                               // "Zeiger" auf erstes Element
T *last  = arr+sizeof(arr)/sizeof(T); // "Zeiger" hinter letztes Element

```

Die Daten bilden einen *Bereich*⁴⁷ `[first,last)`. Die linke Grenze gehört dazu, die rechte Grenze nicht. Die Bereichsgrenzen `first` und `last` sind Start- und Vergleichswerte für *Iteratoren*. Diese werden dereferenziert (`*iterator`), um auf Elemente zuzugreifen und weitergesetzt (`++iterator` oder `iterator++`), um durch die Sequenz zu wandern:

```

for (auto iterator = first; iterator != last; ++iterator)
    std::cout << *iterator << '\n'; // Elemente von [first,last) ausgeben

```

Iteratoren sind ein allgemeines Konzept, das nicht als Zeiger implementiert sein muss. Es unterliegt aber ähnlichen Einschränkungen und Vereinbarungen wie (sinnvolle) Zeiger, sonst ist das Verhalten bestenfalls undefiniert, möglicherweise verheerend:

- Iteratoren müssen auf eine gültige Datensequenz zeigen (keine „dangling pointer“). Vergleiche `==` `!=`, evtl. auch `<`, haben nur im Bezug auf den Bereich einen Sinn.
- `last` steht unmittelbar „hinter“ dem letzten gültigen Element. Die Dereferenzierung `*last` ist unsinnig.
- `last` darf nicht „vor“ `first` stehen, sonst wird das Schleifenende nicht erreicht. Bei `first==last` ist der Bereich leer.

⁴⁶iterare = lat.: wiederholen.

⁴⁷In mathematischer Sprechweise ein (nach rechts) halboffenes Intervall diskreter Elemente.

Container der Standardbibliothek

- organisieren die datentyp-parametrisierte Datenhaltung von Bereichen,
- verfolgen unterschiedliche Speicherstrategien (Feld, Liste, Baum, Hashtabelle),
- abstrahieren von Implementierungsdetails und fehlerträchtigen Routineaufgaben, übernehmen die Speicherverwaltung,
- lassen sich mit Iteratoren an *Algorithmen* koppeln und sind durch einheitliche Schnittstellen bei wechselnden Anforderungen leichter austauschbar.

Container verändern auch das Herangehen an eine Aufgabe. Der Ansatz

```
struct Eintrag {
    std::string name;
    int nummer;
};
Eintrag telefonbuch[1000];
```

verschwendet Speicher oder reserviert zu wenig.⁴⁸ Besser wäre

```
std::vector<Eintrag> telefonbuch;
telefonbuch.push_back({"Meier", 6135});
```

Bei häufigem Einfügen oder Löschen von Teilbereichen bietet eine Liste Vorteile:

```
std::list<Eintrag> telefonbuch;
```

Die Suche nach `name` in Feldern und Listen ist mühsam. Näher am Nachschlageproblem eines Telefonbuchs ist ein *assoziatives Feld*, das *Werte nummer* nach einem *Schlüssel name* sortiert und schnell findet:

```
std::map<std::string, int> telefonbuch;
// ...
telefonbuch["Meier"] = 6135; // "Meier" neu eintragen
telefonbuch["Meier"] = 6134; // "Meier"s Nummer wechseln
// ...
std::cout << telefonbuch["Meier"] << '\n'; // "Meier"s Nummer: 6134
std::cout << telefonbuch["Meyer"] << '\n'; // 0 (bisher nicht vorhanden)
```

Noch schneller kann man in einer Hashtabelle nachschlagen:

```
std::unordered_map<std::string, int> telefonbuch;
```

Container mit gleicher Schnittstelle lassen sich schnell austauschen:

```
using Container = std::vector<T>; // oder besser std::list<T> ?
Container c;
```

⁴⁸Beispiel aus B. Stroustrup: C++, 3rd edn.

C.10.2 Containerarten

Die Standardbibliothek (Tab. 8) bietet eine Fülle von Containern (Abb. 5).

Sequentielle Container halten übernommene Elemente in vorgegebener Folge:

```
auto v = std::vector{1,2,3,4}; // Initialisiererliste mit int-Werten
```

Jede Containerart hat ihre Stärken. `std::deque<T>` kann beidseitig wachsenden Listen lassen sich gut umordnen. `std::array<T, N>` benötigt keinen dynamischen Speicher.

```
std::array<T, N>    seq0;           // Feld mit genau N Elementen
std::vector<T>     seq1(first, last); // dynamisches Feld
std::deque<T>     seq2(first, last); // "double-ended queue"
std::forward_list<T> seq3(first, last); // einfach verkettete Liste
std::list<T>      seq4(first, last); // doppelt verkettete Liste
```

►C.12.1 **Assoziative Container** verbinden (*asoziiieren*) Werte mit Schlüsseln und halten die Schlüssel mit einem Kriterium `Compare`, wenn nicht angegeben, `std::less<T>`, sortiert.⁴⁹

```
std::set<T, std::greater<>> abwaerts (first, last); // aus <functional>
std::set<T>                  aufwaerts(first, last);
std::map<std::string, std:string> woerterbuch;
```

Werte in `std::set<T>` sind zugleich Schlüssel. Tabellen `std::map<Key, Value>` halten Schlüssel-Wert-Paare. Hier kann der Schlüssel wie ein Feldindex eingesetzt werden. Ist der Schlüssel bisher nicht enthalten, wird er eingefügt. Die Methode `find(key)` liefert den Iterator auf den Eintrag oder `end()`, wenn der Schlüssel nicht gefunden wird.

Hash-Container finden Einträge mit `==` und Hash-Funktor für den Key-Typ.⁵⁰

```
struct K { int id; /* ... */ };
bool operator==(K a, K b) { return a.id == b.id; }

struct MyHash {
    size_t operator()(K x) const { return std::hash<int>()(x.id); }
};

#include <functional> // oder std::hash<T> spezialisieren
namespace std {
    template <> struct hash<K> {
        size_t operator()(K x) const { return hash<int>()(x.id); }
    };
}

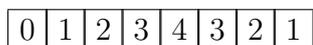
std::unordered_set<K, MyHash> menge1;
std::unordered_set<K>         menge2;
```

⁴⁹Suche und Zugriff auf Schlüssel sind im balancierten Baum schneller als bei Sequenz-Containern. In `std::multiset<T>` und `std::multimap<Key, Value>` dürfen gleiche Schlüssel mehrfach vorkommen.

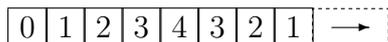
⁵⁰Hier kommt es nicht auf die Reihenfolge an, sondern auf Schnelligkeit.

Sequentielle Container:

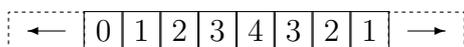
`array<T,N>`



`vector<T>`



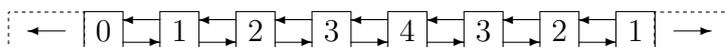
`deque<T>`



`forward_list<T>`



`list<T>`



Assoziative und Hash-Container:

ohne mehrfache gleiche Schlüssel

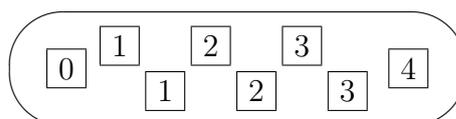
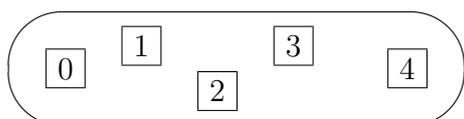
gleiche Schlüssel mehrfach möglich

`set<T, Compare>`

`unordered_set<T, Hash>`

`multiset<T, Compare>`

`unordered_multiset<T, Hash>`



`map<Key, Value, Compare>`

`unordered_map<Key, Value, Hash>`

`multimap<Key, Value, Compare>`

`unordered_multimap<Key, Value, Hash>`

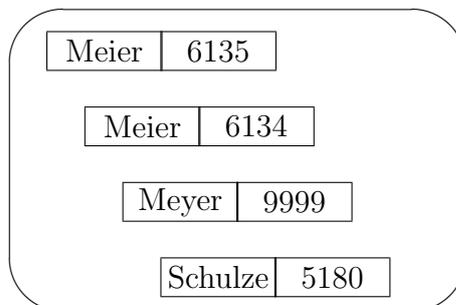
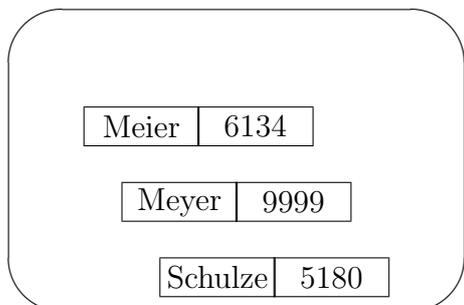


Abbildung 5: Container der Standardbibliothek.

C.10.3 Allgemeine Containereigenschaften

Container als Eigentümer kopieren die Inhalte eines gleichartigen Containers oder eines Bereiches `[first,last)`⁵¹ und sind für deren Freigabe verantwortlich:

```
void container_demo(Container c)
{
    Container c0, c1{c}, c2 = c;           // leer bzw. Kopie
    Container c3(first, last);           // Kopie aus allgem. Bereich
    c0 = c3;                             // Zuweisung
}
```

Speicherabfragen liefern aktuelle und maximal mögliche Elementanzahl:⁵²

```
if (c.empty()) std::cout << "Der Container ist leer.\n";
std::cout << c.size() << " von max. " << c.max_size() << " Daten.\n";
```

Lexikographische Vergleiche mit `==` `!=` bzw. `<` `<=` `>=` `>` von Containern gleichen Typs erfolgen durch Vergleich ihrer Elemente, wenn für die Elemente `operator<()` als totale Ordnung und `operator==()` als Äquivalenzrelation definiert sind.

Vertauschungen sind als Methode und globale Funktion erlaubt:

```
if (c1 != c2) c1.swap(c2);
std::swap(c1, c2);           // ruft c1.swap(c2);
}
```

Einfügen und Entfernen verschieben Folgeelemente so, dass keine Lücke entsteht.⁵³

```
void insert_demo(Container c)
{
    c.insert(c.end(), -1);           // ein Wert -1 ans Ende
    c.insert(c.begin(), first, last); // ganzen Bereich nach vorn
}
```

```
void erase_demo(Container c)
{
    c.erase(c.begin());           // löscht ein Element an gegebener Position
    c.erase(c.begin(), c.end()); // löscht ganzen Bereich
    c.clear();                   // löscht alle Elemente
}
```

⁵¹`std::array<T, N>` kann keine Bereiche kopieren.

⁵²Für `std::forward_list<T>` ist `size()` nicht implementiert, da zu teuer.

⁵³Die Iteratorposition muss im Containerbereich liegen. Nicht möglich bei `std::array<T,N>`; bei `std::forward_list<T>` heißen die Methoden `insert_after()` und `erase_after()`.

Einzufügende Objekte können mit `emplace(pos, args)` direkt im Container erschaffen werden; dazu werden die Konstruktorargumente an den Container durchgereicht:

```
std::vector<Punkt> v;
v.emplace(v.end(), x, y); // statt v.insert(v.end(), Punkt(x, y));
```

C.10.4 Spezielle Containeroperationen

Indexoperatoren `[]` und `at(index)` mit Gültigkeitsprüfung sind für die Container `std::array<T,N>`, `std::vector<T>`, `std::deque<T>`, `std::map<Key, Value>` erlaubt.⁵⁴

Stapel-Methoden sind auf vielen Containern durchführbar:⁵⁵

<code>emplace_back(args)</code>	schafft bzw.
<code>push_back(value)</code>	fügt einen Wert am Ende ein,
<code>emplace_front(args)</code>	...
<code>push_front(value)</code>	(dasselbe am Anfang),
<code>pop_back()</code>	entfernt das letzte Element bzw.
<code>pop_front()</code>	das erste Element,
<code>front()</code>	gibt Zugriff auf erstes bzw.
<code>back()</code>	letztes Element.

Listentypische Methoden umfassen⁵⁶

<code>merge(list2)</code>	Verschmelzen sortierter Listen,
<code>splice(pos, list2)</code>	Umhängen von Bereichen,
<code>splice(pos, first, last)</code>	
<code>sort(compare)</code>	Sortieren mit <code>std::less<T>()</code> o.a. Kriterium,
<code>remove(value)</code>	Entfernen aller Vorkommen eines Wertes bzw.
<code>unique()</code>	benachbarter Dubletten.

Methoden von assoziativen Containern sind auch bei Hash-Containern erlaubt:

<code>emplace(args)</code>	schafft bzw.
<code>insert(value)</code>	fügt Wert an passender Stelle ein;
<code>emplace_hint(pos, args)</code>	können schneller sein,
<code>insert_hint(pos, value)</code>	wenn die passende Stelle angegeben wurde,
<code>find(key)</code>	liefert Iterator auf Element bzw.
<code>count(key)</code>	Anzahl der Elemente mit gegebenem Schlüssel.

Hash-Container-Methoden werden im Standard erwähnt, aber nicht erläutert:⁵⁷

<code>bucket_count()</code>	<code>load_factor()</code>
<code>bucket_size(n)</code>	<code>max_load_factor()</code>
<code>bucket(key)</code>	

⁵⁴Auf Listen wäre zum wahlfreien Zugriff ein (unvollständiger) Durchlauf erforderlich.

⁵⁵Nur kostengünstige Operationen werden implementiert: Ein `insert(pos, value)` am Anfang eines Vektors erfordert das elementweise Verschieben/Kopieren der Folgeelemente.

⁵⁶Bei `std::forward_list<T>` erfordern die Methoden `splice_after(...)` offene Bereiche.

⁵⁷Siehe http://www.boost.org/doc/libs/1_48_0/doc/html/unordered.html.

Tabelle 11: Laufzeitverhalten einiger Algorithmen

		billig
$O(1)$	konstant	Element e ans Ende anfügen: <code>l.push_back(e)</code>
$O(\log n)$	logarithmisch	Suche im Baum (assoziative Container)
$O(n)$	linear	Suche in Sequenz, Einfügen vorn in <code>vector</code>
$O(n \log n)$		<code>quicksort()</code>
$O(n^2)$	quadratisch	<code>bubblesort()</code>
$O(n^3)$	kubisch	Multiplikation n -reihiger Matrizen
$O(\exp n)$	exponentiell	Primzahlsuche?
$O(n!)$	kombinatorisch	<code>permutation_sort()</code> — die Prolog-Lösung
		nicht beherrschbar teuer

C.10.5 Kosten von Operationen

One of the cultural barriers that separates computer scientists from “regular” scientists and engineers is a differing point of view on whether a 30% or 50% loss of speed is worth worrying about. In many real-time or state-of-the-art scientific applications, such a loss is catastrophic.

The practical scientist is trying to solve tomorrow’s problems with yesterday’s computer; the computer scientist, we think, often has it the other way around.

– Numerical Recipes in C

Für den Einsatz ist ihr Laufzeitbedarf (Tab. 11) bei wachsender Datenmenge n wichtig.⁵⁸ Die Containermethoden zeigen folgendes Zeitverhalten:

	<code>vector</code>	<code>deque</code>	<code>list</code>	<code>set/map</code>	<code>unordered_set/map</code>
Indexzugriff []	$O(1)$	$O(1)$	-	$O(\log n)$	$O(1)+$
Listenoperationen	$O(n)+$	$O(n)$	$O(1)$	$O(\log n)+$	$O(1)+$
Operationen vorn	-	$O(1)$	$O(1)$	-	-
Operationen hinten	$O(1)+$	$O(1)$	$O(1)$	-	-
Iteratoren	Ran	Ran	Bi	Bi	Bi

- nicht implementiert (wegen schlechten Zeitverhaltens)
+ durchschnittliches Verhalten, gelegentlich Zusatzaufwand
Bi Bidirektional-Iteratoren
Ran Random-Access-Iteratoren

Keine der aufgeführten Container-Operationen ist $O(n^2)$ oder teurer. Iteratoroperationen wird konstantes Zeitverhalten zugesichert.

⁵⁸Die Schreibweise $O(f(n))$ gibt den (asymptotischen) Zeitverbrauch $t(n) = c \cdot f(n)$ bis auf einen Vorfaktor c an.

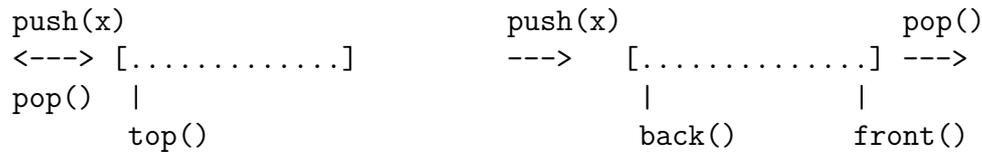


Abbildung 6: Stapel und Warteschlangen.

C.10.6 Container-Adapter

Stapel `std::stack<T>` und *Warteschlangen* `std::queue<T>` (Abb. 6) sind Container-Adapter. Ihre Funktion erfüllt ein beliebiger sequentieller Container, der vom Adapter umschlossen wird. *Prioritätswarteschlangen* ordnen Elemente mit *großen* Werten so ein, dass sie *zuerst* wieder herauskommen. Die Angabe des Containers und des Vergleichskriteriums kann entfallen — angegeben sind hier die Standardfacetten:

```
#include <stack>
#include <queue>

std::stack<T, std::deque<T>> s;
std::queue<T, std::deque<T>> q;
std::priority_queue<T, std::vector<T>, std::less<T>> p;
```

Die Adapter besitzen neben Konstruktor und Vergleich nur wenige Methoden:

```
full()   Adapter ist voll,
empty()  Adapter ist leer,

push(x)  fügt x hinten bzw. oben ein,
pop()    löscht erstes Element,
top()    Referenz auf oberstes Element im Stapel,
front()  auf erstes /
back()   letztes Element der Warteschlange.
```

```
void adapter_demo(std::stack<T> s, std::queue<T> q)
{
    while (!s.empty() && !q.full())
    {
        q.push(s.top());
        s.pop();
    }
    while (!q.empty())
    {
        std::cout << q.front() << ' ';
        q.pop();
    }
    std::cout << '\n';
}
```

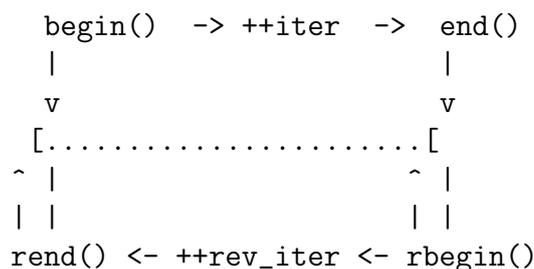


Abbildung 7: Vorwärts- und Rückwärts-Iteratoren.

C.10.7 Iteratoren

Iteratoren erlauben die containerunabhängige Formulierung von Algorithmen:

```

template <class Iterator>
void print_range(std::string header, Iterator first, Iterator last)
{
    std::cout << header;
    for (auto i = first; i != last; ++i)
        std::cout << *i << ' ';
    std::cout << '\n';
}

```

Container definieren selbst ihre Iteratoren zum Vorwärts- und Rückwärts-Durchlaufen und geben ihre eigenen aktuellen Bereichsgrenzen an:

nicht konstante /	konstante Container	Elementbereich
iterator	const_iterator	[begin(), end())
reverse_iterator	const_reverse_iterator	[rbegin(), rend())

```

void iterator_demo(Container c)
{
    Container::iterator      first  = c.begin(); // oder begin(c)
    Container::iterator      last   = c.end();   // oder end(c)
    Container::reverse_iterator rfirst = c.rbegin();
    Container::reverse_iterator rlast  = c.rend();

    print_range("Vorwaerts:  ", first, last );
    print_range("Rueckwaerts: ", rfirst, rlast);
}

```

Forward-Iteratoren beherrschen zumindest `*iter` und `++iter` bzw. `iter++` und lassen sich mit `==` und `!=` vergleichen. Auf *Bidirektional-Iteratoren* können zusätzlich `--i` bzw. `i--` angewendet werden, auf *Random-Access-Iteratoren* zusätzlich `i[n]` und `*(i+n)`. Bei *Rückwärts-Iteratoren* ist die Wirkung von `++` und `--` vertauscht: `rev_iter++` bewegt den `reverse_iterator` zum vorhergehenden Element. Wegen der Halboffenheit der Bereiche ist ihr Bezug um ein Element verschoben (Abb. 7). Mit `rev_iter.base()` kann der zugehörige Vorwärts-Iterator zurückgewonnen werden.

C.10.8 Iterator-Adapter

Iterator-Adapter aus `<iterator>` vereinheitlichen die Schreibweise für Einfügen, Ein- und Ausgaben trotz unterschiedlicher Quellen und Ziele: ►C.11

```
while (first != last) *ins++ = *first++; // Kopie des Bereichs einfüegen
while (in != ende)   *out++ = *in++;   // Kopie von Eingabe zur Ausgabe
```

Einfüge-Iteratoren rufen eine Einfügeoperation eines Containers auf:

```
void insert_iteration(Container& c, T wert)
{
    auto pos = begin(c); // gueltige Position: c.begin()
    std::insert_iterator<Container>    ins = inserter(c, pos);
    std::front_insert_iterator<Container> j = front_inserter(c);
    std::back_insert_iterator <Container> k = back_inserter (c);
    *ins = wert; // c.insert(pos, wert);
    *j = wert; // c.push_front(wert) oder c.insert(begin(c), wert)
    *k = wert; // c.push_back (wert) oder c.insert(end(c), wert)
    ins++; // wirkungslos
    j++;
    k++;
}
```

Ausgabe-Strom-Iteratoren geben Werte und Trennzeichenfolgen in einen Strom aus:

```
void ausgabe_iteration(std::ostream& os, T wert)
{
    std::ostream_iterator<T, char> out{os, " "}; // Standardtrenner: " "
    *out = wert; // os << wert << " ";
    out++; // wirkungslos
}
```

Eingabe-Strom-Iteratoren lesen Werte aus dem Strom und behalten diese. Beim Inkrement wird der nächste Wert eingelesen.

```
void eingabe_iteration(std::istream& is, T& wert)
{
    std::istream_iterator<T, char> in{is}; // liest ersten Wert: is >> tmp;
    std::istream_iterator<T, char> ende; // Ende des Stroms

    if (in != ende) // erfolgreich gelesen ?
    {
        wert = *in; // Wert liefern: wert = tmp;
        in++; // neuen Wert lesen: is >> tmp;
    }
}
```

C.11 Algorithmen

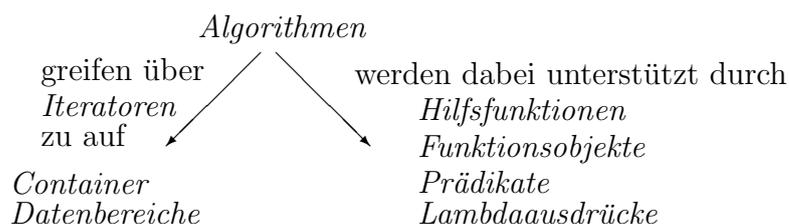
C.11.1 Grundidee

```
std::cout << *std::max_element(first, last) << '\n';
```

ist verständlicher als der nicht auf einen Blick zu erfassende Ablauf

```
auto result = first;
if (first != last)
    while (++first != last)
    {
        if (*result < *first) result = first;
    }
std::cout << *result << '\n';
```

Alexander Stepanovs Standard Template Library (STL) setzte eine Formulierung von Niklaus Wirth konsequent um: Programme = Datenstrukturen + Algorithmen.



Ohne Schablonen scheitert die Idee an der Komplexität⁵⁹: i verschiedene Datentypen, j Arten von Datenbehältern und k Algorithmen bräuchten $i * j * k$ Prozeduren (Abb. 8). Jeder neue Datentyp, Container oder Algorithmus würde eine Welle von Ergänzungen nach sich ziehen. STL⁶⁰ reduzierte die Komplexität durch Iteratoren, von denen es mehrere Arten gibt (Tab. 12). Diese entkoppeln die Komponenten in datentyp-unabhängige Container $i * j \rightarrow j$:

```
std::vector<int> v;
std::set<float> s;
```

und containertyp-unabhängige Algorithmen auf Bereichen $j * k \rightarrow j + k$:

```
std::sort(begin(v), end(v));
std::ranges::sort(v);            // ab C++20 auch so
```

Das Zusammenwirken von Containern, Algorithmen, Iteratoren und ergänzenden Hilfen macht die Bibliothek flexibel und ausdrucksstark.

► C.12

⁵⁹ Nach: Johannes Weidl, *STL Tutorial*, TU Wien.

⁶⁰ Sie wurde in die Standardbibliothek integriert und wird mittlerweile auch nicht mehr STL genannt.

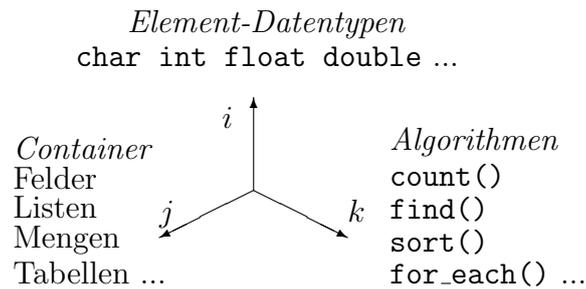


Abbildung 8: Komponentenraum der Standardbibliothek.

```
#include <algorithm>
#include <iostream>
#include <string>
#include <vector>

struct Person
{
    std::string name;
    int born, died;
};

struct Person2
{
    std::string name;
    int age;
    Person2(Person p = {}) : name(p.name), age(p.died-p.born) {}
};

int main()
{
    auto persons = std::vector<Person>{{ "Galilei", 1564, 1642 },
                                       { "Newton" , 1642, 1726 },
                                       { "Hawking", 1942, 2018 }};
    auto persons2 = std::vector<Person2>(2);
    std::ranges::partial_sort_copy(persons, persons2, {},
                                   &Person::name, &Person2::name);

    for (auto [name, born, died] : persons)
        std::cout << name << '\t' << born << '-' << died << '\n';
    std::cout << "-----\n";
    for (auto [name, age] : persons2)
        std::cout << name << '\t' << age << '\n';
}
```

Tabelle 12: Hier verwendete Abkürzungen in <algorithm>

In	Eingabeiterator	als rvalue verwendbar: <code>wert = *in;</code>
Out	Ausgabeiterator	als lvalue verwendbar: <code>*out = wert;</code>
For	Vorwärtsiterator	les- und schreibbar: <code>*forw = *forw;</code>
Bi	Bidirektionaliterator	<code>bi--</code> möglich
Ran	Random-Access-Iterator	<code>ran+=n</code> möglich
Range	Bereich	hat <code>begin(range)</code> , <code>end(range)</code>
Pred	Prädikat (optional)	mit booleschem Ergebniswert <code>pred(x)</code>
Proj	Projektion (optional)	oder z.B. <code>&Person::name</code>

C.11.2 Nichtmodifizierende Algorithmen

Funktions(objekt)aufruf `func(e)` für jedes Element `e` des Bereichs

```
auto f = std::ranges::for_each(range, func);
```

gibt das eventuell veränderte Funktionsobjekt zurück. Obwohl alle nichtmodifizierenden Algorithmen keine Änderungen an den Elementen vornehmen, ist dies dem Funktor von `for_each()` ausdrücklich erlaubt.

Prädikatenlogische Quantoren prüfen, ob eine Eigenschaft `pred(proj(e))` auf mindestens eines, auf alle bzw. auf keines der Elemente im Bereich zutrifft:

```
bool b = std::ranges::all_of(range, pred, proj);
bool b = std::ranges::any_of(range, pred, proj);
bool b = std::ranges::none_of(range, pred, proj);
```

Bei leerem Bereich liefert `any_of()` das Ergebnis `false`, die anderen Quantoren `true`. Die Projektion `{}` (Identität) kann entfallen.

Zählen der Elemente mit dem Wert `value` oder mit dem zutreffenden einstelligen Prädikat `pred(proj(e))` im Bereich erfolgt durch

```
auto n = std::ranges::count(range, value, proj);
auto n = std::ranges::count_if(range, pred, proj);
```

Suchalgorithmen finden die Position des ersten Elements im Bereich mit `e==value`, `pred(proj(e))==true` bzw. `pred(proj(e))==false` oder geben `last` zurück:

```
In pos = std::ranges::find(range, value, proj);
In pos = std::ranges::find_if(range, pred, proj);
In pos = std::ranges::find_if_not(range, pred, proj);
```

Suche nach einem Wert aus einem Vorrat (Heuhaufen) `range2` oder mit erfülltem zwei-stelligen Prädikat `pred(proj1(*pos), proj2(e2))`:

```
For pos = std::ranges::find_first_of(range, range2, pred, proj1, proj2);
```

Ein optionales Prädikat `{}` bedeutet `==`. Suche den Anfang bzw. die erste Teilfolge von `range`, die `range2` enthält, bei denen `pred(proj1(e),proj2(e2))` erfüllt ist bzw. `count` Werten `value` gleicht oder bei denen `pred(proj(e),value)` zutrifft:

```
For pos = std::search(begin(range), end(range),
    std::boyer_moore_searcher(begin(range2), end(range2))); // C++17
Range r = std::ranges::search(range, range2, pred, proj1, proj2);
Range r = std::ranges::search_n(range, count, value, pred, proj);
```

Suche die letzte Teilfolge mit dieser Bedingung:

```
Range r = std::ranges::find_end(range, range2, pred, proj1, proj2);
```

Suche die (erste) Position übereinstimmender Nachbarn:

```
For pos = std::ranges::adjacent_find(range, pred, proj);
```

mit `*pos==*(pos+1)` bzw. `pred(proj(*pos),proj(*(pos+1)))`.

Binäre Suche erkennt mit Aufwand $O(\log n)$, ob ein Wert `value` in einem sortierten Bereich enthalten ist. sortierten Bereich enthalten ist. Das Standardsortierkriterium `{}` für `comp(proj(x),proj(y))` ist `<`:

```
bool b = std::ranges::binary_search(range, T value, comp, proj);
```

Unter-/Obergrenzen sind die erste/letzte Position, an denen `value` eingesetzt werden kann, ohne die Sortierung zu zerstören. `equal_range()` liefert beide Grenzen auf einmal:

```
For pos = std::ranges::lower_bound(range, value, comp, proj);
For pos = std::ranges::upper_bound(range, value, comp, proj);
For [f,l] = std::ranges::equal_range(range, value, comp, proj);
```

Vergleiche testen auf elementweise Gleichheit und lexikographische Ordnung⁶¹:

```
bool b = std::ranges::equal(range, range2, pred, proj1, proj2);
bool b = std::ranges::lexicographical_compare(range, range2,
    comp, proj1, proj2);
```

```
In [p,p2] = std::ranges::mismatch(range, range2, pred, proj1, proj2);
```

findet die Positionen, an denen sich zwei Bereiche in `pred(proj1(p),proj2(p2))` erstmals unterscheiden.

⁶¹ `true`, sobald beim elementweisen Vergleich `comp(proj1(p),proj2(p2))` oder der erste Bereich kürzer ist.

Minimum und Maximum zweier Werte oder ihre Position in einem Bereich werden durch Vergleich mit `<` oder optionalem Kriterium `comp(proj(a),proj(b))` ermittelt:

```
auto x      = std::ranges::min(a, b, comp, proj);    // std::min(a,b)
auto x      = std::ranges::min(range, comp, proj);
auto x      = std::ranges::max(a, b, comp, proj);    // std::max(a,b)
auto x      = std::ranges::max(range, comp, proj);
For pos     = std::ranges::min_element(range, comp, proj);
For pos     = std::ranges::max_element(range, comp, proj);
auto [l,h]  = std::ranges::minmax(a, b, comp, proj); // std::minmax(a,b)
For [l,h]   = std::ranges::minmax_element(range, comp, proj);
```

Das Iteratorpaar von `minmax_element()` liefert die Positionen des am weitesten links stehenden Minimums und des am weitesten rechts stehenden Maximums.

C.11.3 Modifizierende Algorithmen

Modifizieren heißt Werte ändern.

Vertauschen lassen sich einzelne Werte, die als Referenz oder durch Iteratoren (Zeiger) gegeben sind, als auch Bereiche, soweit sie ineinander passen:

```
std::swap(a, b);
std::iter_swap(p, p2);
For [p,p2] = std::ranges::swap_ranges(range, range2);
```

Kopieren erfolgt in einen Zielbereich, angegeben durch den Iterator `out`:⁶²

```
auto [r,o] = std::ranges::copy(range, out);
auto [r,o] = std::ranges::copy_backward(range, out);
auto [r,o] = std::ranges::copy_if(range, out, pred, proj);
auto [r,o] = std::ranges::copy_n(first, n, out);
```

Ergebniswerte sind die Enden des Quell- und Zielbereichs. Verschieben erledigt

```
auto [r,o] = std::ranges::move(range, out);
auto [r,o] = std::ranges::move_backward(range, out);
```

Ausfüllen eines (ausreichenden) Bereichs mit neuen Werten (Bsp. S. 80) realisieren

```
Out r = std::ranges::fill(range, value);
Out r = std::ranges::fill_n(first, n, value);
Out r = std::ranges::generate(range, generator);
Out r = std::ranges::generate_n(first, n, generator);
```

Jeder interne Aufruf von `generator()` liefert einen Wert.

⁶² Der Zielbereich muss groß genug sein. Inserter schaffen sich in dynamischen Zielcontainern selbst Platz: `std::copy(begin(c), end(c), back_inserter(target));`

Ersetzen bei übereinstimmenden Werten bzw. zutreffendem `pred(proj(e))` kann im selben Bereich (*in place*) (Bsp. S. 80) oder durch Kopieren in einen Zielbereich geschehen. Enden des ersetzten/kopierten Bereichs werden zurückgegeben:

```
In r      = std::ranges::replace(range, old, value, proj);
In r      = std::ranges::replace_if(range, pred, value, proj);
auto [r,o] = std::ranges::replace_copy(range, out, old, value, proj);
auto [r,o] = std::ranges::replace_copy_if(range, out, pred, value, proj);
```

Entfernen von Elementen bei Gleichheit bzw. mit zutreffendem `pred(proj(e))` oder von Duplikaten in einem sortierten Bereich erfolgt mit

```
Range r    = std::ranges::remove(range, value, proj);
Range r    = std::ranges::remove_if(range, pred, proj);
auto [r,o] = std::ranges::remove_copy(range, out, value, proj);
auto [r,o] = std::ranges::remove_copy_if(range, out, pred, proj);
```

```
Range r    = std::ranges::unique(range, pred, proj);
auto [r,o] = std::ranges::unique_copy(range, out, pred, proj);
```

Die in-place-Version zieht nicht entfernte Objekte nach vorn. Dabei verbleiben einige alte Elemente hinter dem zurückgegebenen Ende des kompaktierten Bereichs.⁶³

Transformationen berechnen `func(proj(e))` bzw. `func(proj1(e),proj2(e2))` aus einem oder zwei Quellbereichen und schreiben diese in einen Zielcontainer.

```
auto [r,o]    = std::ranges::transform(range, out, func, proj);
auto [r,r2,o] = std::ranges::transform(range, range2, out, func,
                                       proj1, proj2);
```

Die Enden der Bereiche wird zurückgegeben. Ziel kann auch eine der Quellen sein.

```
Container summen(Container a, Container b)
{
    Container out;
    std::ranges::transform(a, b,          // a[i] + b[i]
                          std::ranges::back_inserter(out), // ==> out[i]
                          [](auto x, auto y) { return x + y; }
    );
    return out;
}
```

⁶³Das wirkliche Löschen muss der Aufrufer übernehmen, da der Algorithmus nichts über Container wissen kann: `c.erase(begin(r), end(r));`

C.11.4 Mutierende Algorithmen

Mutieren ändert die Reihenfolge, ohne Werte zu ändern, einzufügen oder wegzulassen.

Umkehren kann am Ort oder in einen ausreichend großen Zielbereich erfolgen:

```
Range r = std::ranges::reverse(range);
auto [r,o] = std::ranges::reverse_copy(range, out);
```

Rotieren macht `middle` zum Anfang und hängt `[first,middle)` hinten an:

```
Range r = std::ranges::rotate(first, middle, last);
auto [r,o] = std::ranges::rotate_copy(first, middle, last, out);
```

Zufällige Umordnungen und Auswahlen eines Bereichs entstehen mit

```
Ran r = std::ranges::shuffle(range, gen);
Out r = std::ranges::sample(range, out, n, gen);
```

Der Zufallszahlengenerator `gen()` erzeugt Werte im Bereich `[gen.min(),gen.max())`. Bei gleichem Saatwert entsteht stets dieselbe Umordnung. Das Ende des (Ziel-)Bereichs wird zurückgegeben.

Permutieren erzeugt, lexikographisch sortiert, bei jedem Aufruf eine Vertauschung

```
1 2 3 // 3! = 6 verschiedene Anordnungen:
1 3 2 true
2 1 3 true
2 3 1 true
3 1 2 true
3 2 1 true
1 2 3 false
```

der Elemente eines Bereichs und liefert `false`, wenn die Folge danach sortiert ist:

```
bool b = std::ranges::next_permutation(range, comp, proj); // aufsteigend
bool b = std::ranges::prev_permutation(range, comp, proj); // absteigend
```

Nach $n!$ Permutationen ist ein sortierter Bereich mit n Elementen wieder sortiert.⁶⁴ Ob zwei Bereiche durch Permutation ineinander überführt werden können, prüft

```
bool b = std::ranges::is_permutation(range, range2, comp, proj1, proj2);
```

⁶⁴Die langsamste Art zu sortieren `while (std::next_permutation(begin(c), end(c)));` bringt auch sortierte Bereiche erst wieder durcheinander.

Links-/Rechtsschieben der Elemente des Bereichs um n Positionen

```
For pos = std::shift_left(first, last, n); // C++20
For pos = std::shift_right(first, last, n);
```

gibt als Rückgabewert an, bis wohin sich `last` bzw. `first` verschoben hat, falls der Bereich weniger als n Elemente hat.

Sortieralgorithmen bringen Ordnung in Sequenzen. Es wird mittels $<$ oder einer optionalen Vergleichsfunktion `comp(proj(x),proj(y))` aufsteigend sortiert.

Vollständiges Sortieren führen

```
Ran r = std::ranges::sort(range, comp, proj);
Ran r = std::ranges::stable_sort(range, comp, proj);
```

aus. Bei `stable_sort()` bleibt die Reihenfolge gleicher Elemente während des Sortierens erhalten. Das erfordert mehr Zeit: $O(n(\log n)^2)$ statt $O(n \log n)$. Ob überhaupt und wie weit sortiert werden muss, kann durch

```
bool b = std::ranges::is_sorted(range, comp, proj);
For pos = std::ranges::is_sorted_until(range, comp, proj);
```

in $O(n)$ herausgefunden werden. Der Bereich `[begin(range), pos)` ist bereits sortiert.

Unvollständiges Sortieren bricht ab, sobald `[begin(range),middle)` bzw. `[begin(out),o)` bezüglich `comp` und `proj2` sortiert ist (siehe Beispiel S. 65):

```
Ran r = std::ranges::partial_sort(range, middle, comp, proj);
auto [r,o] = std::ranges::partial_sort_copy(range, out, comp,
                                           proj, proj2);
```

mit `o = begin(out)+min(size(range),size(out))`. Manchmal soll nur ein Element an der richtigen Stelle `pos`, kleinere links und größere rechts davon stehen:

```
Ran r = std::ranges::nth_element(range, pos, comp, proj);
```

Partitionieren bringt alle Elemente mit der Eigenschaft `pred(proj(e))` in den Teilbereich `[begin(range), pos)` nach vorn, bei Kopie an getrennte Zielpositionen:

```
auto [pos,last] = std::ranges::stable_partition(range, pred, proj);
auto [pos,last] = std::ranges::partition(range, pred, proj);
auto [last, lastgood, lastbad] =
    std::ranges::partition_copy(range, good, bad, pred, proj);
```

Ob ein Bereich partitioniert ist und wo die Partitionsgrenze liegt, ermitteln

```
bool b = std::ranges::is_partitioned(range, pred);
For pos = std::ranges::partition_point(range, pred);
```

Mischen fasst zwei sortierte Bereiche zu einem sortierten zusammen (Abb. 9a). Bei der in-place-Variante ist `middle` die Grenze der beiden vorsortierten Bereiche:

```
auto [r,r2,o] = std::ranges::merge(range, range2, out, comp, proj, pro2);
Bi r         = std::ranges::inplace_merge(range, middle, comp, proj);
```

Mengenoperationen setzen sortierte Bereiche $M_1 = \text{range}$ und $M_2 = \text{range2}$ voraus, da sie nur auf solchen effizient realisierbar sind (Abb. 9b). Der Teilmengentest $\underline{M_1} \supset \underline{M_2}$

```
bool b = std::ranges::includes(range, range2, comp, proj1, proj2);
```

liefert `true`, wenn M_1 alle Elemente von M_2 enthält. Vereinigung $\underline{M_1} \cup \underline{M_2}$, Schnittmenge $\underline{M_1} \cap \underline{M_2}$, Mengendifferenz $\underline{M_1} \setminus \underline{M_2}$ und symmetrische Mengendifferenz $\underline{M_1} \triangle \underline{M_2}$

```
auto [r,r2,o] =
  std::ranges::set_union(range, range2, out, comp, proj1, proj2);
  ...      set_intersection      ...
  ...      set_difference         ...
  ...      set_symmetric_difference ...
```

liefern die Enden der Ausgangsbereiche und des Zielbereichs.

Heap-Algorithmen arbeiten auf einem ausgeglichenen Binärbaum, dem in der untersten Schicht nur auf der rechten Seite Knoten fehlen.⁶⁵ Zudem sind die darüberliegenden Knotenwerte niemals kleiner als ihre Kindelemente. Sind beide Forderungen erfüllt, liefert

```
bool b = std::ranges::is_heap(range, comp, proj);
Ran r  = std::ranges::is_heap_until(range, comp, proj);
```

den Wert `true` bzw. das Ende des Heap-Bereichs. Die Funktionen

```
Ran r = std::ranges::push_heap(range, comp, proj);
Ran r = std::ranges::pop_heap(range, comp, proj);
```

fügen das letzte Element in den Heap davor ein (Abb. 9c) bzw. stellen das Kopfelement `*begin(range)` ans Ende und stellt die Elemente davor wieder zum Heap um.

```
Ran r = std::ranges::make_heap(range, comp, proj);
```

ordnet damit einen gesamten Bereich zu einen Heap um und

```
Ran r = std::ranges::sort_heap(range, comp, proj);
```

sortiert diesen wiederum in $O(n \log n)$ vollständig aufsteigend.

⁶⁵Wegen dieser *Formeigenschaft* ist jede Sequenz mit wahlfreiem Zugriff in einen Heap umwandelbar. Zeiger auf Eltern und Kinder werden nicht benötigt. Diese Beziehung ergibt sich aus der Position.

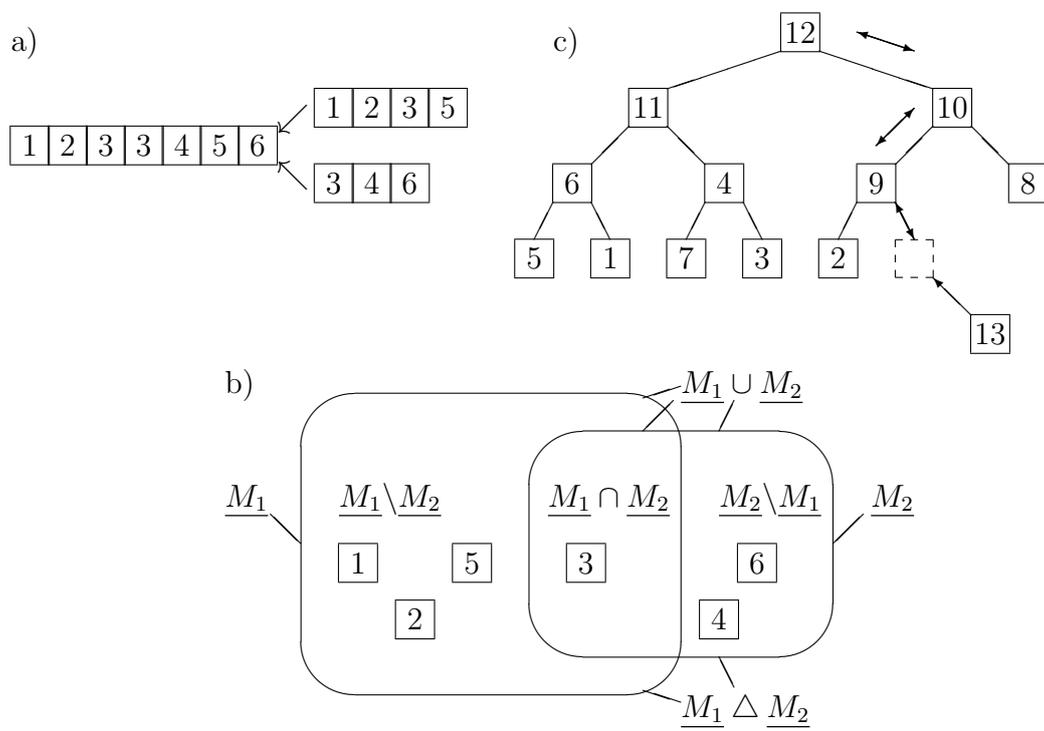


Abbildung 9: a) Mischen. b) Mengen-Operationen. c) Einfügen in Heap.

C.11.5 Numerische Algorithmen

Funktionen `gcd(a,b)`, `lcm(a,b)` für ggT/kgV, `mid_point(a,b)` für `lerp(a,b,0.5)` und `clamp(x,min,max)` zum Beschränken eines Wertes `x` in ein Intervall `[min,max]` würde man eher in `<cmath>` vermuten. Die algorithmischen Schablonen aus `<numeric>` (Abb. 10 und 11) verallgemeinern mathematische Operationen auf Sequenzen von Zahlen.

```
std::iota(first, last, startvalue);
```

schreibt eine mit `startvalue` beginnende aufsteigende Folge in den angegebenen Bereich.

```
auto sum = std::accumulate(first, last, init);
auto sum = std::accumulate(first, last, init, binary_op);
```

kann Summen oder mit angegebener Binäroperation auch Produkte bilden oder einem anderen Zweck dienen. Der Startwert legt den Typ von Zwischen- und Endergebnis fest. Partialsummen und Nachbardifferenzen sind Umkehroperationen zueinander, sofern Operationen mit den Eigenschaften von `+` und `-` benutzt werden:

```
Out end = std::partial_sum(first, last, out);
Out end = std::partial_sum(first, last, out, binary_op);
Out end = std::adjacent_difference(first, last, out);
Out end = std::adjacent_difference(first, last, out, binary_op);
```

und liefern das Ende des Zielbereichs. Die Summe von Produkten oder das Skalarprodukt mit `+` als `op` und `*` als `op2` liefert

```
auto sum = std::inner_product(first, last, first2, init);
auto sum = std::inner_product(first, last, first2, init, op, op2);
```

Der zweite Bereich muss groß genug sein. Andere Operationen `op` und `op2` sind möglich.

```
#include <numeric>
```

```
void numeric_demo()
{
    int a[5], sums[5], diff[5];

    std::iota(a, a+5, 1); // 1,2,3,4,5
    long summe = std::accumulate(a, a+5, long(0)); // 15
    double produkt = std::accumulate(a, a+5, 1.0,
                                     std::multiplies<double>()); // 120
    std::partial_sum(a, a+5, sums); // 1, 3, 6, 10, 15
    std::adjacent_difference(a, a+5, diff); // 1, 1, 1, 1, 1
    double produktsumme = std::inner_product(a, a+5, sums, 0.0);
                          // (1*1) + (2*3) + (3*6) + (4*10) + (5*15)
    double summenprodukt = std::inner_product(a, a+5, sums, 0.0,
                                              std::multiplies<double>(), std::plus<int>());
                          // (1+1) * (2+3) * (3+6) * (4+10) * (5+15)
}
```

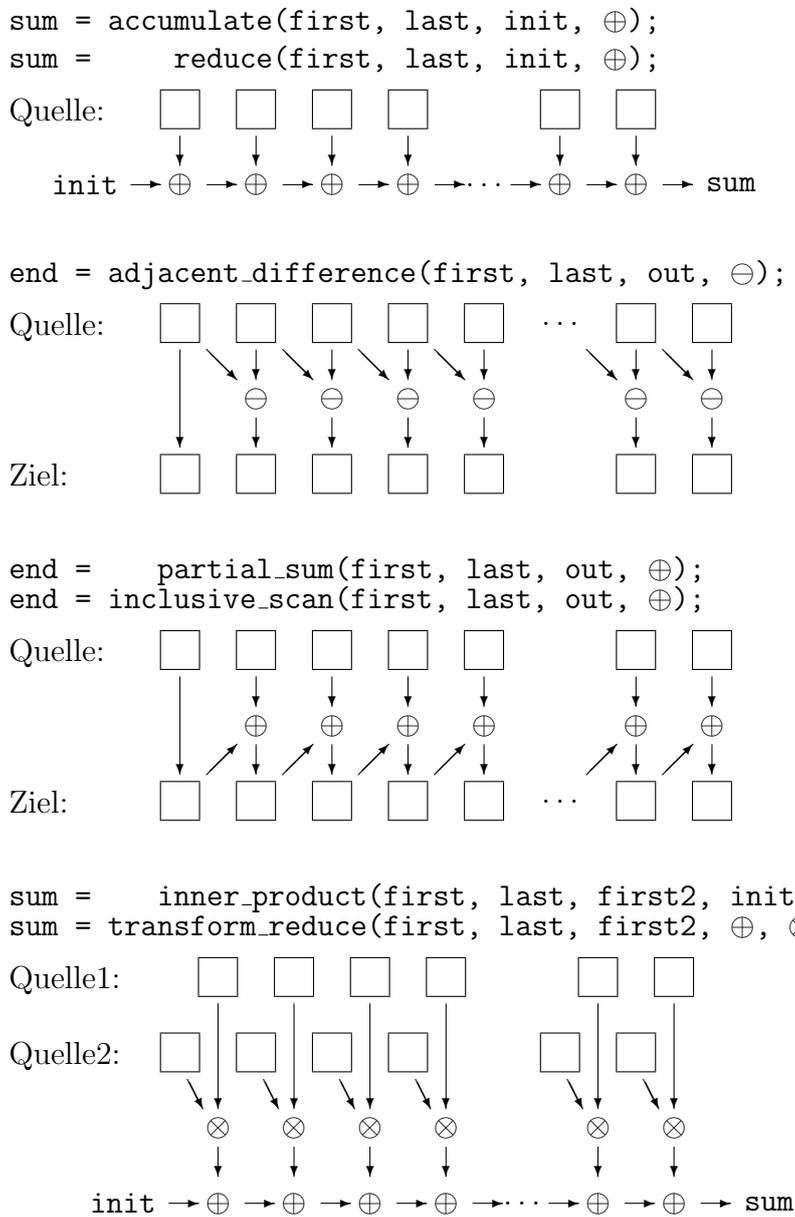


Abbildung 10: Datenflussstruktur verallgemeinerter numerischer Algorithmen (Teil 1). Anstelle der Operationen \oplus, \ominus, \otimes können beliebige zweistellige Funktionen eingesetzt werden.

```

auto sum = std::reduce(first, last);
auto sum = std::reduce(first, last, init);
auto sum = std::reduce(first, last, init, binary_op);

```

führt, anders als `accumulate()`, die „Summation“ `op` nicht in strenger Reihenfolge aus.

```

auto sum = std::transform_reduce(first, last, init, op, f);

```

wendet `f()` auf jedes Datenelement an und „summiert“ dann mit `op`.

```

auto sum = std::transform_reduce(first, last, first2, init);
auto sum = std::transform_reduce(first, last, first2, init, op, op2);

```

mit zwei Quellsequenzen verallgemeinert `inner_product()`.

```

Out o = std::inclusive_scan(first, last, out);
Out o = std::inclusive_scan(first, last, out, op);
Out o = std::inclusive_scan(first, last, out, op, init);

```

ähnelt `partial_sum()` mit optionalem Startwert. Bei

```

Out o = std::exclusive_scan(first, last, out, init);
Out o = std::exclusive_scan(first, last, out, init, op);

```

ist das erste Zielelement gleich `init`. Gegenüber `inclusive_scan()` sind alle weiteren Ergebnisse nach rechts verschoben. Das letzte Quellenelement wird nicht benutzt.

```

Out o = std::transform_inclusive_scan(first, last, out, op, f);
Out o = std::transform_inclusive_scan(first, last, out, op, f, init);
Out o = std::transform_exclusive_scan(first, last, out, init, op, f);

```

wenden `f(e)` vor der Summation `op` auf jedes Quellenelement `e`, aber nicht auf `init` an.

C.11.6 Parallele Algorithmen

Algorithmen aus `<algorithm>` und `<numeric>` können parallelisiert⁶⁶ ausgeführt werden, wenn vor dem Iteratorpaar `first, last` als erstes Argument die in `<execution>` definierte Ausführungsweise (`par`, `seq`, `unseq`, `par_unseq`) angegeben wird:

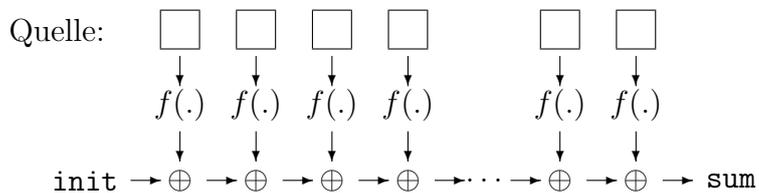
```

auto square_sum(std::vector<double> v)
{
    return std::transform_reduce(std::execution::par,
        begin(v), end(v), 0.0, std::plus{}, [](auto x){ return x*x; });
}

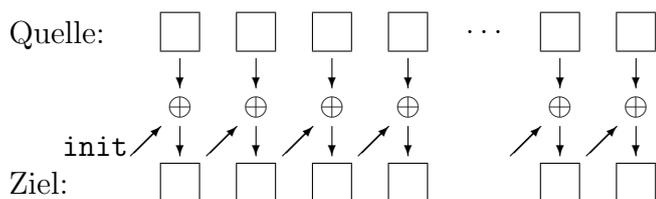
```

⁶⁶ Außer `copy|move_backward`, `shuffle()`, `sample()`, `partition_point()`, `lower|upper_bound()`, `binary_search()`, `equal_range()`, `make|push|pop_heap()`, `is|next|prev_permutation()`, `iota()`, `accumulate()`, `inner_product()`, `partial_sum()`, ab C++17.

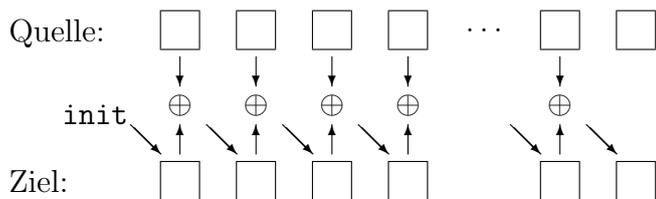
```
sum = transform_reduce(first, last, init,  $\oplus$ , f);
```



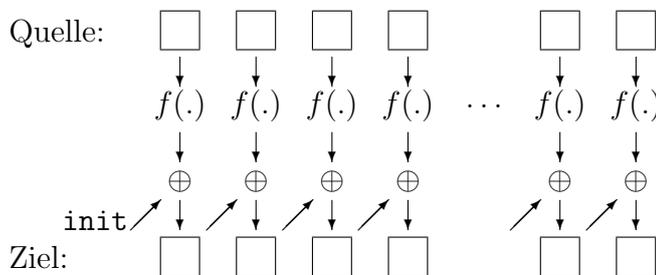
```
out_end = inclusive_scan(first, last, out,  $\oplus$ , init);
```



```
out_end = exclusive_scan(first, last, out, init,  $\oplus$ , f);
```



```
end = transform_inclusive_scan(first, last, out,  $\oplus$ , f, init);
```



```
end = transform_exclusive_scan(first, last, out, init,  $\oplus$ , f);
```

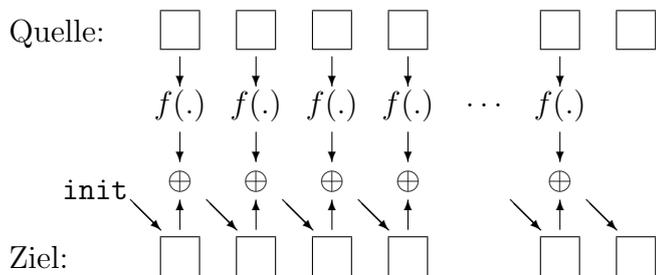


Abbildung 11: Datenflussstruktur verallgemeinerter numerischer Algorithmen (Teil 2).

C.11.7 Ranges

Ranges⁶⁷ können Funktionen aus `<algorithm>` ablösen, mit besser lesbarem Quellcode, ohne vermeidbare Schleifen und Zwischenspeicher.

Fabriken erzeugen Bereiche (Tab. 13):

```
auto view_factory(std::istream& input) // "0 1 2 3 4"
{
    auto factory = std::ranges::istream_view<int>(input);
    for (auto e : factory) std::cout << e << ' ';
}
```

Sichten holen Elemente eines Bereichs einzeln, auf Anforderung, verarbeiten sie, geben sie weiter. Diese algorithmischen Bausteine sind mit `|` koppelbar:

```
auto view_pipes()
{
    using namespace std::views;
    auto output = iota(1)
        | filter([](int x){ return x%2 == 0; })
        | transform([](int x){ return 3*x; })
        | take(10);
    // keine Berechnung bis zu dieser Stelle (lazy)!

    for (auto e : output) std::cout << e << ' ';

    auto numbers = iota(0, 6) | common;
    auto v = std::vector<int>{begin(numbers), end(numbers)};
    for (auto e : v) std::cout << e << ' ';
}
```

Konstruktoren von Containern erwarten typgleiche Iteratoren für `begin(_)` und `end(_)`. Diese können mit `range|common` erzeugt werden.

Datenquellen können auch Felder, Initialisiererlisten, Container sein:

```
auto v = std::vector{0,1,2,3,4,5};
auto s = std::string{"AB CD E"};
auto m = std::map<std::string,int>{{"wrong", 6*9}, {"answer", 42}};
```

Damit entstehen die eckig eingeklammerten Datenfolgen:

⁶⁷ Ab C++20, weitere Bausteine wie `enumerate`, `zip`, `to<std::vector>` mögen folgen.

Tabelle 13: Fabriken und Sichten aus `<ranges>` im Namensraum `std::views`

<code>istream_view<T>(is)</code>	holt Werte vom Typ <code>T</code> aus Eingabestrom <code>is</code> (in <code>std::ranges!</code>)
<code>empty<T></code>	erzeugt einen leeren Bereich vom Typ <code>T</code>
<code>single(value)</code>	erzeugt einen Bereich mit nur einem Wert
<code>iota(start)</code>	zählt ab <code>start</code> mit <code>++</code> hoch, endet nie
<code>iota(start, stop)</code>	zählt ab <code>start</code> , endet vor <code>stop</code>
<code>all</code>	gibt alle Elemente weiter
<code>common</code>	erzwingt gleichen Typ für <code>begin(_)</code> , <code>end(_)</code>
<code>counted(iter, n)</code>	liefert <code>n</code> Werte, beginnend ab dem Iterator <code>iter</code>
<code>drop(n)</code>	überspringt die ersten <code>n</code> Elemente
<code>drop_while(pred)</code>	überspringt Elemente, solange <code>pred(e)</code> erfüllt ist
<code>filter(pred)</code>	gibt nur die Elemente weiter, für die <code>pred(e)</code> erfüllt ist
<code>reverse</code>	kehrt Reihenfolge der Elemente um
<code>take(n)</code>	gibt nur die ersten <code>n</code> Elemente weiter
<code>take_while(pred)</code>	gibt Elemente nur solange weiter, wie <code>pred(e)</code> erfüllt ist
<code>transform(f)</code>	wendet <code>f</code> auf jedes Element <code>e</code> an, gibt <code>f(e)</code> weiter
<code>join</code>	wandelt Bereich von Bereichen in „flachen“ Bereich um
<code>split(delim)</code>	spaltet Bereich in Teilbereiche, <code>delim</code> kann Einzelelement oder Folge sein
<code>elements<N></code>	wählt <code>N</code> -ten Bestandteil von tupelartigen Elementen aus
<code>keys</code>	<code>elements<0></code> = Schlüssel,
<code>values</code>	<code>elements<1></code> = Werte von Schlüssel-Wert-Paaren

```

empty<T>           : []
single(42)        : [42]
iota(0,6)         : [0,1,2,3,4,5]
iota(0) | take(3) : [0,1,2]
counted(begin(v),3) : [0,1,2]
v | all           : [0,1,2,3,4,5]
v | reverse       : [5,4,3,2,1,0]
v | take_while(below_3) : [0,1,2]
v | drop_while(below_3) : [3,4,5]
v | filter(odd)   : [1,3,5]
v | transform(square) : [0,1,4,9,16,25]
s                : [A,B, ,C,D, ,E]
s | split(' ')   : [[A,B], [C,D], [E]]
s | split(' ') | join : [A,B,C,D,E]
m | keys         : [answer,wrong]
m | values       : [42,54]

```

C.12 Hilfsmittel

C.12.1 Funktoren

Hilfsfunktionen können an Algorithmen übergeben und darin aufgerufen werden. Sie arbeiten mit Werten eines Iteratorbereichs oder liefern Werte für einen Bereich:

```
int wuerfeln() { return std::rand()%6 + 1; } // #include <cstdlib>
```

Funktoren (Funktionsobjekte) sind Instanzen von Klassen mit `operator()`:

```
template <class T>
struct Arithmetische_Folge {
    Arithmetische_Folge(T startwert, T schrittweite = 1)
        : wert{startwert}, inkr{schrittweite} {}
    T operator() (void) { return wert += inkr; }
private:
    T wert, inkr;
};
```

Prädikate sind Wahrheitsaussagen über Eigenschaften oder Beziehungen von Objekten. Ob ein Prädikat zutrifft, testen Funktoren mit `bool`-Rückgabetypp:

```
template <class T>
struct Zwischen {
    Zwischen(T a, T b) : min{a}, max{b} {}
    bool operator() (T const& x) const { return min < x && x < max; }
private:
    T min, max;
};
```

Einige der Algorithmen haben `..._if()`-Varianten, die Prädikate verwenden können:

```
#include <algorithm>
#include <vector>

void algorithmen_demo()
{
    std::vector<int> a(50), b(50);

    std::generate(begin(a), end(a), wuerfeln);
    std::generate_n(begin(b), b.size(), Arithmetische_Folge{10});
    std::replace(begin(b), end(b), 16, 61);

    int anz = std::count(begin(a), end(a), 6);
    std::replace_if(begin(a), end(a), Zwischen{0,4}, 6); // mehr Sechsen!
    anz = std::count_if(begin(b), end(b), Zwischen{18, 55});
}
```

Lambda-Ausdrücke als *anonyme* oder *Ad-hoc-Funktionen*⁶⁸

$\llbracket \langle \text{Capture} \rangle_{opt} \langle \text{Parameter} \rangle_{opt} \langle - \rangle \text{Ergebnistyp} \rangle_{opt} \{ \langle \text{Anweisungen} \rangle \}$
definieren Funktoren zur sofortigen oder späteren Verwendung. In einfachen Fällen kann der Ergebnistyp vom Compiler ermittelt werden:

```
auto twice = [](int x) { return 2*x; }
int n = twice(3);
```

Algorithmen, die Funktoren erwarten, lassen sich flexibler formulieren. Durch Lambdas ist es seltener notwendig, Funktoren an anderer Stelle vorzudefinieren:

```
std::replace_if(begin(a), end(a),
  [](int x) { return (0 < x && x < 4; }, 6);
```

```
std::for_each(begin(a), end(a),
  [](int& x) { if (0 < x && x < 4) x = 6; });
```

Dasselbe Ergebnis erreicht man hier mit der *range-based-for*-Anweisung⁶⁹

```
for(int& x : a) { if (0 < x && x < 4) x = 6; }
```

Lambda-Ausdrücke beginnen mit einer eckigen Klammer (engl. *capture list*). Darin kann angegeben werden, welche lokalen Variablen der Umgebung im Lambda-Ausdruck bekannt sein sollen. Dieses Einbeziehen der Umgebung wird *Closure* (Einschluss) genannt. Durch die Angabe [&] werden alle Variablen der Umgebung als Referenz übernommen, [=] kopiert alle Werte der Umgebung. Auch Variablenlisten und gemischte Angaben [=, &count] sind möglich. In Methoden definierte Lambdas können [this] einschließen, um an Attribute des umgebenden Objektes heranzukommen.

```
#include <algorithm>
#include <iostream>
#include <string>

void closuredemo(std::string s = "Hello, Lambda Expressions in C++0x!")
{
  char low = 'A', high = 'Z';
  int count = 0;

  std::for_each(begin(s), end(s),
    [low, high, &count] (char c)
    {
      if (low <= c && c <= high) ++count;
    }
  );
  std::cout << count << '\n';
}
```

⁶⁸Alle Lambdas sind typverschieden, selbst wenn sie die gleiche Signatur besitzen.

⁶⁹`for($\langle \text{Typ} \rangle_{opt} \langle \text{Element} \rangle : \langle \text{Container} \rangle$) ...`

Tabelle 14: Funktoren für Grundoperationen auf dem Typ T aus <functional>.

Arithmetik	Vergleiche	Logik
+ plus<T>	== equal_to<T>	&& logical_and<T>
- minus<T>	!= not_equal_to<T>	logical_or<T>
- negate<T>	< less<T>	! logical_not<T>
* multiplies<T>	<= less_equal<T>	& bit_and<T>
/ divides<T>	> greater<T>	bit_or<T>
% modulus<T>	>= greater_equal<T>	^ bit_xor<T>

C.12.2 Funktorenbibliothek

Operatorobjekte für die Grundoperationen (Tab. 14) sind wie Funktionen nutzbar:

```
#include <functional>
#include <algorithm>
#include <iterator>
#include <list>

std::list<double> funktoren(Container a, Container b, Container c)
{
    std::plus<int> Add;
    int z = Add(1, 2);    // z = 1 + 2;

                                // a + b ==> c
    std::transform(begin(a), end(a), begin(b), begin(c), Add);
    std::list<double> d;
    std::transform(begin(a), end(a), begin(b),          // a * b ==> d
                  std::back_inserter(d), std::multiplies<double>());
    return d;
}
```

Polymorphe Funktionsadapter `std::function<Ergebnistyp(Typliste)>` nehmen sowohl Funktoren, Funktionszeiger als auch Lambda-Ausdrücke auf. Ob ihnen ein Wert zugewiesen wurde, kann vor dem Aufruf geprüft werden:

```
#include <cmath>

void polymorphic_function_adapter()
{
    std::function<double(double)> f = (double*)(double) std::acos;
    f = [] (double x) { return std::acos(x); };
    f = std::negate<double>();
    if (f) std::cout << f(1) << '\n';
}
```

Methodenzeiger werden eingekapselt, damit die korrekte, auch virtuelle, Methode mit den richtigen Objektzeigern oder -referenzen aufgerufen wird:

```
void zeichne_und_drehe(std::list<std::shared_ptr<Figur>> x, float winkel)
{
    std::for_each(begin(x), end(x), std::mem_fn(&Figur::draw));
    std::for_each(begin(x), end(x),
        std::bind(std::mem_fn(&Figur::rotate), winkel)); // siehe unten
}
```

Binder sind flexible Funktionsadapter. `std::bind(<Funktork>, <Argumentliste>)` koppelt die Parameter eines Funktors (Funktions- oder Methodenzeigers) an Platzhalter für die Argumente des Aufrufs, an Werte, Referenzen `std::ref(<Variable>)`, konstante Referenzen `std::cref(<Variable>)` oder Ergebnisse anderer Binder-Funktoren:

```
#include <algorithm>
#include <functional>
#include <string>
#include <vector>
#include <iostream>

int bind_demo(std::vector<std::string> text)
{
    std::divides<double> div;
    double nenner = 2;

    using namespace std::placeholders; // _1, _2, ...
    auto inverse = std::bind(div, _2, _1); // Platzhalter
    auto one_half = std::bind(div, 1.0, nenner); // Wert
    auto bruch = std::bind(div, 1.0, std::ref(nenner)); // Referenz
    auto strlenth = std::bind(&std::string::size, _1); // Methode
    auto min4Chars = std::bind(std::greater_equal<char>(), strlenth, 4);

    std::cout << inverse(1, 3) << '\n'; // div(3.0, 1.0)
    std::cout << one_half() << '\n'; // div(1.0, 2.0)
    std::cout << bruch() << '\n'; // div(1.0, nenner) == div(1, 2)
    nenner = 10;
    std::cout << bruch() << '\n'; // dto, jetzt div(1.0, 10.0)
    int n = std::count_if(begin(text), end(text), min4Chars);
    return std::count_if(begin(text), end(text), std::not1(min4Chars));
}
```

Negierer `not1()` und `not2()` ermitteln das Gegenteil ein- bzw. zweistelliger Prädikate.

C.12.3 Smarte Zeiger

Die Ablage von Objekten im *Freispeicher* ist vorteilhaft, wenn ihre Anzahl beim Schreiben des Programms nicht absehbar oder ihre Lebensdauer nicht an Funktionen gebunden ist. Der Speicher kann nach ihrem Abbau anderweitig genutzt werden. Container und smarte Zeiger regeln die Besitzverhältnisse an dynamischen Objekten und damit verbundene Aufgaben wie die Speicherfreigabe auch beim Auftreten von Ausnahmen.

```
std::make_shared<T>(<Parameter>)
```

```
std::make_unique<T>(<Parameter>)
```

erzeugen dynamisch ein Objekt mit den angegebenen Konstruktor-Parametern und kapseln es in einem `std::shared_ptr<T>` bzw. einem verschiebbaren, aber nicht kopierbaren `std::weak_ptr<T>`. Sie vernichten die Objekte automatisch, wenn sie selbst ungültig werden.

```
{
    auto p = std::make_unique<int>(1);
    auto q = std::make_unique<int>(2); // p = q; nicht erlaubt
    p = std::move(q); // expliziter Besitzwechsel, q ist leer
    std::cout << *p << '\n'; // 2
} // automatische Freigabe
{
    auto p = std::make_shared<int>(1);
    auto q = std::make_shared<int>(2);
    p = q; // p,q zeigen auf int(2), int(1) wird freigegeben
    *q = 3;
    std::cout << *p << '\n'; // 3
} // automatische Freigabe
```

Zeiger in Klassen können als smarte Zeiger geführt werden, wenn der referenzierte Speicher im Besitz der Instanz ist (*RAII-Prinzip*). Ein `std::weak_ptr<T>` als Attribut in Klassen verhindert Kopie und Zuweisung, sofern diese für die Klasse nicht definiert werden:

```
struct Besitzer { // Objekte mit Verschiebesemantik
    Besitzer () : meine{std::make_unique<Teil>()} {}
    // Besitzer(Besitzer const&) = delete;
    // Besitzer operator=(Besitzer const&) = delete;
    std::weak_ptr<Teil> meine;
};
```

Ein `std::shared_ptr<T>` erzeugt flache Kopien ohne weiteren Aufwand, aber im Gegensatz zu blanken Zeigern ist die Speicherfreigabe klar geregelt:

```
struct Nutzer { // Der Letzte macht das Licht aus.
    Nutzer () : gemeinsam{std::make_shared<Teil>()} {}
    std::shared_ptr<Teil> gemeinsam;
};
```

Polymorphe Container sind durch Kombination von Containerklassen mit smarten Zeigern einfach zu realisieren; smarte Zeiger beachten dabei Vererbungsregeln:

```
struct Animal {
    virtual ~Animal() = default;
};
struct Sheep : public Animal {};
struct Wolf : public Animal {};

void polymorph()
{
    auto sheep = std::make_shared<Sheep>();
    auto wolf = std::make_shared<Wolf>();
    auto zoo = std::vector<std::shared_ptr<Animal>>{ sheep, wolf };
    auto flock = std::vector<std::shared_ptr<Sheep>>(10, sheep);
                                     // 10 Zeiger zum selben Schaf
    if (auto inSheepsClothing = std::dynamic_pointer_cast<Sheep>(wolf))
        flock.push_back(inSheepsClothing); // kommt nicht rein, da nullptr
}
```

C.12.4 Datenkapseln für Einzelwerte

```
std::optional<int> find_smallest(std::vector<int> v)
{
    if (v.empty()) return {};
    return *min_element(begin(v), end(v));
}
```

```
struct Person {
    std::string name;
    std::optional<Address> address;
};
Person p { "me" };
auto& o = p.address;
```

Ein oder kein Wert `std::optional<T>` als Rückgabety⁷⁰ oder Komponente ist ab C++17 möglich. Nach `if(o)` oder `if(o.has_value())` kann auf `*o` und `o.value()` zugegriffen, andernfalls `o.valueOr(<ersatzwert>)` angegeben werden. Durch `o.reset()` oder `o = std::nullopt` wird der Wert gelöscht (Tab. 15).

Varianten Typ `std::variant<T1, ..., Tn>` bietet nicht typverwandten Werten abwechselnd gemeinsamen Speicher.

⁷⁰ Zeiger, „magische“ Werte wie `-1` oder `bool`-Rückgabewerte in Verbindung mit Referenzvariablen waren ein schlechter Ersatz für diesen Anwendungsfall.

Tabelle 15: Schnittstellen von `<any>` `<optional>` `<variant>`.

<code>any a</code>	<code>optional<T> o</code>	<code>variant<Ts...> v</code>
<code>make_any<T>(args)</code>	<code>make_optional<T>(args)</code>	<code>variant<monostate,...></code>
<code>a = 42</code>	<code>o = 42</code>	<code>v = 42</code>
<code>a.emplace<T>(args)</code>	<code>o.emplace(args)</code>	<code>v.emplace<T>(args)</code> <code>v.emplace<Index>(args)</code>
<code>a.has_value()</code>	<code>o.has_value()</code> <code>if(o)</code>	
<code>a.type()</code> <code>== typeid(T)</code>		<code>v.index()</code> <code>holds_alternative<T>(v)</code>
<code>any_cast<T>(a)[†]</code>	<code>o.value()[†]</code>	<code>get<T>(v)[†]</code>
<code>any_cast<T>(&a)</code> <code>!= nullptr</code>	<code>*o^a</code> <code>o.valueOr(42)</code>	<code>get<Index>(v)[†]</code> <code>visit(visitor, v)</code>
<code>a.reset()</code>	<code>o.reset()</code> <code>o = null_opt</code>	
<code>†bad_any_cast</code> <code>:bad_cast</code>	<code>†bad_optional_access</code> <code>:exception</code>	<code>†bad_variant_access</code> <code>:exception</code>

^aUndefiniertes Verhalten, wenn kein Wert vorhanden ist.

```
struct cpp11 {};
struct cpp17 {};
struct cppXY { std::string name; };
using Variant = std::variant<std::monostate, cpp11, cpp17, cppXY>;
```

Ein `variant`-Objekt wird durch eine Instanz des zuerst aufgeführten Typs belegt, wenn nichts anderes angegeben ist. Zuweisungen ändern das gekapselte Objekt und seinen Typ. `emplace<<Typ>>(<args>)` übernimmt Argumente für das zu erschaffende Objekt:

```
void zuweisen(Variant& v)
{
    v = cppXY{"C++20"};
    v.emplace<cppXY>("C++2b");
}
```

Typabfragen erfolgen mit `v.index()` bzw. `holds_alternative<<Typ>>(v)`. Der enthaltene Wert wird mit `get<<Index>>(v)` bzw. `get<<Typ>>(v)` entpackt. Leeren lässt sich die Kapsel nicht; `std::monostate` kann, wenn notwendig, für eine leere Kapsel stehen.

```
void loeschen(Variant& v)
{
    std::cout << v.index() << '\n';
    v = std::monostate{};
    std::cout << v.index() << '\n';
}
```

Besucher sind Funktionsobjekte, die für jeden möglichen Typ geeignete Operatoren () anbieten. Um den Ergebnistyp von `std::visit(<Besucher>, <Variant>)` zu bestimmen, müssen die Ergebnistypen übereinstimmen:

```
struct Besucher
{
    void operator()(std::monostate) { std::cout << "unbekannt\n"; }
    void operator()(cpp11) { std::cout << "C++11\n"; }
    void operator()(cpp17) { std::cout << "C++17\n"; }
    void operator()(cppXY x) { std::cout << x.name << "\n"; }
};

void besuchen(Variant v)
{
    std::visit(Besucher{}, v);
}
```

Besucher aus Lambda-Ausdrücken lassen mit einem Trick⁷¹ bilden:

```
template<class... Ts> struct overloaded:Ts...{ using Ts::operator()...;};
template<class... Ts> overloaded(Ts...) -> overloaded<Ts...>;

void besuchen2(Variant v)
{
    std::visit(overloaded{
        [] (std::monostate) { std::cout << "unbekannt\n"; },
        [] (cpp11) { std::cout << "C++11\n"; },
        [] (cpp17) { std::cout << "C++17\n"; },
        [] (cppXY x) { std::cout << x.name << "\n"; },
    }, v);
}
```

Beliebiger Typ `std::any`

Diese Kapsel ist als Ersatz für `void*` gedacht. Die Typinformation wird intern mitgeführt. Der Nutzer sollte wissen, welchen Typ der gekapselte Wert haben kann. `any_cast(a)` zum Entpacken wirft bei Nichtübereinstimmung des Typs eine Ausnahme, `any_cast(&a)` liefert einen Nullzeiger (siehe Tabelle 15).

⁷¹ Quelle: <https://en.cppreference.com/w/cpp/utility/variant/visit> — Nichts für Anfänger: variadische Templates, Faltausdrücke und template argument deduction guides in Kombination. Ein Vorschlag für die Standardbibliothek <https://wg21.link/P0051> wird vielleicht nach C++20 realisiert.

C.13 Zeichenketten

C.13.1 Nullterminierte Zeichenfolgen

```
char ptr1[] = { 'H', 'a', 'l', 'l', 'o', '\0' };
char const *ptr2 = "Hallo"; // Zeichenkettenliteral nicht änderbar
```

Nullterminierte Zeichenfolgen werden mit einem Zeiger auf den Anfang des Feldes angesprochen. Sie müssen ausreichend groß sein und mit `'\0'` abgeschlossen bleiben (sonst Pufferüberlauf und undefiniertes Verhalten). Zeiger müssen bei den Operationen gültig sein (Gefahr baumelnder Zeiger, Prüfung auf Nullzeiger). Speicherbereitstellung und Freigabe liegen in der Verantwortung des Programmierers (Gefahr von Speicherlecks).

Als Funktionsparameter entarten sie zu Zeigern (Referenzverhalten), können nur als Zeiger zurückgegeben werden, müssen als Parameter durchgereicht oder dynamisch verwaltet werden. Zeiger in lokale Zeichenfelder baumeln als Rückgabewerte!

Für *nur zu lesende* (Teil-)Zeichenbereiche nutzt `<string_view>` ab C++17 einen *nicht-besitzenden* Zeiger auf den Anfang und der Anzahl folgender Zeichen. Vergleiche und Suchmethoden wie bei `std::string` sowie Einkürzungen sind möglich. Gedacht ist diese Kapsel hauptsächlich für Funktionsparameter⁷²:

```
bool sv_test(std::string_view s) { return s == "all"; }

using std::literal;
sv_test("all");           // Zeichenkettenliteral
sv_test("all"s);         // std::string
sv_test("all"sv);        // string_view
sv_test({ptr2+1, 3});    // ptr, anzahl
sv_test("Hallo, Welt!"sv .remove_prefix(1).remove_suffix(8));
```

C.13.2 Die Klasse `string`

C++ kapselt diese fehlerträchtigen Routineaufgaben in Klassen. Durch optimierende Compiler, Kopier- und Verschiebesemantik sind `std::string`-Objekte⁷³ auch als Wertparameter und Rückgabewerte tauglich. Die Klassenschnittstelle im Header `<string>` ist umfangreich. Auf den nächsten Seiten stehen der Kürze halber folgende Parameternamen für die Typen:

```
std::string          s;
std::string const&   str;
char const*          ptr;
char                 c;
std::string::size_type pos, n, pos2, n2;
std::string::iterator first, last, first2, last2;
```

⁷²Zeiger bleiben gefährlich. Nicht als Rückgabebetyp einsetzen!

⁷³Für Zeichenketten aus `wchar_t`-Zeichen `L"Hallo"` gibt es `std::wstrings`, für mit UTF-8 kodierte Zeichenketten `char8_t` und `u8string`.

Konstruktoren schaffen einen neuen `std::string` aus

<code>std::string(str, pos=0, n=npos)</code>	<code>str</code> (ab <code>str[pos]</code> mit max. <code>n</code> Zeichen),
<code>std::string(ptr)</code>	einer C-Zeichenkette <code>ptr</code> (<code>!=nullptr</code>)
<code>std::string(ptr, n)</code>	(mit <code>n</code> Zeichen oder bis zur Ende-Null),
<code>std::string(n, c)</code>	<code>n</code> Zeichen <code>c</code> ,
<code>std::string(first, last)</code>	einem <i>Iterator</i> -Bereich [<code>first...last</code>].

```
void string_demo()
{
    char const *ptr = "Hello, world of strings!";

    std::string s1;           // leer
    std::string s2 = ptr;
    std::string s3(ptr);     // Kopie von "Hello, world of strings!"
    std::string s4(s2, 7);   // "world of strings!"
    std::string s5(s2, 7, 5); // "world"
    std::string s6(24, '*'); // "*****"
    std::string s7(ptr, ptr+5); // "Hello"

    std::cout << s7 << ", " << s4 << '\n'
                << s6 << '\n';
}
```

Zuweisungen mit `=` oder der Methode `assign(...)` weisen einem `std::string`

<code>assign(str, pos=0, n=npos)</code>	<code>str</code> (ab <code>str[pos]</code> mit höchstens <code>n</code> Zeichen),
<code>assign(ptr)</code>	eine gültige C-Zeichenkette
<code>assign(ptr, n)</code>	(mit maximal <code>n</code> Zeichen),
<code>assign(n, c)</code>	<code>n</code> Zeichen <code>c</code> ,
<code>assign(first, last)</code>	einen Bereich [<code>first...last</code>] zu.

```
void zuweisung_demo()
{
    std::string s;
    char const *ptr = "Zeichenketten";

    s = std::string(ptr, 7);
    s = ptr;
    s = 'C';
    s.assign(10, '.');
    s.assign(ptr, 6);
    s.assign(ptr, ptr+7);

    std::cout << s << '\n';
}
```

Verknüpfungen von Strings

operator+=(str2) Anhängen

operator+ (str1,str2) Verketteten

können auch mit C-Zeichenketten oder einzelnen Zeichen erfolgen:

```

s += str;
s += ptr;
s += c;
s = str1 + str2;
s = str + ptr;
s = ptr + str;
s = ptr + std::string(ptr); // ptr + ptr ist nicht erlaubt
s = c + str;
s = str + c;
s = c + std::string(1, c); // c + c erzeugt nur ein char

```

Die Methoden append(...) hängen an einen existierenden std::string

append(str, pos=0, n=npos) str (ab str[pos] mit höchstens n Zeichen),

append(ptr) eine C-Zeichenkette

append(ptr, n) (mit maximal n Zeichen),

append(n, c) n Zeichen c,

append(first, last) einen Bereich [first...last[an.

```

void anhaengen_demo()
{
    std::string s = "...";
    char const *ptr = "ketten";

    s += "Zeichen";
    s = s + ' ' + ptr;

    s.append(" wie Kletten");
    s.append(10, '.');

    std::cout << s << '\n';
}

```

Einfügungen schieben *vor* die Position pos bzw. *vor* den Iterator iter_pos

insert(pos, str, pos2=0, n=npos) str (ab str[pos2], max. n Zeichen),

insert(pos, ptr) eine gültige C-Zeichenkette

insert(pos, ptr, n) (mit n Zeichen),

insert(pos, n, c) n Zeichen c,

insert(iter_pos, c = '\0') ein Zeichen c,

insert(iter_pos, n, c) n Zeichen c,

insert(iter_pos, first, last) einen Bereich [first...last[ein.

```

void einsetzen_demo()
{
    std::string s = "immer";
    char ptr[] = "=>> noch was <<=";
    s.insert(0, "Mann-oh-mann", 0, 3);
    s.insert(3, "kann ");
    s.insert(3, 1, ' ');
    s.insert(s.end(), ptr, ptr+strlen(ptr) );
    std::cout << s.insert(s.length(), "einfuegen.") << '\n';
}

```

Löschmethoden entfernen

- `erase(pos=0, n=npos);` ab `s[pos]` maximal `n` Zeichen,
- `erase(iter_pos);` das Zeichen `*iter_pos`,
- `erase(first, last);` den Bereich `[first...last[`.

```

void loeschen_demo()
{
    std::string s = "Alles Ueberfluessige wird unverzueglich geloescht.";
    s.erase(s.end()-1);
    s.erase(s.begin()+6, s.end()-9);
    s.erase(5, 2);
    std::cout << s << '\n';
}

```

Ersetzen lassen sich ab `s[pos]` `n` Zeichen oder der Bereich `[first...last[` durch

- `replace(pos, n, str, pos2=0, n2=np2);` `str[pos2]...str[pos2+n2]`,
- `replace(pos, n, ptr);` eine C-Zeichenkette,
- `replace(pos, n, ptr, n2);` `ptr[0]...ptr[n2]`,
- `replace(pos, n, n2, c);` `n2` Zeichen `c`,
- `replace(first, last, str);` `:`
- `replace(first, last, ptr);`
- `replace(first, last, ptr, n2);`
- `replace(first, last, n2, c)`
- `replace(first, last, first2, last2)` den Bereich `[first2...last2[`.

```

void ersetzen_demo() // nach [B. Stroustrup: C++, 3rd edn]
{
    std::string s1 = "Das klappt nur dann, wenn du fest daran glaubst.";
    std::string s2 = "nicht";
    s1.replace(s1.find("nur dann"), 8, s2); // wird kuerzer
    s1.replace(s1.find("fest"), 4, s2); // wird laenger
    s1.replace(s1.end()-1, s1.end(), 10, '.' );
    std::cout << s1 << '\n';
}

```

Suchmethoden suchen ab `s[pos]` in den folgenden maximal `n` Zeichen

- einen Teilstring `str`, eine C-Zeichenkette `ptr` oder ein Zeichen `c`

von vorn <code>find(str, pos = 0)</code> <code>find(ptr, pos, n)</code> <code>find(ptr, pos = 0)</code> <code>find(c, pos = 0)</code>	von hinten <code>rfind(str, pos = npos)</code> <code>rfind(ptr, pos, n)</code> <code>rfind(ptr, pos = npos)</code> <code>rfind(c, pos = npos)</code>
---	--
- die

erste Übereinstimmung <code>find_first_of(str, pos = 0)</code> <code>find_first_of(ptr, pos, n)</code> <code>find_first_of(ptr, pos = 0)</code> <code>find_first_of(c, pos = 0)</code>	letzte Übereinstimmung <code>find_last_of(str, pos = npos)</code> <code>find_last_of(ptr, pos, n)</code> <code>find_last_of(ptr, pos = npos)</code> <code>find_last_of(c, pos = npos)</code>
erste Nicht-Übereinstimmung <code>find_first_not_of(str, pos = 0)</code> <code>find_first_not_of(ptr, pos, n)</code> <code>find_first_not_of(ptr, pos = 0)</code> <code>find_first_not_of(c, pos = 0)</code>	letzte Nicht-Übereinstimmung <code>find_last_not_of(str, pos = npos)</code> <code>find_last_not_of(ptr, pos, n)</code> <code>find_last_not_of(ptr, pos = npos)</code> <code>find_last_not_of(c, pos = npos)</code>

mit einem Zeichen der Zeichenmenge `str`, `ptr` oder `c`.

Sie liefern die Anfangsposition der gefundenen Teilkette bzw. des Zeichens, auf das die geforderte Bedingung zutrifft; andernfalls wird `std::string::npos` zurückgegeben:

```
void suchen_demo()
{
    std::string s = "Entente cordial", NT = "nt"; // "Not There" ?
    char const vocals[] = "AEIOUaeiou";
    std::string::size_type pos = 0;

    pos = s.find(NT);           // pos == 1
    pos = s.rfind(NT);         // pos == 4
    pos = s.find_first_of(vocals); // pos == 3
    pos = s.find_last_of(vocals); // pos == 13
    pos = s.find_first_not_of(vocals); // pos == 1
    pos = s.find_last_not_of(vocals); // pos == 14

    if (pos != std::string::npos) // gefunden
    {
        std::cout
            << "Wir finden den letzten Konsonanten (markiert durch ^) in :\n"
            << s << '\n'
            << string(pos, ' ') << '^' << '\n';
    }
}
```

Zugriff auf ein einzelnes Zeichen an der Stelle `pos` zum Schreiben oder Lesen erfolgt

`s[pos]` ungeprüft oder

`s.at(pos)` geprüft.

Wenn `pos` hinter dem Ende liegt, wirft `at()` eine `out_of_range`-Ausnahme.

Iteratormethoden liefern abhängig von Durchlaufrichtung und Konstanzheit

`begin()` (vorwärts) `std::string::iterator` oder

`end()` `std::string::const_iterator`,

`rbegin()` (rückwärts) `std::string::reverse_iterator` oder

`rend()` `std::string::const_reverse_iterator`

als *Random-Access-Iteratoren* auf den Anfang und *hint* das Ende des `std::string`- ►C.10.1

Inhalts. Diese Iteratoren verhalten sich wie Zeiger in die Zeichenkette. Die vorwärts gerichteten Iteratoren sind auch über globale Funktionen `begin(s)` und `end(s)` erreichbar.

```
void zugriff_demo()
{
    std::string s = "zeichen sind einzeln ansprechbar!";

    s[0] = 'Z';
    s.at(s.length()-1) = '.'; // letztes Zeichen

    std::string::iterator i = s.begin(); // oder begin(s)
    std::string::reverse_iterator ri = s.rbegin();

    while (i != s.end()) // oder end(s)
    {
        std::cout << *i++ << ' ';
    }
    std::cout << "\nIteratoren wandern hin ... und her:\n";

    while (ri != s.rend())
    {
        std::cout << *ri++ << ' ';
    }
    std::cout << '\n';
}
```

Vertauschungen wechseln die Inhalte aus:

```
void tauschen_demo()
{
    std::string s1 = "abc", s2 = "def";

    s1.swap(s2); // hin ... (effizienter)
    std::swap(s1, s2); // und zurueck
}
```

Vergleiche (`==` `!=` `<` `<=` `>=` `>`) zweier `std::strings` untereinander als auch mit C-Zeichenketten sind möglich. Die `compare()`-Methoden vergleichen in `s` bzw. ab `s[pos]` maximal `n` Zeichen mit

<code>compare(str, pos2, n2)</code>	<code>str[pos2]...str[pos2+n2]</code>
<code>compare(pos, n, str, pos2=0, n2=npos)</code>	(bzw. dem String <code>str</code>)
<code>compare(ptr, n2)</code>	der C-Zeichenkette <code>ptr</code>
<code>compare(pos, n, ptr, n2 = npos)</code>	(maximal <code>n2</code> Zeichen)

und liefern

einen negativen Wert,	wenn <code>s</code> lexikographisch vor dem Argument kommt,
einen positiven Wert,	wenn <code>s</code> danach kommt,
Null	bei Übereinstimmung.

```
void vergleich_demo(std::string name)
{
    std::string str = "Asterix";
    char const ptr[] = "Obelix";

    if (name == str || ptr == name)
        std::cout << "Die spinnen, die Roemer!\n";
    if (name.compare(str) > 0 && name.compare(ptr) < 0)
        std::cout << name << " zwischen " << str << " und " << ptr << ".\n";
}
```

Ein- und Ausgaben erfolgen mit den Stromoperatoren `>>` und `<<`. Eingelesen wird nur bis zum nächsten Whitespace, führende Whitespaces werden verschluckt. Die Funktion `getline()` liest dagegen alle Zeichen bis zum Auftreten des Begrenzers `delim` ein. Der Begrenzer wird aus dem `std::istream` ausgelesen, jedoch nicht in `s` aufgenommen.

```
void io_demo(char delim = '\n')
{
    std::string s = "Ich habe Hunger. Gib mir einen Keks! :";
    std::cout << s; // Kruemelmonster
    std::getline(std::cin, s, delim); // auch ohne delim = '\n'
    std::cout << s << '\n';
}
```

Größe und Kapazität eines `std::string` sind erfragbar und änderbar:

<code>empty()</code>	liefert <code>true</code> bei Leerstring,
<code>size()</code>	Anzahl von Zeichen,
<code>length()</code>	dto.,
<code>max_size()</code>	größte mögliche Zeichenzahl,
<code>capacity()</code>	Fassungsvermögen ohne Reallokation,
<code>reserve(n = 0)</code>	reserviert Speicher fuer <code>n</code> Zeichen,
<code>resize(n, c = '\0')</code>	kürzt oder füllt mit <code>c</code> auf,
<code>clear()</code>	leert den String.

Teil- und C-Zeichenketten lassen sich aus einem `std::string` herausziehen:

<code>substr(pos=0, n=npos)</code>	eine Teilkette als <code>std::string</code> ,
<code>c_str()</code>	eine temporär gültige C-Zeichenkette (Zeiger),
<code>copy(ptr, n, pos = 0)</code>	kopiert max. n Zeichen ab <code>s[pos]</code> nach <code>ptr</code> .

Die Umwandlung in eine C-Zeichenkette sollte nur erfolgen, wenn dies unumgänglich ist. Der von `c_str()` gelieferte Zeiger ist nur gültig, solange der liefernde `std::string` existiert und noch nicht geändert wurde. Die Methode wurde hauptsächlich eingeführt, weil viele (alte) Bibliotheksfunktionen einen `char const*` erwarten:

```
std::remove(oldFilename.c_str());           // #include <cstdio>
std::rename(oldFilename.c_str(), newFilename.c_str());
```

Bei `copy()` muss das Feld `ptr[]` genügend lang sein; eine abschließende Null wird nicht kopiert, diese muss der Aufrufer selbst anfügen.

```
void teilketten_demo(std::string s = "Apollo 13")
{
    char ptr[80];                          // gross genug ?
    std::string::size_t n = s.copy(ptr, 79); // anz kopierte Zeichen
    ptr[n] = '\0';                          // End-Null nicht vergessen!
    std::cout << ptr << '\n';
    std::cout << s.substr(0,6) << '\n';
}
```

Konversion von Zahlen in Zeichenketten erfolgt mit `std::to_string(zahl)`. Für die umgekehrte Richtung sind die Funktionen `std::stoi(s, ...)` vorgesehen. Der optionale zweite Parameter liefert die Position hinter dem letzten Zeichen der Zahl, der dritte Parameter bei Ganzzahlkonvertierungen legt die Zahlbasis fest.

```
void konvertieren(int i, long long ll, double d)
{
    int base = 16;
    size_t end;
    i = std::stoi("0xff", &end, base);      // auch: stol(long, ...)
    ll = std::stoll("0xff", &end, base);    //          stoul(long long, ...)
    d = std::stod("1.23", &end);           //          stof(float, ...)

    std::cout << std::to_string(i) << ' ' // noch nicht in gcc 4.7, VC10
              << std::to_string(ll) << ' '
              << std::to_string(f) << ' '
              << std::to_string(d) << '\n';
}
```

C.13.3 Lokalisierung und Zeichenarten

Internationalisierung (Anpassung an bestimmte Besonderheiten von Sprachen, Regionen und Zeichensätzen) erlaubt, Ein- und Ausgaben landesspezifisch zu formatieren:⁷⁴

```
#include <locale>
// ...
std::locale loc("German"); // VC10
std::cout.imbue(loc);
std::cout << 1234.56;      // 1.234,56
```

Zeichenketten sprachabhängig korrekt sortieren, z.B. Hase Häsin Hund Hündin:

```
std::string tiere[size];
std::sort(tiere, tiere+size, loc);
```

auch Zeicheneigenschaften (`isspace`, `isprint`, `iscntrl`, `isdigit`, `isxdigit`, `isalpha`, `isupper`, `islower`, `isgraph`, `isblank`) hängen von der gewählten Region ab. Eigenheiten wie Sortierung, Zeichenart, Kodierung, Geld-, Zahl- und Zeitformate werden in Facetten⁷⁵ implementiert. Die Schnittstelle ist durch eigene Facetten erweiterbar:

```
class Umlaut : public std::locale::facet
{
public:
    static std::locale::id id;
    bool is_umlaut(char c) const { /* ... */ }
protected:
    ~Umlaut() {};
};
```

```
std::locale loc2(loc, new Umlaut); // neue Facette in Kopie einbauen
```

```
void zeichentyp(char c, std::locale const& loc)
{
    if (std::isalpha(c, loc)) std::cout << c << "ist Buchstabe." << '\n';
    if (std::has_facet<Umlaut>(loc) &&
        std::use_facet<Umlaut>(loc).is_umlaut(c))
        std::cout << c << "ist Umlaut!" << '\n';
}
```

⁷⁴Die Namen der Sprachen und Regionen sind implementierungsabhängig: g++ 4.7 unterstützt unter Windows nur die Namen "C" und "POSIX". Unter Linux sind Locale-Namen wie "de_DE.UTF-8" gängig. Microsoft benutzt nicht standardisierte Bezeichner. `Boost.Locale` versucht, die Mängel der seit 1998 vorhandenen Bibliothek zu beseitigen.

⁷⁵Rogue Wave (<http://h30097.www3.hp.com/cplus/intzln.pdf>) gibt dazu eine gute Einführung.

C.13.4 Reguläre Ausdrücke

Suchmuster (reguläre Ausdrücke) ermöglichen effizientes Erkennen, Prüfen, Suchen, Filtern von und Ersetzen in Zeichenketten. In der Klasse `std::regex` wird ein endlicher Automat zur Prüfung regulärer Ausdrücke bereitgestellt. Fehlerhafte Ausdrücke werfen eine Ausnahme vom Typ `std::regex_error`. Eine Suche ist schon erfolgreich, wenn ein *Teil der Zeichenkette* mit dem regulären Ausdruck übereinstimmt:

```
#include <fstream>
#include <iostream>
#include <regex>
#include <string>

int main(int argc, char* argv[]) // Minimalversion von grep
{
    if (argc < 3) return 1;
    try
    {
        std::regex    re{argv[1]};
        std::ifstream in{argv[2]};
        std::string   line;

        while (std::getline(in, line))
        {
            if (std::regex_search(line, re)) std::cout << line << '\n';
        }
    }
    catch (std::regex_error& e)
    {
        std::cerr << '\n' << argv[1] << "\n" : " << e.what() << '\n';
    }
}
```

Validieren prüft dagegen die Übereinstimmung („*match*“) der *gesamten Zeichenkette* mit den im Ausdruck festgelegten Regeln:

```
std::string s = "user@example.com";
std::regex rex;
rex = "[a-z0-9_-]+(\\.[a-z0-9_-]+)*@[a-z0-9_-]+(\\.[a-z0-9_-]+)";

if (std::regex_match(s, rex)) std::cout << "eMail ok";
```

In regulären Ausdrücken auftretende Backslashes (siehe Tab. 16) müssen im Quelltext als `\\` entwertet werden. Sauberer ist dann die Darstellung als *raw string*:

```
rex = R"_( [a-z0-9_-]+(\\. [a-z0-9_-]+)*@[a-z0-9_-]+(\\. [a-z0-9_-]+) )_";
```

Tabelle 16: Ausgewählte Symbole in regulären Ausdrücken.

<code>c</code>	normales Zeichen	<code> </code>	logisches Oder von Ausdrücken
<code>^</code>	Zeilenanfang, Negation in <code>[]</code>	<code>()</code>	gruppiert Teilausdrücke
<code>\$</code>	Zeilenende	<code>[]</code>	definiert Klasse von Zeichen
<code>.</code>	jedes Zeichen außer <code>\n</code>	<code>*</code>	Ausdruck davor beliebig oft oder nie
<code>\d</code>	Ziffer <code>[0-9]</code>	<code>+</code>	Ausdruck mindestens 1 mal
<code>\D</code>	keine Ziffer <code>[^0-9]</code>	<code>?</code>	Ausdruck 0 oder 1 mal
<code>\w</code>	<code>_</code> oder Buchstabe <code>[A-Za-z_]</code>	<code>{n}</code>	Ausdruck genau n mal
<code>\W</code>	kein Buchstabe oder <code>_</code>	<code>{n,}</code>	Ausdruck mindestens n mal
<code>\s</code>	Whitespace <code>[\t\n\r\f]</code>	<code>{n,m}</code>	mindestens n , höchstens m mal
<code>\S</code>	kein Whitespace	<code>\c</code>	Zeichen c ohne Sonderbedeutung:
<code>\xFF</code>	hexkodiertes Zeichen		<code>^ . \$ () [] * + ? \ /</code>

Ersetzen liefert eine neue Zeichenkette, in der alle Fundstellen des regulären Ausdrucks durch die Ersatzzeichenkette ausgetauscht sind:

```
std::string original = "Drei Chinesen", ersatz = "a";
std::regex rex{"[aeiou]"};
std::cout << std::regex_replace(original, rex, ersatz) << '\n';
```

Mit dem optionalen Parameterwert `std::regex_constants::format_first_only` wird der Austausch auf die erste Fundstelle beschränkt.

Übereinstimmende Bereiche (*matches*) der Durchmusterung mit `regex_match` und `regex_search` können in einem `std::smatch`-Referenzparameter als Paare von Iteratoren auf das erste und hinter das letzte Zeichen hinterlegt werden.⁷⁶

```
std::string s = "24.12.2011";
std::regex rex{R"_((\d{1,2})\.(\d{1,2})\.(\d{4}|\d{2}))_"};
std::smatch matches;
if (std::regex_search(s, matches, rex))
{
    std::string day = matches[1], month = matches[2], year = matches[3];
}
```

Die gefundene Gesamtkette wird in `matches[0]` notiert, durch runde Klammern eingegrenzte Teilausdrücke liefern weitere Paare `matches[i]` mit $i < matches.size()$:

```
matches:  [----0----]
          24.12.2011
          -- -- ----
          [1] [2] [-3-]
```

⁷⁶Diese Paare sind zu `std::string` konvertierbar. Für die Klassen der `<regex>`-Bibliothek existieren Varianten mit `wstring` und C-Zeichenketten (`wregex`, `wsmatch`, `cmatch`, `wcmatch`). Die Funktionen sind als Schablonen realisiert.

Reguläre Ausdrücke („wildcards on steroids“) können recht komplex sein. Zum Testen empfiehlt sich ein kleines Programm wie das folgende⁷⁷:

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <regex>

int main()
{
    while (true)
    {
        std::string expr, s;
        std::cout << "Ausdruck:   ";
        std::getline(std::cin, expr);
        if (expr == "exit") break;
        std::cout << "Zeichenfolge: ";
        std::getline(std::cin, s);
        try
        {
            std::regex rex{expr};
            std::smatch matches;
            if (std::regex_match(s, matches, rex))
            {
                for (int i = 0; i < matches.size(); i++)
                {
                    std::string match = matches[i];
                    std::cout << "\tmatches[" << i << "] = " << match << '\n';
                }
            }
            else std::cout << "Der Ausdruck \"" << expr
                << "\" trifft auf \"" << s << "\" nicht zu.\n";
        }
        catch (std::regex_error& e)
        {
            std::cout << expr << " ist kein regulaerer Ausdruck: \""
                << e.what() << "\"\n";
        }
    }
}
```

⁷⁷nach: <http://onlamp.com/pub/a/onlamp/2006/04/06/boostregex.html>

C.14 Ein- und Ausgabe

C.14.1 Datenströme

C++ bietet eine einheitliche Schnittstelle für ein- und ausgehende Daten:

```
#include <iostream>

void caesar_chiffre(std::istream& in, std::ostream& out)
{
    char c;
    while (in.get(c)) out << char(c+3);
}
```

Dabei ist es gleichgültig, woher die Daten kommen (`std::istream`) oder wohin sie gehen (`std::ostream`) — Geräte (Konsole), Dateien oder Zeichenketten (`std::string`):

```
std::string buf="123+1.23/4.5-.1";
std::istringstream in{buf};      // string als Eingabestrom
std::ofstream out("datei.txt"); // Ausgabe-Dateistrom
```

Erreicht wird dies durch eine Hierarchie von Klassen-Schablonen für beliebige Eingabezeichen. In Tabelle 17 sind die Spezialisierungen für den `char`-Typ angegeben. Strömen für *Wide-Character-* (`wchar_t`)-Zeichen ist jeweils noch ein `w` vorangestellt.

Standard-Ein- und -Ausgabekanäle sind während der gesamten Programmdauer mit vier Stromvariablen verbunden:

Eingabe-Konsole: Tastatur	<code>std::cin</code>	Fehlerausgabe: Bildschirm	<code>std::cerr</code>
Ausgabe-Konsole: Bildschirm	<code>std::cout</code>	Fehlerausgabe (gepuffert)	<code>std::clog</code>

Die Ströme können beim Programmaufruf⁷⁸ auch in Dateien oder Pipes gelenkt werden:

```
program.exe < input.dat > output.dat 2> fehler.log
```

Ausgabeströme `std::ostream` nehmen Daten aller Typen entgegen, für die ein Ausgabeoperator `operator<<()` definiert ist und schreiben die entsprechende Zeichenfolge.

```
void ausgabe(std::ostream& out, double d)
{
    out << d << " Hallo"; // Ausgabe
    out.put('\n');        // einzelnes Zeichen
    out.flush();          // Puffer leeren
    out.write(reinterpret_cast<char*>(&d), sizeof(d)); // Speicherinhalt
}
```

Die Methode `write(char*, size_t)` ist für die unformatierte (Low-Level-)Ausgabe von Binärdateien geeignet. Sie schreibt den Speicherinhalt byteweise und versucht nicht, Zeichenketten daraus zu machen. Da die Speicheranordnung der Grundtypen hardware-spezifisch ist, ist das Ergebnis jedoch nicht portabel.

⁷⁸Beispiel aus UNIX (betriebssystemabhängig).

Tabelle 17: Im Namensraum `std` definierte Stromklassen zur Ein- und Ausgabe.

	Eingabe	Ausgabe	beides
allgemein	<code>istream</code>	<code>ostream</code>	<code>iostream</code>
Dateien	<code>ifstream</code>	<code>ofstream</code>	<code>fstream</code>
Zeichenketten	<code>istringstream</code>	<code>ostringstream</code>	<code>stringstream</code>

Eingabeströme `std::istream` verwandeln eingegebene (zulässige) Zeichenfolgen in Variablenwerte aller Typen, für die `operator>>()` definiert ist. Führende Whitespaces werden bei der formatierten Eingabe mit `>>` verschluckt (Voreinstellung).

```
void eingabe(std::istream& in, std::string& s, char& c, double& d)
{
    in >> d >> s;           // Eingabe
    std::getline(in, s);    // ganze Zeile (Zeilenumbruch wird verschluckt)
    in.get(c);             // einzelnes Zeichen
    in.putback(c);         // gelesenes Zeichen wieder in Puffer schieben
    c = in.peek();         // nachschauen, aber nicht auslesen
    in.read(reinterpret_cast<char*>(&d), sizeof(d)); // Bytes in Speicher
}
```

Unformatierte Eingaben aus Binärdateien erfolgen mit `read(char*, size_t)`. Die Eingabe von Zeichenketten stoppt beim nächsten Whitespace-Zeichen. Daher wird vom Einlesen in Zeichenfelder dringend abgeraten (Gefahr des Pufferüberlaufs):

```
char str[10]; // lang genug ?
in >> str;    // kann und wird schiefgehen
```

Die Methoden `getline()` und `get()` lesen auch führende Whitespaces in die Zeichenkette ein, begrenzen die Eingabelänge auf `n-1` Zeichen und hängen stets eine Null an. Werden keine oder `n-1` Zeichen vor dem Erreichen von `stop` gelesen, wird das `failbit` gesetzt.

```
int charfeld_eingabe(std::istream& in, char* str, int n, char stop='\n')
{
    in.getline(str, n, ende); // stop wird verschluckt
    in.getline(str, n);       // stop = '\n'
    in.get(str, n, ende);     // stop wird nicht gelesen
    in.get(str, n);           // geht schief, wenn schon bei '\n'
    return in.gcount();       // Anzahl zuletzt gelesener Zeichen
}
```

Ein- und Ausgabeströme (`std::iostream`) entstehen durch Mehrfachvererbung und beherrschen sowohl Eingabe- (`std::istream`) und Ausgabemethoden (`std::ostream`).

Der Stromzustand von Eingabe- und Ausgabeströmen ist erfragbar:

```
std::ios_base::iostate zustand(std::istream& s) // oder auch std::ostream
{
    if (s.good()) cout << "gut";
    if (s.eof() ) cout << "noch gut, aber am Dateiende";
    if (s.fail()) cout << "Aktion schiefgegangen,"
                        " Strom noch verwendbar";
    if (s.bad() ) cout << "Strom total durcheinander";
    return s.rdstate();
}
```

Er wird intern durch Flags `goodbit`, `badbit`, `eofbit`, `failbit` aus der Basisklasse `std::ios_base` repräsentiert, kann mit `rdstate()` abgefragt und mit `clear()` gelöscht werden. `clear(state)` überschreibt den Zustand komplett, `setstate(bit)` setzt einzelne Bits zusätzlich.⁷⁹

Ein- und Ausgabe-Operatoren selbst definierter Typen sollten so geschrieben werden, dass Variablen beim Einlesen nicht in einen undefinierten Zustand geraten können und der einzulesende Wert erst geändert wird, wenn die Eingabe komplett erfolgreich war. Ein guter Zustand ist Voraussetzung, aber keine Garantie für den Erfolg weiterer Aktionen mit dem Strom. Bei nicht gutem Zustand haben Ausgaben und Eingaben keine Wirkung.⁸⁰ Zumeist genügt eine Abfrage:

```
if (is >> x >> y) { /* Erfolg ... */ }
```

Zeichenkettenströme aus `<sstream>` lesen aus und schreiben in `std::strings`:

```
#include <sstream>

std::string stromkapselung(std::string text)
{
    std::istringstream in{text};
    std::ostringstream out;
    std::string tmp;
    while (in >> tmp)
    {
        out << tmp << '\n'; // jedes Wort auf eine Zeile
    }
    return out.str();      // verwandelt Inhalt wieder in string
}
```

Die Methode `str()` liefert eine Kopie des Strominhalts.

⁷⁹Die Namensgebung ist hier teilweise irreführend.

⁸⁰Unter diesem Aspekt sind die Statusabfragen kaum von Nutzen. Die Abfragen erlauben aber in bestimmten, seltenen Situationen, den Stromzustand zu reparieren.

Dateiströme aus `<fstream>` arbeiten auf Dateien:

```
#include <fstream>

void Datei_Ein_und_Ausgabe()
{
    std::ifstream in{"input.txt"};
    std::ofstream out;
    std::fstream fs{"datei.dat",
        std::ios_base::in|std::ios_base::out|std::ios_base::binary};
    out.open("output.txt");
    if (out) { out << "Ich war hier!"; }
    out.close(); // schreibt Daten, schliesst Datei; nicht erforderlich
} // denn offene Streams schliessen automatisch
```

Die Konstruktoren und `open()` können ein zweites Argument übernehmen, dessen Werte

<code>in</code>	zum Lesen öffnen
<code>out</code>	zum Schreiben öffnen
<code>binary</code>	als Binärdatei statt als Textdatei öffnen
<code>ate</code>	gleich ans Ende gehen („at end“)
<code>app</code>	Daten anhängen
<code>trunc</code>	Dateiinhalte löschen

in `std::ios_base` definiert sind und verodert werden können. *Textdateien* werden als Folgen von Zeichen aufgefasst, die aber keine 1-zu-1-Entsprechung zu den Zeichenfolgen auf externen Geräten haben müssen. So erfolgen systemabhängig (Windows) bestimmte Zeichenumwandlungen wie von `'\n'` zu CR/LF. *Binärdateien* führen keine Zeichenumwandlungen durch. Auch EOF kann mitten in einer Binärdatei vorkommen.

Ströme mit wahlfreiem Zugriff können die Lage der aktuellen Lese- oder Schreibposition im Strom erfragen und ändern. Dies ist vor allem für Binärdateien wichtig.

```
long size(std::istream& is)
{
    long pos = is.tellg(); // "get"-Position merken
    is.seekg(0, std::ios_base::beg); // an den Anfang gehen
    long beg = is.tellg();
    is.seekg(0, std::ios_base::end); // ans Ende
    long end = is.tellg();
    is.seekg(pos); // Zustand wiederherstellen
    return end - beg;
}
```

Die Position kann absolut vom Anfang oder relativ zu Anfang (`ios_base::beg`), Ende (`ios_base::end`) bzw. aktueller Position im Strom (`ios_base::cur`) gesetzt werden:

```
is.seekg(-8, std::ios_base::cur); // acht Byte (ein double?) zurueck
```

Bei Ausgabeströmen funktionieren `tellp()` und `seekp()` (p für „put“) entsprechend.

C.14.2 Formatierung

Die Verwendung von Flags zur Kontrolle eines Stream-Zustands ist jedenfalls eher eine Studie über Implementierungstechniken als über Schnittstellen-Design.

– Bjarne Stroustrup

Das Verhalten der Eingabe-Ströme und das Aussehen der Ausgaben (*Formatierung*) wird durch Schalter (*flags*) in der Basisklasse `std::ios_base` gesteuert.⁸¹ Der Schalter `boolalpha` bewirkt, dass statt 0 oder 1 je nach Ländereinstellung (*locale*) `true` und `false` (Standard englisch) oder `wahr` und `falsch` (deutsch) ausgegeben wird. Ist `skipws` gesetzt (Standard), werden führende Whitespaces bei der Eingabe verschluckt. Die Optionen werden verodert und haben bleibende Wirkung.

```
void formatierung(std::istream& in)
{
    long alt = in.flags(); // alte Schalter erfragen
    long neu = std::ios_base::skipws;
    in.flags( alt | neu ); // alle Schalter neu setzen
    in.setf( neu );        // einzelnes Flag setzen
    in.unsetf( neu );      // einzelnes Flag entfernen
}
```

Ganzzahlen sind in drei Zahlensystemen darstellbar:

```
void ganzzahlbasis(std::ostream& out, int i)
{
    out.setf(std::ios_base::dec, std::ios_base::basefield);
    out << i << ' '; // dezimal (Standard)
    out.setf(std::ios_base::oct, std::ios_base::basefield);
    out << i << ' '; // oktal
    out.setf(std::ios_base::hex, std::ios_base::basefield);
    out << i; // hexadezimal
}
```

gibt 25 31 19 aus. Die Methode `setf(flag, mask)` setzt alle Flags in `mask` zurück und setzt `flag` neu, wirkt also wie `flags(flags() & ~mask | flag&mask)` und verhindert, dass zwei widersprechende Schalter gleichzeitig gesetzt werden. Wurde zusätzlich `showbase` angeschaltet, wird auch die Zahlenbasis mit angezeigt: 25 031 0x19. Entsprechend der eingestellten Zahlenbasis werden auch Eingaben interpretiert:

```
in.setf(std::ios_base::oct, std::ios_base::basefield);
in >> i;
```

Die eingegebenen Ziffern 31 erzeugen den Wert 25 (dezimal).⁸²

⁸¹Häufig wird für `char`-Ströme auf deren abgeleitete Klasse `std::ios` Bezug genommen.

⁸²Programmierer verwechseln immer Weihnachten mit Halloween, weil `OCT 31 == DEC 25` ist.

Gleitkommazahlen zeigen bei Ausgabe den Dezimalpunkt (oder bei deutscher Locale das Komma) nur, wenn `showpoint` gesetzt wird. Die Zahl der Stellen hinter dem Komma kann abgefragt und neu gesetzt werden:

```
void mehrdezimalen(std::ostream& out, int nachkommastellen)
{
    out.precision( nachkommastellen ); // setzen
    nachkommastellen = out.precision(); // abfragen
}
```

Mit der Standard-Einstellung 0 wird die Ausgabe auf 6 Nachkommastellen gerundet, nicht abgeschnitten. Große oder sehr kleine Zahlen werden in der Exponentialschreibweise ausgegeben, z. B. `1.602e-19`. Dieses Format lässt sich für alle Ausgaben mit `scientific` erzwingen oder mit `fixed` unterdrücken.

```
out.setf(std::ios_base::scientific, std::ios_base::floatfield); // setzen
out.unsetf(std::ios_base::scientific | std::ios_base::fixed); // loeschen
out.setf(0, std::ios_base::floatfield); // auch loeschen
```

Positive Vorzeichen werden bei gesetztem `showpos` gezeigt, durch `uppercase` erscheint `X` in hex-Werten und `E` im `scientific`-Format groß (Standard: aus für beide).

Die Ausgabebreite ist nur für die unmittelbar folgende Ausgabe änderbar, danach wird sie wieder auf den Standardwert 0 gesetzt:⁸³

```
out.width(n); // Ausgabeweite festlegen
n = out.width(); // abfragen
```

Bei zu knappem Platz wird weitergeschrieben⁸⁴, bei größerer Breite werden mit

```
char ch = out.fill(); // Standard: Leerzeichen
out.fill( '_' ); // anderes Zeichen einsetzen
```

gesteuerte Füllzeichen eingefügt. Die Ausrichtung erfolgt nach Einstellungen wie

```
out.setf(std::ios_base::internal, std::ios_base::adjustfield);
```

im `adjustfield` und bewirkt für `-1.23456789` die Ausgabe

```
        // width(8), precision(2)
-1.23__ // left (Standard)
___-1.23 // right
-___1.23 // internal
```

`internal` fügt Füllzeichen zwischen Vorzeichen und Zahlwert ein.

⁸³Alle anderen Einstellungen sind dauerhaft.

⁸⁴Lieber hässlich richtig als schön falsch.

Tabelle 18: Parameterlose `iostream`-Manipulatoren und ihre Wirkung.

<code>flush</code>			leert den Puffer
<code>endl</code>			fügt '\n' ein und leert den Puffer
<code>ends</code>			fügt '\0' ein und leert den Puffer
<code>boolalpha</code>	<code>noboolalpha</code>		Wahrheitswerte als Wort oder Zahl
<code>showbase</code>	<code>noshowbase</code>		Anzeige der Zahlenbasis 0... oder 0x...
<code>showpoint</code>	<code>noshowpoint</code>		Komma bei ganzen Gleitkommazahlen
<code>showpos</code>	<code>noshowpos</code>		positives Vorzeichen zeigen
<code>skipws</code>	<code>noskipws</code>	<code>ws</code>	Leerzeichen vor Eingabe verschlucken
<code>uppercase</code>	<code>nouppercase</code>		X und E groß
<code>dec</code>	<code>hex</code>	<code>oct</code>	Wechsel der Zahlenbasis
<code>fixed</code>	<code>scientific</code>		Darstellung der Gleitkommazahlen
<code>left</code>	<code>internal</code>	<code>right</code>	Ausrichtung in breiten Feldern

Tabelle 19: `iostream`-Manipulatoren mit Parametern (<`iomanip`> ist einzubinden).

<code>setbase(base)</code>	Wechsel der Zahlenbasis (8, 10, 16)
<code>setprecision(n)</code>	Genauigkeit von Gleitkommazahlen
<code>setw(n)</code>	Ausgabefeldbreite
<code>setfill(c)</code>	Füllzeichen
<code>setiosflags(f)</code>	Setzen und
<code>resetiosflags(f)</code>	Rücksetzen von Flags

Manipulatoren (Tabellen 18–19) bieten elegantere Schreibweisen an. Manipulatoren mit Argumenten sind in `<iomanip>` definiert (Tabelle 19).

```
int i = 123;
double d = 123.456789;
std::cout << std::hex << i
           << std::dec << std::showpos << ' ' << i << '\n';
std::cout << std::setw(12) << std::right << i << '\n'
           << std::setw(12) << std::internal << i << '\n'
           << std::setw(12) << std::setprecision(3) << d << '\n'
           << std::setw(12) << std::scientific << d << '\n';
```

Der Methoden-Stil wirkt dagegen grauenhaft (hier nur für die Zeilen 3 und 4):

```
std::cout.setf(std::ios_base::hex, std::ios_base::basefield);
std::cout << i;
std::cout.setf(std::ios_base::dec, std::ios_base::basefield);
std::cout.setf(std::ios_base::showpos);
std::cout << ' ' << i << '\n';
std::cout.flush();
```

C-Ausgabeformatierung mit `int sprintf(char* s, char const* fmt, ...)` erlaubt Ausgaben in (ausreichend lange) Puffer-Zeichenketten `s[]` im Hauptspeicher:

```
#include <cstdio>

std::string C_ausgabe(char c = 'A', int i = 123, double d = 1.23)
{
    char buf[1000]; // genug?
    std::sprintf(buf, "char: %c int: %d float: %f\n", c, i, f);
    std::sprintf(buf, "Anteil = %07.3lf%%\n", f); // Anteil = 01.230%
    std::sprintf(buf, ":%10.5s:\n", "Hallo, Welt"); // :      Hallo:
    int breite = 10, anzahl = 5;
    std::sprintf(buf, ":%-*.*s:\n", breite, anzahl, "Hallo, Welt");
    return buf; // :Hallo      :
}

```

Die durch % eingeleiteten kompakten *Formatieranweisungen* in der Formatzeichenkette `fmt` steuern die Darstellung der nachfolgenden Argumente.⁸⁵ Sie enthalten optional

- ein - (bei linksbündiger Ausgabe), + (Zahl immer mit Vorzeichen) oder Leerzeichen (vor positiver Zahl),
- ein # zur „alternativen“ Darstellung (Gleitkommazahlen immer mit Dezimalpunkt, immer auffüllende Nullen, Anzeige der Oktal-/Hexadezimalbasis)
- eine Zahl, welche die Feldbreite der Ausgabe bestimmt (bei vorangehender Null werden Zahlen links mit Nullen aufgefüllt),
- ein Dezimalpunkt, dem eine Zahl für die Genauigkeit der Ausgabe folgt (Nachkommaziffern einer Gleitkommazahl oder Anzahl der Zeichen einer Zeichenfolge),
- ein * anstelle von Feldbreite oder Genauigkeit wertet das nächste Argument als diese Angabe aus,

und zwingend einen Buchstaben für den Datentyp des Arguments. Ein vorausgehendes `h`, `l` oder `L` weist auf `short`, `long` und `double` bzw. `long double` hin:

<code>c</code>	Zeichen
<code>d</code>	Ganzzahl (dezimal)
<code>e</code> oder <code>E</code>	Gleitkommazahl mit Exponent nach <code>e</code> oder <code>E</code>
<code>f</code>	Gleitkommazahl
<code>g</code> oder <code>G</code>	der kürzere von <code>f</code> und <code>e</code> oder <code>E</code>
<code>o</code>	Ganzzahl (oktal)
<code>n</code>	bisher geschriebene Zeichen (erfordert <code>int*</code> -Argument)
<code>p</code>	Zeiger
<code>s</code>	Zeichenkette
<code>u</code>	vorzeichenlose Ganzzahl
<code>x</code> oder <code>X</code>	Ganzzahl (hexadezimal), Ziffern >9 als <code>a-f</code> oder <code>A-F</code>

⁸⁵Irrtümer bei der Zuordnung von Format und Argumenten führen *ohne Warnung* zu Laufzeitfehlern. Die Ausgabe eines Prozentzeichens erfolgt mit `%%`.

Tabelle 20: Mathematische Konstanten im Namensraum `std::numbers` ab C++20.

<code>pi</code>	$\pi = 3.14159\dots$	<code>e</code>	Eulersche Zahl $e = 2.71828\dots$
<code>inv_pi</code>	$1/\pi$	<code>ln2</code>	$\ln 2$
<code>inv_sqrtpi</code>	$1/\sqrt{\pi}$	<code>ln10</code>	$\ln 10$
<code>sqrt2</code>	$\sqrt{2}$	<code>log2e</code>	$\log_2 e$
<code>sqrt3</code>	$\sqrt{3}$	<code>log10e</code>	$\log_{10} e$
<code>inv_sqrt3</code>	$1/\sqrt{3}$	<code>egamma</code>	Euler-Mascheroni-Konstante $\gamma = 0.5772\dots$
		<code>phi</code>	Goldener Schnitt $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.618\dots$

C.15 Mathematik

C.15.1 Mathematische Funktionen und Konstanten

Grundfunktionen aus `<cmath>` (Tab. 21) erwarten Argumente der Typen `float`, `double` oder `long double`.⁸⁶ Das Ergebnis hat den gleichen bzw. bei verschiedenen Argumententypen den breiteren Typ. Mathematische Konstanten finden sich `<numbers>` (Tab. 20).

C.15.2 Tupel

n -Tupel (a_1, a_2, \dots, a_n) sind heterogene Gruppierungen von Werten aus n Grundmengen. Die Schablone `std::tuple<Types...>` nimmt eine beliebige, feste Anzahl von Argumenten verschiedener Typen auf, `std::pair<X,U>` genau zwei.⁸⁷

```
#include <functional> // ref
#include <tuple>
#include <utility>    // pair

void tupledemo(char c = 'A', int i = 200, double d = 3.14)
{
    auto t = std::tuple{c, i, d}; // verpacken
                                   // entpacken
    c = std::get<0>(t);           // einzeln
    std::tie(c, i, d) = t;       // alle
    std::make_tuple(std::ref(c), std::ref(i), std::ref(d)) = t; // auch so
    std::tie(c, std::ignore, d) = t; // Platzhalter unbenutzt
}
```

Tupel können wie Paare, Strukturen, Arrays mit „structured bindings“ entpackt werden:

```
auto& [c, dummy, d] = t; // C++17
```

⁸⁶ Höhere „spezielle“ Funktionen ab C++17 sind hier nicht aufgeführt.

⁸⁷ `tuple<X,U>` und `pair<X,U>` lassen sich ineinander umwandeln.

Tabelle 21: Funktionen aus `<cmath>` im Namensraum `std` (Auswahl).

<code>abs(x), fabs(x)</code>	Betrag und Vorzeichen: $ x $
<code>signbit(x)</code>	$x < 0$
<code>copysign(x,y)</code>	$ x * \text{sgn}(y)$
<code>pow(x,y)</code>	Potenzen und Wurzeln: x^y (für $x \geq 0$)
<code>sqrt(x), cbrt(x)</code>	\sqrt{x} für $x \geq 0$, $\sqrt[3]{x}$
<code>hypot(x,y), hypot(x,y,z)</code>	$\sqrt{x^2 + y^2}$, $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
<code>exp(x), exp2(x)</code>	e-Funktion, Logarithmen: $e^x, 2^x$
<code>log(x), log2(x), log10(x)</code>	$\ln x, \log_2 x, \log_{10} x$
<code>exp1m(x), log1p(x)</code>	$e^x - 1, \ln(1 + x)$ für $x > -1$
<code>frexp(x, &n)</code>	$x \mapsto y * 2^n$ mit $\frac{1}{2} \leq y < 1$
<code>ldexp(y, n)</code>	$y * 2^n$
<code>cos(x), sin(x), tan(x)</code>	Winkelfunktionen (im Bogenmaß): $\cos x, \sin x, \tan x$
<code>acos(x), asin(x),</code>	$\arccos x, \arcsin x$ für $-1 \leq x \leq 1$
<code>atan(x), atan2(y,x)</code>	$\arctan x, \arctan \frac{y}{x}$ (bei $x = 0 \Rightarrow y \neq 0$)
<code>cosh(x), sinh(x), tanh(x)</code>	Hyperbelfunktionen: $\cosh x, \sinh x, \tanh x$
<code>acosh(x), asinh(x), atanh(x)</code>	$\text{arcosh } x, \text{arsinh } x, \text{artanh } x$
<code>lgamma(x), tgamma(x)</code>	Gamma- und Gaußsche Fehlerfunktion: $\ln \Gamma(x), \Gamma(x) = (x - 1)!$ für $x > 0$
<code>erf(x), erfc(x)</code>	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$
<code>floor(x), ceil(x), trunc(x), round(x)</code>	nächste ganze Gleitkommazahl: $[x], [x], [x]$, ab $n.5$ weg von 0
<code>rint(x), nearbyint(x)</code>	in aktuelle Rundungsrichtung mit/ohne Setzen der <code>inexact</code> -Ausnahme
<code>lround(x), llround(x)</code>	Runden zu Ganzzahl <code>long, long long</code>
<code>fmod(x,y)</code>	Divisionsrest $r = x - n * y$
<code>remainder(x,y), remquo(x,y, &n)</code>	mit $ r < y $, $\text{sgn}(r) = \text{sgn}(y)$ nächstes n , gerade bei $ n - x/y = 0.5$
<code>nextafter(x,y)</code>	Gleitkommadarstellung: $x \pm \varepsilon$ in Richtung y
<code>nexttoward(x,y)</code>	dto. mit <code>long double y</code>
<code>isfinite(x), isnormal(x), isinf(x)</code>	endlich, normalisiert, $x = \pm\infty$
<code>isunordered(x,y)</code>	<code>isnan(x)</code> oder <code>isnan(y)</code>
<code>fmin(x,y), fmax(x,y)</code>	kleinster/grösster Wert, auch mit NANs
<code>fdim(x,y)</code>	$x - y$ für $x > y$, sonst 0
<code>fma(x,y,z)</code>	$x*y+z$ mit nur einer Rundung

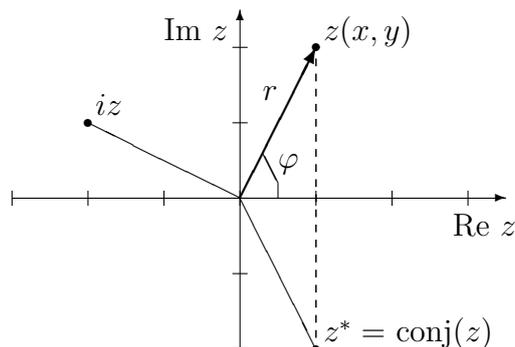


Abbildung 12: Komplexe Zahl z in der Gaußschen Zahlenebene in kartesischen $(x + iy)$ und Polarkoordinaten (r, φ) , multipliziert mit i und Konjugierte z^* .

C.15.3 Komplexe Zahlen

Klassen `std::complex<T>` für komplexe Zahlen (Abb. 12) aus Gleitkommatypen T finden sich im Header `<complex>`. Neben Grundrechenoperationen, Ein- und Ausgabe können Winkelfunktionen, Hyperbelfunktionen, e^z , $\ln z$, $\log_{10} z$, Potenzen z^{z^2} und Quadratwurzeln \sqrt{z} (Tab. 21) berechnet werden. Die Speicheranordnung garantiert, dass Real- und Imaginärteil komplexer Zahlen mit Feldelementen gleichen Typs zur Deckung kommen:

```
std::complex<double> leben(double re = 1, double im = 2)
{
    using namespace std::complex::literals;
    std::complex<double> z{re, im}, i = std::sqrt(-1.0+0.0i);
    z = real(z) - i*imag(z); // conj(z)
    z = proj(z);           // Projektion auf Riemannkugel

    auto array = reinterpret_cast<double(&)[2]>(z);
    re = array[0]; im = array[1];

    double r = abs(z); // std::sqrt(norm(z))
    double phi = arg(z); // std::atan2(imag(z), real(z))
    return std::polar(r, phi);
}
```

C.15.4 Verhältnisse

Mit `std::ratio<Zähler, Nenner>` lassen sich zur Übersetzungszeit berechnete Brüche aus Ganzzahlen wie die SI-Vorsätze (Tab. 22) definieren. Ihre Bestandteile `nom` und `den` müssen in `intmax_t` passen.⁸⁸ Sie finden u.a. Anwendung in der Bibliothek `<chrono>`.

►C.16

⁸⁸Daher sind `zeta`, `yotta`, `zepto` und `yocto` nicht auf allen Systemen definiert.

Tabelle 22: SI-Vorsätze aus `<ratio>` im Namensraum `std`.

deca	10 : 1	deci	1 : 10	tera	10 ¹² : 1	pico	1 : 10 ¹²
hecto	100 : 1	centi	1 : 100	peta	10 ¹⁵ : 1	femto	1 : 10 ¹⁵
kilo	1000 : 1	milli	1 : 1000	exa	10 ¹⁸ : 1	atto	1 : 10 ¹⁸
mega	10 ⁶ : 1	micro	1 : 10 ⁶	zetta	10 ²¹ : 1	zepto	1 : 10 ²¹
giga	10 ⁹ : 1	nano	1 : 10 ⁹	yotta	10 ²⁴ : 1	yocto	1 : 10 ²⁴

C.15.5 Zufallszahlen

Überblick Die Funktion `std::rand()` erzeugt pseudozufällige Zahlen.⁸⁹

```
#include <cstdlib>
#include <ctime>
#include <iostream>

void zufall0()
{
    unsigned long seed = (unsigned long) std::time(0);
    std::srand(seed);    // nur 1x im Programm!
    for (int i = 0; i < 20; ++i)
        std::cout << std::rand() << ' ';
}
```

C++ stellt zudem miteinander kombinierbare Generatoren (*Engines*), Saatwerte⁹⁰ und Verteilungsfunktionen bereit, die höheren Ansprüchen genügen:

```
#include <random>
#include <functional>

void zufall1()
{
    std::random_device rd;
    std::mt19937 engine{rd()};
    // std::mt19937 engine{(unsigned long)std::time(0)};
    std::normal_distribution<> normal;
    std::function<double()> rnd = std::bind(normal, engine);

    for (int i = 0; i < 20; ++i)
        std::cout << rnd() << ' ';
}
```

⁸⁹Es sind keine echt zufälligen Zahlen, da sie mittels eines Algorithmus aus einem Saatwert `srand(seed)` erzeugt werden. `rand()` ist für nebenläufige Programme ungeeignet. Zudem ist die erzeugte Zufallsfolge häufig von minderer Qualität.

⁹⁰`std::random_device` ist bei MinGW g++ 7.2 unter Windows (noch?) nicht zufällig. Für kryptographisch sichere Saatwerte muss auf Betriebssystemmittel zurückgegriffen werden.

Tabelle 23: Zufallszahlgeneratoren aus `<random>` im Namensraum `std`.

<code>minstd_rand0</code>	LCG mit $a = 16807, c = 0, m = 2^{31} - 1$
<code>minstd_rand</code>	LCG mit $a = 48271, c = 0, m = 2^{31} - 1$
<code>mt19937</code>	Mersenne Twister 32bit
<code>mt19937_64</code>	Mersenne Twister 64bit
<code>ranlux24_base</code>	subtraktiver Generator mit Übertrag, 24bit
<code>ranlux48_base</code>	dto, 48bit
<code>ranlux24</code>	nimmt 23 von 223 erzeugten Werten
<code>ranlux48</code>	nimmt 11 von 389 erzeugten Werten
<code>knuth_b</code>	Shuffle-Algorithmus von Donald E. Knuth
<code>default_random_engine</code>	einfacher Generator, implementierungsabhängig

Generatoren sind Funktionsobjekte, die beim Aufruf `g()` einen Ganzzahlwert aus dem geschlossenen Intervall `[g.min(), g.max()]` liefern. Ein Funktionsobjekt `g` heißt *Engine*, wenn es im Konstruktor eine Saatsequenz übernehmen kann, die auch mit `g.seed(seq)` neu wiederherstellbar ist. Mit `g.discard(n)` wird eine Anzahl von Werten übersprungen. Der Zustand einer Engine lässt sich in einen Strom schreiben bzw. aus diesem wiederherstellen und mit Vergleichsoperatoren die Gleichheit der Zustände prüfen:

```
std::mt19937 engine1, engine2;
std::stringstream input;
input << engine1;
input >> engine2;
assert(engine1 == engine2);
```

Vorgefertigte Generator-Engines (Tab. 23) sind Spezialisierungen von Schablonen. Lineare Kongruenzgeneratoren (LCG) erzeugen Werte $x_{n+1} = (ax_n + c) \bmod m$, subtraktive mit $x_{n+1} = x_{n-s} - x_{n-r} - c \bmod m$. Mersenne-Twister bieten sehr lange Perioden. Daneben gibt es eine Reihe von Adaptern. Eine `discard_block_engine<Engine, p, r>` überspringt nach r Werten die restlichen Werte einer von `engine` erzeugten Folge aus p Werten. Eine `independent_bits_engine<Engine, w, zieltyp>` kombiniert w Bits der Basis-Engine zum Zieltyp. Die `shuffle_order_engine<Engine, k>` liefert jeweils k Werte der Basis-Engine in veränderter Reihenfolge.

Verteilungen `D(<parameter>)` erzeugen mit dem Generator `g` beim Aufruf `d(g)` bzw. `d(g, d.param())` eine Zufallszahl nach dem zugehörigen Verteilungsgesetz (Tab. 24) im Intervall `[d.min(), d.max()]`. Die Parameter der Verteilung lassen sich auslesen und mit `d.param(p)` neu setzen sowie mit I/O-Operatoren in Datenströme schreiben bzw. daraus lesen. Nach `d.reset()` hängen nachfolgende Werte nicht mehr von bisher erzeugten ab.

Saatfolgen `S(first, last)` wie von `std::random_device` geliefert initialisieren Engines, `s.generate(first, last)` befüllt den angegebenen Bereich, `s.param(out)` schreibt `s.size()` Werte in den Ausgabeiterator `out`.

Tabelle 24: Zufallsverteilungen aus <random> im Namensraum std.

uniform_int_distribution(a = 0, b=numeric_limits<int>::max())	$P(i a, b) = 1/(b - a + 1)$	$a \leq i \leq b$
uniform_real_distribution (a = 0.0, b = 1.0)	$p(x a, b) = 1/(b - a)$	$a \leq x < b$
bernoulli_distribution(p = 0.5)	$P(b p) = \begin{cases} p & \text{für } b = \\ 1 - p & \end{cases}$	$\begin{cases} \text{true} \\ \text{false} \end{cases}$
binomial_distribution (n=1, p=0.5)	$P(i n, p) = \binom{n}{i} p^i (1 - p)^{n-i}$	$0 \leq i \leq n$
geometric_distribution(p = 0.5)	$P(i p) = p(1 - p)^i$	$0 \leq i$
negative_binomial_distribution (n = 1, p = 0.5)	$P(i n, p) = \binom{n+i-1}{i} p^n (1 - p)^i$	$0 \leq i$
poisson_distribution(mu = 1.0)	$P(i \mu) = \frac{e^{-\mu} \mu^i}{i!}$	$0 \leq i$
exponential_distribution (lambda = 1.0)	$p(x \lambda) = \lambda e^{-\lambda x}$	$0 < x$
gamma_distribution (alpha = 1.0, beta = 1.0)	$p(x \alpha, \beta) = \frac{e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1}$	$0 < x$
weibull_distribution (a = 1.0, b = 1.0)	$p(x a, b) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$	$0 \leq x$
extreme_value_distribution (a = 0.0, b = 1.0)	$p(x a, b) = \frac{1}{b} e^{-\gamma - e^{-\gamma}}, \gamma = \frac{x-a}{b}$	$x \in \mathbb{R}$
normal_distribution (mu = 0.0, sigma = 1.0)	$p(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$x \in \mathbb{R}$
lognormal_distribution (mu = 0.0, sigma = 1.0)	$p(x \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$0 < x$
chi_squared_distribution (n = 1)	$p(x n) = \frac{x^{(n/2)-1} e^{-x/2}}{\Gamma(n/2) 2^{n/2}}$	$0 < x$
cauchy_distribution (a = 0.0, b = 1.0)	$p(x a, b) = \frac{1}{\pi} \frac{b}{(x-a)^2 + b^2}$	$x \in \mathbb{R}$
fisher_f_distribution (m = 1, n = 1)	$p(x m, n) = \frac{\Gamma((m+n)/2)}{\Gamma(m/2)\Gamma(n/2)} \binom{m}{n}^{m/2} \cdot x^{m/2-1} \left(1 + \frac{mx}{n}\right)^{-(m+n)/2}$	$0 \leq x$
student_t_distribution (n = 1)	$p(x n) = \frac{1}{\sqrt{n\pi}} \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\Gamma(n/2)} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}$	$x \in \mathbb{R}$
discrete_distribution (firstW, lastW)	$P(i p_0, \dots, p_{n-1}) = \frac{w_i}{\sum_{k=0}^{n-1} w_k}$	$0 \leq i < n$ $w_i > 0$
piecewise_constant_distribution (firsttb, lastb, firstW)	$p(x b_0, \dots, b_n, \rho_0, \dots, \rho_{n-1}) = \frac{w_i}{(b_{i+1} - b_i) \sum_{k=0}^{n-1} w_k}$	
piece_linear_distribution (firsttb, lastb, firstW)	$p(x b_0, \dots, b_n, \rho_0, \dots, \rho_n) = \rho_i \frac{b_{i+1} - x}{b_{i+1} - b_i} + \rho_{i+1} \frac{x - b_i}{b_{i+1} - b_i},$ $\rho_i = \frac{w_i}{\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{n-1} (w_k + w_{k+1})(b_{k+1} - b_k)}$	$b_i \leq x < b_{i+1}$

C.15.6 Bitmengen

Gegenüber `std::array<bool,N>` packt `std::bitset<N>` eine feste Anzahl von Bits in eine kompakte, speichereffiziente Form. Zur Initialisierung sind Ganzzahlen, Zeichenketten und Sequenzen boolescher Werte geeignet. Bitweise und Bitschiebeoperatoren sowie Vergleichs- und Ein-/Ausgabe-Operationen sind nutzbar:

```
#include <bitset>

auto answer()
{
    std::bitset<32> b{"1100000010101000"}, netmask{0xFFFFFFFF};
    b <<= 16;
    b |= 42;
    netmask.flip();
    return (b & netmask);
}
```

Der Elementzugriff auf ein einzelnes Bit erfolgt mit `b[i]`. Methoden `b.set(i,wert)` zum Setzen, `b.reset(i)` zum Löschen und `b.flip(i)` zum Umkehren einzelner Bits bzw. ohne Index `b.set(wert)`, `b.reset()` und `b.flip()` für alle Bits sind definiert. Abfragemethoden `b.size()`, `b.count()`, `b.all()`, `b.any()` und `b.none()` ermitteln Anzahl aller Bits bzw. testen, ob und wieviele Bits gesetzt sind.

Mit `b.to_ulong()` und `b.to_ullong()` wird der Ganzzahlwert der Bitfolge geliefert. Kann dieser nicht im Zieltyp untergebracht werden, wird ein `std::overflow_error` geworfen. Die Methode `b.to_string()` erzeugt eine Zeichenkette aus Nullen und Einsen⁹¹, dabei steht das niederwertigste Bit ganz rechts.

C.15.7 Wertfelder

Elementweise Operationen und Funktionsberechnungen ohne die explizite Formulierung von Schleifen bei optimalem Zeitverhalten waren das Ziel der Entwicklung von `std::valarray<T>`.⁹² Erlaubt sind die bei den numerischen Grundtypen T üblichen Operationen. Sind beiden Operanden Wertfelder, müssen sie gleich viele Elemente haben.⁹³

Neben dem Elementzugriff `v[i]` mit `i < v.size()` gibt es nur wenige Methoden: `v.min()`, `v.max()`, `v.sum()` sowie `v.cshift(n)` und `v.shift(n)` zum (zirkulären) Links- bzw. Rechtsschieben, das herausgeschobene Elemente bzw. Nullen am anderen Ende einfügt. Mit `v.apply(f)` lassen sich Funktionen der Signatur `T f(T)` auf jedes Element anwenden. Für die Funktionen aus `<cmath>` existieren Varianten, die auf `valarray<T>` elementweise arbeiten:

⁹¹Statt `toString('0','1')` können andere Zeichen für `true` und `false` vereinbart werden.

⁹²Die Array-Operationen aus Fortran 90 lieferten die Idee zu dieser Bibliothek. Sie führt ein Schatten-dasein bei Hochleistungsberechnungen. Einige Compileranbieter haben für Multiprozessorsysteme optimierte Implementierungen.

⁹³Andernfalls ist das Verhalten nicht definiert. Eine Überprüfung findet weder beim Übersetzen noch beim Ausführen statt.

```

#include <valarray>

void elementweise_operation()
{
    double arr[] = { 1.1, 2.2, 3.3, 4.4 };
    std::valarray<double> v1(4);
    std::valarray<double> v2(arr, 4);
    std::valarray<double> v3(3.1, 4); // andersherum bei vector<T>!
    std::valarray<double> v4({0, 1, 4, 9});

    v1 = 2.0 * (v3-v2) + sqrt(v4); // 4 2.8 1.6 0.4
    v1.cshift(1);                 // 2.8 1.6 0.4 4
}

```

Auswahl von Arrayelementen durch Indexfelder, Bitmasken, Vergleichsoperationen und (verallgemeinerte) Scheiben (`slice` bzw. `gslice`) erzeugt Hilfsobjekte vom Typ `indirect_array<T>`, `mask_array<T>`, `slice_array<T>` bzw. `gslice_array<T>`. Diese halten Referenzen auf die ausgewählten Elemente, die Werte oder Wertfelder elementweise übernehmen können und sich in Wertfelder kopieren lassen. Zur Veranschaulichung der Auswahl ein Beispiel mit einem Wertfeld aus Buchstaben:

```

void selektieren()
{
    std::valarray<char> v("abcdefghijklmnopqrstuvwxy", 26);

    std::valarray<size_t> index = { 7,6,5,4,3,2,1 };
    std::valarray<bool> mask1 = {false, false, true, false, true, true};
    std::valarray<bool> mask2 = v < 'm';
    std::slice s(4, 15, 2); // start, anzahl, schrittweite
    std::gslice g(4, {3, 4}, {7, 2}); // start, anzahlen, schrittweiten

    std::valarray<char> vi = v[index]; // hgfedcb
    std::valarray<char> vm1 = v[mask1]; // cef
    std::valarray<char> vm2 = v[mask2]; // abcdefghijkl
    std::valarray<char> vs = v[s]; // egikmoqsuwy
    std::valarray<char> vg = v[g]; // egiklnprsuwy

    v[mask2] = '_'; // _____mnopqrstuvwxy
}

```

C.16 Zeit

C.16.1 Abstraktion vom Rechnertakt

Die Bibliothek `<chrono>` definiert Typen für Zeitspannen, Zeitpunkte und Uhren im Namensraum `std::chrono` unabhängig von den im Lauf der Jahrzehnte immer kürzer gewordenen Rechnertakten.

Zeitspannen `duration<<Tickzahl>, <Zeiteinheit>>` werden als Zahlen (Ticks) einer Zeiteinheit⁹⁴ dargestellt. Neue Zeitspannetypen können geschaffen werden:

```
#include <chrono>
#include <iostream>

void es_dauert()
{
    using namespace std::chrono;
    seconds day = hours{23} + minutes{56} + seconds{4};
    milliseconds ms = day;
    duration<double, std::ratio<1,24>> pics = day;

    std::cout << day.count() << " sec = "
              << ms.count() << " ms = "
              << pics.count() << " Filmbilder\n";
}
```

Rechenoperationen (Grundrechenarten, Vergleiche) erfolgen weitgehend beim Übersetzen. Die Umrechnung in kleinere Zeitspanne-Einheiten ist immer möglich, umgekehrt jedoch nur in Gleitkommatypen oder durch Cast:

```
seconds s = ms;          // Fehler: Genauigkeitsverlust
minutes m = duration_cast<minutes>(ms); // abrunden
```

Uhren messen Zeitspannen ausgehend von ihrem willkürlich festgelegten Anfangszeitpunkt, Epoche genannt.⁹⁵ Sie sind dünne Wrapperklassen um die Betriebssystemmittel zur Zeitmessung. Jede Uhr besitzt einen Zahltyp `rep`, eine Verhältniszahltyp `period` einen Zeitdauer-Typ `duration`, einen Typ für Zeitpunkte `time_point` und eine statische Klassenfunktion `now()`, die den aktuellen Zeitpunkt liefert.

Die Uhren `system_clock` und `high_resolution_clock` sind vordefiniert. Bei der Uhr `steady_clock` wird zudem garantiert, dass die von ihr nacheinander gelieferten Zeitpunkte niemals „rückwärts“ laufen. Die Auflösungsgenauigkeit einer Uhr kann weniger als eine Nanosekunde betragen, daher wird die Zeitspanne als Gleitkommazahl ermittelt.⁹⁶

⁹⁴Die Typen `hours`, `minutes`, `seconds`, `milliseconds`, `nanoseconds`. sind als Ganzzahlverhältnisse `std::ratio<<z>, <n>>` von Sekunden definiert.

⁹⁵Das kann der 1. Januar 1970 0:00 GMT oder auch der Start des laufenden Prozesses sein.

⁹⁶Siehe Howard Hinnant: How to get the precision of `high_resolution_clock`, Stack Overflow, <http://stackoverflow.com/a/8387129/831725>.

```
template <class Clock>
double precision_in_nanoseconds()
{
    Clock::duration tick{1};
    std::chrono::duration<double, std::nano> ns = tick;
    return ns.count();
}
```

Zeitpunkte `time_point<<Uhr>, <Zeitspanne>` sind auf ihre Uhr bezogen:

```
template <class Clock>
Clock::rep ticks()
{
    typename Clock::time_point epoch, now = Clock::now();
    typename Clock::duration gone = now.time_since_epoch();
    return gone.count(); // Ticks seit Epoche
}
```

Die Differenz zweier Zeitpunkte ist eine Zeitspanne $d = p_2 - p_1$. Zu einem Zeitpunkt lässt sich eine Zeitspanne addieren oder subtrahieren und liefert einen Zeitpunkt $p_2 = p_1 + d$. Vergleiche $p_1 < p_2$ erlauben Formulierungen wie davor und danach.

C.16.2 Rückgriff auf C-Bibliothek

Umwandlung in Datum und Anzeige sind in `<chrono>` nicht festgelegt. Dafür existieren Mittel der Bibliothek `<ctime>` und I/O-Manipulatoren:

```
#include <iomanip> // put_time()

void vorbei()
{
    using namespace std::chrono;
    system_clock::time_point gestern = system_clock::now() - hours{24};
    std::time_t t = system_clock::to_time_t(gestern);
    std::cout << "gestern zur selben Zeit : "
                << std::put_time(std::localtime(&t), "%F %T") << '\n';
}
```

Diese enthält einen Ganzzahltyp `time_t`⁹⁷, eine Struktur `tm` mit Komponenten für Tag, Monat, Jahr (seit 1900), Stunde, Minute und Sekunde sowie Funktionen `mktime()`, `gmtime()` und `localtime()` zur Umwandlung zwischen diesen.

Uhrticks seit Programmstart liefert `std::clock()`, in `CLOCKS_PER_SEC` ist die Anzahl je Sekunde hinterlegt. Die Zeitmessung mit `std::time(&t)` erfolgt dagegen nur sekundengenau. Beide Varianten der Zeitmessung werden durch die `<chrono>`-Bibliothek überflüssig.

⁹⁷Sekunden seit 1970, wird wohl im Jahr 2038 überlaufen...

C.17 Parallelverarbeitung

C.17.1 Leichtgewichtige Prozesse

Threads starten parallel laufende Arbeitsstränge durch Übernahme einer Funktion:

```
#include <thread>

void task()
{
    std::cout << std::this_thread::get_id() << '\n';
}

void nebenher()
{
    std::thread t{task};
    // anderes zu tun ...
}
```

Die nebenläufig abzuarbeitende Funktion kann auch ein Funktor oder Lambda-Ausdruck sein. Wertparameter⁹⁸ können mitgegeben werden:

```
std::thread t1{ausgabe, "Gleichzeitig?\n"};
std::thread t2{ausgabe, "Kann ich nicht.\n"};
ausgabe("Foyer des Arts\n");
```

Threads beenden sich selbst, sobald die übernommene Funktion endet. Der aufrufende Thread (Besitzer) kann warten, bis der von ihm gestartete parallele Ablaufaden abgearbeitet ist und ihn dann zusammenführen oder ihn vorher abkoppeln:⁹⁹

```
t1.join();    // warten
t2.detach();  // abkoppeln
std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds{42});
}
```

Threads besitzen Verschiebesemantik, sie lassen sich nicht kopieren. Mit der Methode `joinable()` ist erfragbar, ob der Thread noch zusammengeführt werden kann.

Mitunter ist es sinnvoll, die Anzahl der Prozessoren, Kerne bzw. Hyperthreads des Systems mit `std::thread::hardware_concurrency()` zu ermitteln. Wenn dies scheitert, liefert die Funktion 0.

`std::this_thread` erlaubt, den aktiven Thread mit `sleep_for(duration)` für eine vorgegebene Zeitspanne oder mit `sleep_until(time_point)` bis zu einem bestimmten Zeitpunkt schlafen zu legen. Mit `yield()` kann er auf den Rest seiner Zeitscheibe verzichten, damit andere Thread aktiv werden können.

⁹⁸Referenzen auf gemeinsam genutzte Ressourcen werden mit `std::ref(<Variable>)` verpackt.

⁹⁹Der Destruktor eines angekoppelten, noch laufenden Threads ruft `std::terminate()` auf.

Tabelle 25: Konstruktorparameter für die Sperren `std::lock_guard<Mutex>` (oberhalb Linie) und `std::unique_lock<Mutex>` (alle).

<code>(mutex)</code>	übernehmen und sperren
<code>(mutex, std::adopt_lock)</code>	schon gesperrtes Mutex übernehmen
<code>(mutex, std::defer_lock)</code>	noch nicht sperren
<code>(mutex, std::try_to_lock)</code>	sperren, wenn Mutex frei ist
<code>(timed_mutex, timepoint)</code>	maximal bis zu diesem Zeitpunkt warten
<code>(timed_mutex, duration)</code>	maximal vorgegebene Dauer warten
<code>(unique_lock)</code>	Rechtswert-Referenz (Verschiebesemantik)

C.17.2 Gemeinsam genutzte Ressourcen

Wettrennen (*race conditions*) beim Zugriff auf gemeinsam genutzte Ressourcen führen zu undefiniertem Programmverhalten. Kritische Bereiche werden durch gegenseitigen Ausschluss (*mutual exclusion*) mit `std::mutex`-Variablen vor gleichzeitigem Zugriff durch parallellaufende Threads gesichert. Am Ende des kritischen Bereichs wird die Mutex-Variable wieder freigegeben. Nun kann der nächste Thread diesen Block betreten.

Der Mutex-Typ `std::recursive_mutex` wurde für rekursive Aufrufe entworfen, die Typen `std::timed_mutex` und `std::recursive_timed_mutex` verfügen über Methoden `try_lock_for(duration)` und `try_lock_until(time_point)`, die wie auch `try_lock()` einen Wahrheitswert liefern, ob der Mutex gesperrt werden konnte. Mutex-Methoden kann man selbst aufrufen — es ist aber einfacher, Mutexe über Sperren zu steuern.

Sperren `std::lock_guard<Mutex>` bedienen die Methoden `lock()` und `unlock()` der Mutex-Variable in ihrem Konstruktor bzw. Destruktor¹⁰⁰:

```
#include <mutex>

void ausgabe(std::string s)
{
    static std::mutex mutex;
    std::lock_guard<std::mutex> myLock{mutex};
    std::cout << s << std::endl;
}
```

Die Sperre `std::unique_lock<Mutex>` ist flexibler. Sie bietet größere Freiheiten beim Einrichten (Tab. 25). Die Methoden `lock()`, `unlock()`, `try_lock()` sind zugänglich. Bei eingekapselten `timed_mutex`-Variablen sind die Methoden `try_lock_for(duration)` und `try_lock_until(time_point)` nutzbar. Der Sperrenzustand lässt sich mit `if (myLock)` und `owns_lock()` erfragen. Der Besitz an einem Mutex wird durch `release()` aufgegeben und liefert einen Zeiger auf den Mutex.

¹⁰⁰RAII-Prinzip, so wird die Sperre auch beim Auftreten von Ausnahmen sicher freigegeben.

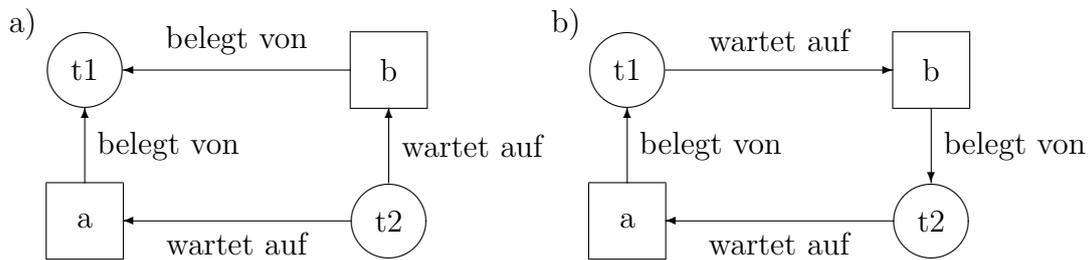


Abbildung 13: Erfolgreiche Ressourcenzuteilung (a) und Verklemmung (b).

Bedingungsvariablen `std::condition_variable`¹⁰¹ können belegte Sperren zeitweilig wieder freigeben, damit andere Threads weiterarbeiten können. Ist die zur Fortführung des Threads notwendige Bedingung erfüllt, kann dieser von einem anderen durch die Methoden `notify_one()` bzw. `notify_all()` wieder erweckt werden, die Sperre wieder erlangen und seine Arbeit fortsetzen:

```
#include <condition_variable>

std::mutex mutex;
std::condition_variable sufficientFunds; // gemeinsam genutzt

void transfer(int from, int to, double amount)
{
    std::unique_lock<std::mutex> myLock{mutex};
    sufficientFunds.wait(myLock, [=]{ return amount <= accounts[from]; });
    accounts[from] -= amount;
    accounts[to] += amount;
    sufficientFunds.notify_all();
}
```

Dabei ist `<Variable>.wait(myLock, <pred>)`; mit einem Prädikat gleichwertig zu

```
while (!pred()) variable.wait(myLock);
```

Für `timed_mutex`-Bedingungen sind auch `wait_for(lock, duration, <pred>_opt)` und `wait_until(lock, time_point, <pred>_opt)` zulässig.

Verklemmungen (*deadlock*) entstehen, wenn mehrere Sperren benötigt werden, die jedoch verschiedenen Threads zugeteilt wurden und durch die zyklische Abhängigkeit keiner der beteiligten Threads fortfahren kann (Abb. 13):

```
Account a, b;
std::thread t1{give, std::ref(a), std::ref(b), 5}; // sperrt a, dann b
std::thread t2{give, std::ref(b), std::ref(a), 5}; // sperrt b, dann a
```

¹⁰¹Die allgemeinere `std::condition_variable_any` arbeitet mit jeder Art von Lock oder Mutex.

Die Funktionen `std::lock(⟨Sperrenliste⟩)` und `std::try_lock(⟨Sperrenliste⟩)`¹⁰² erlangen alle Sperren der Liste unabhängig von der Reihenfolge ohne Verklemmungsrisiko. Mit der Klasse `std::scoped_lock<Mutexes...>` gelingt das noch einfacher:¹⁰³

```
void give(Account& from, Account& to, double money)
{
    // std::unique_lock<std::mutex> fromLock{from.mutex, std::defer_lock};
    // std::unique_lock<std::mutex> toLock {to.mutex, std::defer_lock};
    // std::lock(fromLock, toLock);
    std::scoped_lock lock{from.mutex, to.mutex}; // ab C++17
    from.take(money);
    to.add(money);
}
```

Threadssichere Initialisierung globaler Daten erfolgt mit `const_expr`-Konstruktor. Lokale `static`-Variable werden ebenfalls beim ersten Funktionsaufruf threadsicher initialisiert. Betritt ein zweiter Thread die Funktion vor Abschluss der Initialisierung, wird er bis zu deren Ende blockiert. Als `thread_local` gekennzeichnete lokale Variablen existieren unabhängig voneinander in jedem Thread einmal, auch sie werden beim ersten Aufruf im Thread initialisiert. Mit `std::call_once(⟨once_flag⟩, ⟨Funktork⟩, ⟨Parameter⟩opt)` können Anfangswertbelegungen verzögert werden:

```
Account a, b;
std::once_flag geschenkt;

void erstausstattung(double amount)
{
    a.add(amount);
    b.add(amount);
}

void work()
{
    std::call_once(geschenkt, erstausstattung, 100.0);
    // transfer random amounts of money
    ...
}
```

Die optionalen Funktionsargumente werden wie bei `std::thread` als Werte übergeben, Referenzen sind durch `std::ref(⟨variable⟩)` einzukapseln.

¹⁰²Der Rückgabewert ist -1, falls alle Sperren gesetzt werden konnten, sonst die nullbasierte Nummer der fehlgeschlagenen Sperre.

¹⁰³Damit sind nicht alle Möglichkeiten von Verklemmungen beseitigt. Sie können ebenso eintreten, wenn eine erwartete Bedingung nie eintritt oder der wartende Thread nicht benachrichtigt wird. Eine „Liquiditätsklemme“ im obigen Beispiel ist nur durch Bedingungen an das Gesamtsystem vermeidbar.

C.17.3 Verzögerte Auswertung

Verzögerte Resultate `std::future<Ergebnistyp>` vereinfachen das Anweisen aufwendiger Berechnungen in einem nebenläufigen Prozess:

```
#include <future>

int frage() { return 42; }
void ansage() { std::cout << "Die Antwort ist ... "; }

void liefern_auf_bestellung()
{
    std::future<int> antwort = std::async(frage);
    ansage();
    std::cout << antwort.get() << '\n';
}
```

Der Aufruf `std::async(<Funktork>, <Parameter>_opt)`¹⁰⁴ startet einen Ablaufaden für die Berechnung eines Wertes. Beim Abruf des Ergebnisses blockiert der Aufrufer, falls die Berechnung noch andauert.

Die Methode `valid()` erfragt, ob das Ergebnis schon vorliegt. Der Wert kann einmalig gelesen werden¹⁰⁵, danach liefert `valid()` wieder `false`, `wait()` blockiert bis zur Fertigstellung der Berechnung, `wait_for(duration)` und `wait_until(time_point)` liefern als Ergebnis einen der Werte `ready`, `deferred` oder `timeout` aus `std::future_status`.

Aufträge `std::packaged_task<Funktortyp>` verpacken eine Funktion, die durch den Klammeroperator mit geeigneten Parametern gestartet wird und liefern das Ergebnis oder die geworfene Ausnahme über ein `std::future<Ergebnistyp>`. Ein Auftrag kann einem Thread übertragen werden.¹⁰⁶

```
int frage(int n) { return 6*n; }

void schick_mir_eine_antwort()
{
    std::packaged_task<int(int)> auftrag{frage};
    std::future<int> antwort = auftrag.get_future();
    std::thread t{std::move(auftrag), 7}; // startet: auftrag(7)
    t.detach();
    std::cout << antwort.get() << '\n';
}
```

¹⁰⁴Bei einer Variante dieses Aufrufs kann als Startverhalten vor dem Funktor `std::launch::async` oder `std::launch::deferred` festgelegt werden. Ohne diese Angabe ist die Entscheidung über das Startverhalten der Implementierung überlassen.

¹⁰⁵`std::shared_future<T>` erlaubt das mehrmaligen `get()`-Zugriff. Die Methode `share()` erzeugt ein solches Objekt und transferiert das Ergebnis zu diesem.

¹⁰⁶Bei g++ 4.6 kann dies durch einen Implementierungsfehler der Bibliothek nicht übersetzt werden.

Versprechen `std::promise<Ergebnistyp>` dienen mitunter verdeckt als Ablagen für noch zu berechnende Ergebnisse. Im Verbund mit `std::future<Ergebnistyp>` bilden sie einen Kommunikationskanal zwischen nebenläufigen Prozessen. Der Zugriff auf das künftigen Resultat blockiert, solange kein Wert oder eine Ausnahme hinterlegt wurde:

```
void ansage(std::promise<int>& p)
{
    try
    {
        std::cout << "Die Antwort ist ... ";
        p.set_value(42);
    } catch(...) { p.set_exception(std::current_exception()); }
}
```

```
void zur_ablage()
{
    std::promise<int> briefkasten;
    std::future<int> antwort = briefkasten.get_future();
    std::thread t(&ansage, std::ref(briefkasten));
    std::cout << antwort.get() << '\n';
    t.join();
}
```

C.17.4 Sperrenfreie Kommunikation

`std::atomic<T>` erlauben sicheren sperrenfreien Datenaustausch zwischen Threads:

```
#include <atomic>

int countdown(std::atomic<int>& jobs)
{
    int done = 0, nr;
    while ((nr = int(--jobs)) >= 0) ++done;
    return done;
}

void gemeinsam_gehts_besser()
{
    std::atomic<int> jobs{1000000};
    auto mode = std::launch::async;
    auto cnt1 = std::async(mode, countdown, std::ref(jobs));
    auto cnt2 = std::async(mode, countdown, std::ref(jobs));
    int a = cnt1.get(), b = cnt2.get();
    std::cout << a << " + " << b << " = " << a+b << '\n';
}
```

C.18 Dateisystem

Für die Bibliothek wird ein eigener Namensraum genutzt.¹⁰⁷

```
#if __has_include(<filesystem>)
    #include <filesystem>
    namespace fs = std::filesystem;
#elif __has_include(<experimental/filesystem>)
    #include <experimental/filesystem>
    namespace fs = std::experimental::filesystem;
    // g++ : link with -lstdc++fs
#elif __has_include(<boost/filesystem.hpp>)
    #include <boost/filesystem.hpp>
    namespace fs = boost::filesystem;
    // g++ link with -lboost_system -lboost_filesystem
#else
    #error No filesystem library.
#endif
```

C.18.1 Pfade

```

Wurzelverzeichnis
v                Dateiname
E:/temp/a/simple/example.txt
/ ~~~~~ ----- ~~~
LW Relativpfad  Stamm Erweiterung
```

Dateipfade `fs::path` beschreiben den Weg zu einer *Datei* im Dateisystem absolut zur Wurzel oder relativ zu `fs::current_path()`. Pfade bestehen aus einem optionalen `p.root_name()`¹⁰⁸, optionalem `p.root_directory()` und weiteren Teilen, die bis auf den letzten Namen von Verzeichnissen sein müssen. *Verzeichnisse* sind ebenfalls Dateien, auch `.` und `..` (aktuelles/übergeordnetes Verzeichnis). Dateinamen `p.filename()` bestehen oft aus zwei durch Punkt getrennten Teilen, `p.stem()` und `p.extension()`. Über die Bestandteile eines Pfades kann iteriert werden, sie werden als *quoted strings* ausgegeben:

```
for (auto const& e : fs::path("E:/temp/a/simple/example.txt"))
    std::cout << e << ' ';
// "E:" "/" "temp" "a" "simple" "example.txt"
```

`fs::exists(p)` prüft, ob ein Pfad einer Datei im Dateisystem entspricht.

Der Quellcode auf der Folgeseite liefert eine Ausgabe ähnlich dem UNIX-Befehl `ls`. Die Funktionen und Methoden werfen im Fehlerfall eine `fs::filesystem_error`-Ausnahme. Zu vielen gibt es Varianten mit einem zusätzlichen `std::error_code`-Parameter, der keine Ausnahme wirft.

¹⁰⁷Vor der Integration in C++17 wurde zunächst Filesystem TS im Namensraum `std::experimental` veröffentlicht, notfalls kann diese Version oder Boost.Filesystem genutzt werden.

¹⁰⁸Unter Windows ein Laufwerk `C:` oder `//server`. Pfadtrenner `fs::path::preferred_separator` sind je nach Betriebssystem `/` oder `\`. Im Quelltext ist `/` einfacher zu schreiben.

Berechtigungen regeln den Zugriff für Eigentümer und andere Nutzer.¹⁰⁹

```
auto perm_string(fs::perms p)
{
    auto table = { std::pair{ fs::perms::owner_read, "-r" },
                  { fs::perms::owner_write, "-w" },
                  { fs::perms::owner_exec, "-x" },
                  { fs::perms::group_read, "-r" },
                  { fs::perms::group_write, "-w" },
                  { fs::perms::group_exec, "-x" },
                  { fs::perms::others_read, "-r" },
                  { fs::perms::others_write, "-w" },
                  { fs::perms::others_exec, "-x" } };
    auto ch = [p](auto f, auto s[]){ return s[(p&f) != fs::perms::none]; };
    std::string result;
    for (auto&& [flag, str] : table) result += ch(flag, str);
    return result;
}
```

Dateieigenschaften (Tab. 26) können abgefragt werden:

```
auto getfiletime(fs::path path)
{
    auto ftime = fs::last_write_time(path);
#ifdef __MINGW32__ // workaround bis C++20 ?
    auto tp_now = decltype(ftime)::clock::now();
    auto sys_now = std::chrono::system_clock::now();
    auto systime = sys_now + (ftime - tp_now);
    auto time = std::chrono::system_clock::to_time_t(systime);
#else // Annahme: file_clock = system_clock, nicht für MSVC ...
    auto time = decltype(ftime)::clock::to_time_t(ftime);
#endif
    std::string s(std::asctime(std::localtime(&time)));
    return s.substr(0, s.size()-1); // ohne '\n';
}

void show(fs::path path)
{
    std::cout << (fs::is_directory(path)? "d" : " ")
              << perm_string(status(path).permissions())
              << " " << getfiletime(path)
              << " " << (fs::is_regular_file(path)? fs::file_size(path) : 0)
              << " " << path << '\n';
}
```

¹⁰⁹ Außerdem: all set_uid set_gid sticky_bit mask unknown (POSIX-Standard IEEE 1003-2017).

Tabelle 26: Eigenschaften für Dateipfad `p` abfragen (Auswahl).

<code>exists(p)</code>	Eintrag vorhanden
<code>file_size(p)</code>	Dateigröße
<code>is_directory(p)</code>	Verzeichnis?
<code>is_empty(p)</code>	leer?
<code>is_regular_file(p)</code>	reguläre Datei?
<code>last_write_time(p)</code>	wann zuletzt geschrieben?
<code>permissions(p)</code>	Dateiberechtigungen
<code>space(p)</code>	freier Speicherplatz im Dateisystem

Iteratoren durchlaufen ein Verzeichnis (mit Unterverzeichnissen):

```
void ls(fs::path p)
{
    for (auto&& entry : fs::directory_iterator(p)) show(entry);
} // oder fs::recursive_directory_iterator
```

C.18.2 Arbeit mit Verzeichnissen und Dateien

Anlegen, kopieren, umbenennen, löschen:

```
void create()
{
    fs::create_directories("sandbox/a/b");
    fs::create_directories("sandbox/c");
    std::ofstream("sandbox/file1.txt") << "Hello";
    std::ofstream("sandbox/a/file2.txt") << "World";
}

void copy()
{
    fs::rename("sandbox/a/file2.txt", "sandbox/a/file3.txt");
    fs::copy("sandbox/a/file3.txt", "sandbox/c/file3.txt");
    fs::copy("sandbox/a", "sandbox/copy",
            fs::copy_options::recursive |
            fs::copy_options::directories_only);
}

void destroy()
{
    fs::remove("sandbox/file1.txt");
    auto n = fs::remove_all("sandbox");
    std::cout << n << "files/directories deleted\n";
}
```

C++ ist das C, das wir machen wollten, jedoch nicht konnten.
 – Larry Rosler, ANSI C-Komitee

D Dunkle Ecken

D.1 Sprachbarrieren

D.1.1 Plattformabhängigkeiten

Portabilität ist die Eigenschaft, das Programm (als Quelltext) auf eine andere Maschine oder ein anderes Betriebssystem übertragen, übersetzen und ausführen zu können. Portable Programme dürfen keine plattformspezifischen Eigenschaften nutzen. Vereinigungen und Bitfelder vertrauen auf Byte-Reihenfolge (*little/big endian*) und das Ausrichten an Adressen (*byte/word alignment*). Maschinenbefehle und Assembler-Anweisungen (**asm**) sind prozessorabhängig (Registernamen, Befehlssatz). Die Auswertereihenfolge von Ausdrücken ist außer bei `?: && ||`, nicht festgelegt. Compiler können solche Ausdrücke unterschiedlich umsetzen:

```
int i = f() + g(); // erst f(), dann g()?
a[i] = i++;
```

Haben die Funktionen `f()` und `g()` Seiteneffekte, sind Überraschungen beim Plattformwechsel vorprogrammiert. Ausdrücke mit undefiniertem Verhalten, die ja auch für den menschlichen Leser zweideutig sind, sind durch unzweideutige zu ersetzen:

```
int i= f(); i += g(); // Reihenfolge erzwingen!
a[i] = i; i++;
```

Nicht-Standard-Bibliotheken sind nur für bestimmte Plattformen verfügbar. Einige Compilerhersteller packen zusätzliche Funktionen oder Implementierungsdetails in Standardheader, die dort nicht hingehören. Funktionen können Maschineneigenschaften ausnutzen, ohne darauf hinzuweisen. Das kann Portierungen ernsthaft behindern.

D.1.2 C++ und C

C und C++ sind quellcodeportabel, aber nicht als Bytecode (Objektdatei). Übersetzte Module (Objektdateien) können miteinander verbunden werden. Dies funktioniert jedoch nicht bei verschiedenen Compiler-Herstellern (sofern diese nicht das gleiche Objektformat vereinbart haben), nicht einmal bei verschiedenen Versionen desselben Compilers (Watcom C 9.0/11.0), und natürlich nicht über Plattformgrenzen hinweg (Windows/Linux), selbst wenn vom selben Hersteller.

C-Programme sind mit C++-Compilern übersetzbar, sofern sie keine Eigenschaften von C++ wie Schlüsselwörter nutzen. Strukturnamen sind keine Typen in C — es muss stets `struct name` geschrieben werden. Insofern ist C++ eine Obermenge von C.

Die Bibliotheken von C sind auch mit C++-Compilern nutzbar. Es gibt jedoch C-Quellen, die nicht in C++ übersetzen. Typumwandlungen zwischen Ganzzahlen und Zeigern erfordern in C++ die explizite Typumwandlung (`typedef`). Ausnahme bilden Zuweisung und Test auf 0 (`NULL`).

Tabelle 27: Compilergenerierte spezielle Methoden ab C++11.

Nutzer definiert →	Konstr.	Destr.	Kopie	Zuw.	Verschiebe- konstruktor	Verschiebe- zuweisung
Compiler erzeugt						
Standardkonstruktor	–	✓	–	✓	–	✓
Destruktor	✓	☐	✓!	✓!	✓	✓
Kopierkonstruktor	✓	✓!	☐	✓!	×	×
Zuweisungsoperator	✓	✓!	✓!	☐	×	×
Verschiebekonstruktor	✓	–	–	–	☐	–
Verschiebezuweisung	✓	–	–	–	–	☐

Legende: ✓ = default, × = delete, – = nicht deklariert, ! = Rule of Three beachten.

D.1.3 Übersetzungseinheiten aus C und anderen Sprachen

In C++ aufzurufende C-Funktionen oder C++-Funktionen, die in C-Modulen benutzt werden, sollten mit der Bindung

```
extern "C" int f();
```

deklariert werden. Überladene Funktionen können die "C"-Bindung nicht erhalten, über die Modulgrenze hinweg können keine Ausnahmen geworfen werden. Ähnliches gilt für übersetzte Programmteile in Assembler, Fortran und anderen Sprachen:

```
extern "FORTRAN" f(); // IBM C++
```

Die Details sind der Begleitdokumentation des Compilers bzw. Linkers zu entnehmen. Bei Funktionen mit "C++"-Bindung werden compilerabhängig Parametertyp-Informationen an den Namen angehängen (*name mangling*), die das Linken mit C-Modulen erschweren.

D.1.4 C++ von 1998 nach 2011 und später

Compilern kann beim Übersetzen eine bestimmte Sprachversion vorgeschrieben werden (z.B. Option `-std=c++17` oder `-std=c++20`). Der Implementierungsstand aktueller Compiler ist auf http://en.cppreference.com/w/cpp/compiler_support einzusehen.

Verschiebesemantik erlaubt ab C++11 die Unterscheidung zwischen Referenzen auf länger lebende (*lvalue X&*) und demnächst abzubauenen Objekte (*rvalue X&&*). Verschiebekonstruktor und -zuweisung können aus *rvalue-Referenzen* Ressourcen ohne Kopieraufwand übernehmen, z.B. durch die Austausch von Zeigern. Die Regeln für die speziellen Methoden einer Klasse X werden damit etwas komplexer (Tab. 27).

De gustibus non disputandum.
– Römisches Sprichwort

D.2 Geschmacksfragen

D.2.1 Stil

Es gibt eine Menge wohlbegründeter Regeln, wie ein Quelltext aussehen sollte. Oberstes Kriterium sind Lesbarkeit und Verständlichkeit; was lesbar ist, kann sich von Programmierer zu Programmierer unterscheiden. Der Einsatz von Sprachmitteln liegt ebenso wie die Formatierung im Entscheidungsbereich des Programmierers.¹¹⁰

Eine Jahrzehnte dauernde Kontroverse über die Programmiersprachen hinweg betraf die Verwendung von `goto`. Seit der Möglichkeit der Ausnahmebehandlung gibt es noch ein Argument mehr dagegen, dennoch wurde `goto` nicht endgültig verbannt. Ein eigener Stil entwickelt sich durch Aneignen beim Lesen guter Quellen und durch Schreiben.

D.2.2 Empfehlungen

Namen so kurz wie in `x = f(n)`; sind kein Zeichen von Faulheit, solange ihr Einsatz örtlich begrenzt erfolgt. Beim Programmieren wie bei anderen schöpferischen Schreibarbeiten tritt ein Informationsstau ein, der durch Kurzschrift bekämpft wird. Längere Namen haben einen größeren Gültigkeitsbereich.

Beschreibende Namen `int* reference_counter` sind besser verständlich. Die Zugehörigkeit zu einer Bibliothek wird in C oft durch Präfixe wie in `wxDraw(...)` angezeigt; modernes C++ sollte hierfür Namensbereiche nutzen. *Typcodierende Präfixe* `int* ipReferenceCounter`; verschlüsseln den Typ nochmals im Namensanfang.¹¹¹

Attributnamen in Klassen können besonderen Konventionen folgen: Unterstriche unterstreichen die Rolle als Implementierungsdetails, Präfixe die Zugehörigkeit zur Klasse:

```
struct Vec { double _x, _y, _z; };
struct Person { string its_name; };
```

Lange Namen können mit Unterstrich `a_very_long_name` durchgekoppelt (C-Stil) oder durch Großschreibung `aVeryLongName` unterteilt (Smalltalk-Konvention, *camel casing*) werden.¹¹² Funktions- und Variablenamen werden traditionell klein geschrieben, Makrokonstanten groß. Eigene Typen können einen großen Anfangsbuchstaben haben.

```
int maximum = RAND_MAX;
struct Vec { int x, y, z; };
```

¹¹⁰ Allerdings enden solche Empfehlungen erfahrungsgemäß in Kriegen wie bei Gullivers Reise zu den Liliputanern. Programmierer in Teamarbeit unterliegen ohnehin einem Gruppenzwang. Mit dem Werkzeug `clangformat` sind persönliche Vorlieben einstell- und auf Quelldateien anwendbar.

¹¹¹ Die sogenannte *ungarische Notation* wurde vom Microsoft-Programmierer Charles Simonyi für Assembler popularisiert. In objektorientierten Sprachen hat sie nichts verloren.

¹¹² Die Schreibung in jeweils aktuellen Programmiersprachen beeinflusst die Schrift-Mode: In den 80er Jahren MicroSoft, heute eher `intelligent.men@hard.work` in Anlehnung an OOP und Webdomänen.

D.3 Vorverarbeitung

Quelltextzeilen, die das Doppelkreuz # als erstes (Nicht-whitespace-) Zeichen enthalten, gelten als *Präprozessoranweisungen*. Mit dem Backslash \ am Zeilenende lassen sich diese auch auf Folgezeilen ausdehnen.

Die Vorverarbeitung umfasst das Entfernen von Kommentaren und überflüssigen Leerzeichen, den Textersatz (das Abarbeiten von *Makros*), das Einbinden von anderen Quelltexten, Entscheidungen zur bedingten Übersetzung von Quellteilen und das Einfügen des aktuellen Quelldateinamens und der aktuellen Quelltextzeile (für Fehlermeldungen des Compilers). Erst deren Ergebnis¹¹³ wird dem Compiler zur Übersetzung vorgelegt.

D.3.1 Makrokonstanten und -funktionen

Durch #define-Anweisungen werden Präprozessorkonstanten und -funktionen (*Makros*) definiert. Deren Namen¹¹⁴ werden nur dem Präprozessor bekannt.

Makrokonstanten werden mit der Zeichenfolge bis zum Zeilenende verbunden:

```
#define DWORD unsigned long
#define SQR(x) ((x)*(x))
```

Makrofunktionen haben mindestens einen Parameter. Sobald ein definierter Makroname im Quelltext (außerhalb von Zeichenketten) verwendet wird, wird dieser durch den Text des Makros ersetzt. Für die Parameter kann beim Aufruf beliebiger Text stehen. Dieser Text wird sooft kopiert, wie der Parametername in der Makrodefinition erscheint.

```
int i = SQR(123);
```

wird zu

```
int i = ((123)*(123));
```

Makrodefinitionen lassen sich mit #undef rückgängig machen:

```
#undef SQR(x)
```

Der Präprozessor kann weder C noch C++. Deshalb sollten Makrorümpfe mit Operatoren und Parameter geklammert werden, mehrfach verwendete Makroargumente keine Seiteneffekte erzeugen. Inkrement, Dekrement, zählende Funktionen u. ä. sind dort zu meiden. Hier einige abschreckende Beispiele:

```
#define succ(x) x+1
#define sqr(x) x*x
int j = sqr(succ(2)); // 2+1*2+1; => 5 statt 9
int k = 2, n = sqr(k++); // k++*k++; => n=4,6 oder 9; k=4!
```

¹¹³Manche Systeme speichern unter bestimmten Bedingungen *.i-Zwischendateien (i wie *input*).

¹¹⁴Makronamen werden meist großgeschrieben. Viele vordefinierte beginnen mit Unterstrichen.

D.3.2 Bedingte Übersetzung

Durch Einfügen von `#if`-Anweisungen lässt sich steuern, welche folgenden Quelltextzeilen zum Programm gehören sollen. Hinter `#if` kann ein beliebiger konstanter Ausdruck stehen, der auch (vorher definierte) Makrokonstanten enthalten kann:

```
#if defined(__cplusplus)
    /* C++ - Definitionen */
#elif defined(__STDC__)
    /* ANSI C Definitionen */
#else
    #error Sprache nicht unterstuetzt
#endif
```

Die entstehende `#if-#else`-Leiter muss immer mit `#endif` abgeschlossen werden. `#elif`-Zweige und `#else`-Zweig sind optional. Zur Abfrage der Makrodefinitionen existieren die Abkürzungen

```
#ifdef MAKRO          /* #if defined(MAKRO) */
#ifndef MAKRO          /* #if !defined(MAKRO) */
```

D.3.3 Einlesen von Dateien

In Quelltexte können weitere Teildateien eingebunden werden. Große Quellen lassen sich so in aufeinanderfolgende Teile gliedern bzw. ein Teil in mehrere Quelltexte einbauen:

```
#include <datei2>
#include "datei1"
```

Enthält der Dateiname der Teildatei nicht den vollständigen Pfad, beginnt die Suche im aktuellen Verzeichnis und wird bei Misserfolg im Standard-Include-Verzeichnis des Compilers fortgesetzt. Bei Angabe des Dateinamens in spitzen Klammern wird nur im Include-Verzeichnis gesucht.

In mehreren Quelltexten genutzte Funktionsnamen, Makros, oder globale (externe) Variablen werden in Deklarationsdateien (Header) zusammengefasst. Zum Schutz gegen mehrfaches Einbinden (one definition rule) haben die Header meist einen Rahmen, der *bedingte Übersetzung* erzwingt:

```
#ifndef MYHEADER_H
#define MYHEADER_H
// Inhalt hier
#endif
```

Nicht standardisiert, aber von den Compilern unterstützt wird auch

```
#pragma once
// ...
```

D.3.4 Zeichenkettenmanipulation

Umwandeln von Parametern in Zeichenketten wird durch ein Doppelkreuz unmittelbar vor dem Makroparameter in der Definition erreicht. Dies ist u. a. nützlich zur Fehlersuche:

```
#include <iostream> // nur in C++ verwendbar, aber typsicher
#define TRACELN(x) std::cout << #x << " = " << (x) << '\n'

TRACELN(1+2*3-4%5); // erzeugt Ausgabe: 1+2*3-4%5 = 3
```

Doppelte Doppelkreuze im Makro ziehen die beiden Argumente zu einem Namen zusammen, der dann vom Präprozessor und vom Compiler als Einheit (ein Token) behandelt wird:¹¹⁵

```
#define DECLARE(a,b) a##b
DECLARE(STACK,int) a; // wird STACKint a;
```

D.3.5 Vordefinierte Makros

Mit (mehreren) Unterstrichen versehene Makros sind schon vordefiniert. Informationen über die übersetzte Datei liefern die Bezeichner:

```
__DATE__ __TIME__ __FILE__ __LINE__ // Datei-Informationen
__func__ // Funktionsname lokal
__CDECL__ __PASCAL__ // Linker-Optionen
__STDC__ __cplusplus // ANSI C, C++ (Version)
```

Das Betriebssystem bzw. der Compiler fügen (implementationsspezifisch) weitere hinzu:

```
__WIN32__ _MSC_VER
__GNUG__ MINGW32
```

Manche Makros lassen sich durch Präprozessoranweisungen beeinflussen:

```
#line 110 "hier.txt"
```

gaukelt dem Compiler vor, in Zeile 110 der Datei `hier.txt` zu sein. Der Dateiname ist optional.

```
#pragma ....
```

enthalten implementationsspezifische Anweisungen an den Compiler.

```
#error Das ist ein Fehler
```

stoppt die Übersetzung mit dem angegebenen Fehlertext.

¹¹⁵In frühen C++-Versionen wurde diese Technik als Ersatz für Klassen-Templates genutzt.

D.4 Zeiger

Jede Speicherzelle des Rechners, in der Daten (Konstanten und Variablen) abgelegt werden, hat eine bestimmte Nummer (*Adresse*). Diese Adresse kann in einer Variable abgelegt werden und als *Zeiger* dienen, um *indirekt* auf Daten zuzugreifen, etwa um

- durch Datenfelder zu laufen (geht mit Zeigern schneller als über Indizes),
- den Platzbedarf für Daten im Freispeicher dynamisch anzupassen,
- den Rechnerspeicher direkt zu manipulieren (Vorsicht!).

D.4.1 Deklaration und Initialisierung

Die Deklaration $\langle \text{Typ} \rangle * \langle \text{Zeiger} \rangle$; ist auf zweierlei Weise lesbar:

1. $\langle \text{Zeiger} \rangle$ enthält die Adresse einer $\langle \text{Typ} \rangle$ -Variable (ist ein Zeiger auf diese).
2. Der Ausdruck $* \langle \text{Zeiger} \rangle$ besitzt den $\langle \text{Typ} \rangle$ (sozusagen als „Muster“).

Bei der Benutzung müssen Zeiger gültige Adressen enthalten (z. B. über den Adressoperator $\&$). Die Initialisierung kann auch schon bei der Definition erfolgen. Zeiger ohne gültige Adresse sollten den speziellen Wert `nullptr` erhalten:

```
int i;
int *ip;      // Ausdruck *ip ist vom Typ int
ip = &i;     // Zeiger ip bekommt Adresse, zeigt auf i

// oder:
int *ip = &i; // sofortige Initialisierung des Zeigers ip
*ip = 7;     // Ergebnis: i=7

ip = nullptr; // ip zeigt jetzt nirgendwohin
```

D.4.2 Fehlerquellen (wild pointer)

Weil Zeiger solche Alpträume verursachen, ist es besser, niemals einen zu erzeugen.
– Herbert Schildt: C — The Complete Reference, Addison-Wesley

Zeiger bergen die Gefahr fataler Programmierfehler in sich, die schwer zu finden sind. Sie können Programmabstürze verursachen, unkontrolliert Daten verfälschen, oder zunächst nicht einmal bemerkt werden.

1. Nicht initialisierte, „wilde“ Zeiger enthalten Müll! Das Schreiben auf unkontrollierte Adressen gleicht russischem Roulette:

```
int x = 10;
int *p;
*p = x; // Schreiben an nicht festgelegte Adresse
```

- Bei einer möglichen Verwechslung eines Zeigers mit einer Ganzzahl erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung, deren Auflösung tiefes Nachdenken erfordert:

```
int x = 10;
int *p;
p = x; // Typ unvereinbar: p = &x oder *p = x?
```

- Adressen lokaler Variablen sind nach Verlassen der Funktion ungültig. Das ergibt „baumelnde Zeiger“:

```
int *p;
void f()
{
    int x = 10;
    p = &x;
} // Variable x wird hier freigegeben, Adresse ungueltig
```

D.4.3 Zeigerarithmetik

Zeiger und Feldnamen sind eng verwandt. Feldnamen können als die Adresse des Anfangselementes aufgefaßt werden.¹¹⁶ Als konstante Zeiger auf das Anfangselement können sie nicht versetzt werden. Die Anweisung `a = &p[1]`; wäre ein Fehler. Zeiger können benutzt werden, um indirekt auf die Feldelemente zuzugreifen:

```
int a[10];
int *p = &a[0]; // p = a;
p[1] = 10;      // Zuweisung an a[1], weil p == a
```

Addition und Subtraktion ganzzahliger Werte zu Zeigern liefern wieder Zeiger (vom selben Typ). `p+i` zeigt auf das *i*-te Element nach *p*. Der Ausdruck `p[i]` ist äquivalent zu `*(p+i)`. Inkrement- und Dekrementoperatoren verschieben Zeiger ein Feldelement vor bzw. zurück. Alle Zeigeroperationen berücksichtigen automatisch die Größe der Objekte, auf die gezeigt wird. Für `void*` ist deshalb keine Zeigerarithmetik durchführbar.

```
p += i; // p geht i Elemente weiter
p++;   // Zeiger zum folgenden Element
--p;   // Zeiger auf das Element davor
```

Differenzen und Vergleiche zweier Zeiger sind nur sinnvoll, wenn beide Zeiger auf Elemente desselben Speicherbereiches (Feldes) zeigen. Vergleiche zweier Zeiger liefern Wahrheitswerte. So ist `p < q` wahr, wenn *p* auf ein früheres Element als *q* zeigt (`p+i = q` mit `i > 0` gilt). Die Differenz zweier Zeiger liefert einen ganzzahligen Wert `i = q-p` entsprechend `q = p+i`:

¹¹⁶Solange die Definition sichtbar ist. enthalten sie auch noch die Größeninformation (*pointer decay*).

```
int strlen(char const p[])
{
    char const *q = p;
    while (*q) q++;
    return q - p;
}
```

Felder mit frei wählbaren Grenzen sind damit trotz C-Index-Konvention möglich. Eine Prüfung der Feldgrenzen erfolgt dennoch nicht.

```
int const lo = -12;
int const hi = 10;
int zerobase[hi-lo+1];
int *const a = zerobase-lo; // a ist konstanter Zeiger auf int

a[-12] = 3; // Feldelemente a[lo]..a[hi] verwendbar
a[10] = 5;
```

D.4.4 Besondere Zeiger

Zeiger auf Strukturen erlauben den Zugriff auf Komponenten über $(*\langle\text{Zeiger}\rangle).\langle\text{Komponente}\rangle$ oder $\langle\text{Zeiger}\rangle-\>\langle\text{Komponente}\rangle$.

Zeigerfelder statt mehrdimensionaler Felder können Speicherplatz einsparen:¹¹⁷

```
char t1[][11]= {"Sonntag", "Montag", "Dienstag", "Mittwoch",
               "Donnerstag", "Freitag", "Sonnabend"};
char *t2[] = {"Sonntag", "Montag", "Dienstag", "Mittwoch",
              "Donnerstag", "Freitag", "Sonnabend"};
```

Zeiger auf Funktionen erhalten den Namen (die Adresse) einer definierten Funktion zugewiesen. Ergebnis- und Argumenttypen sollten übereinstimmen:

►C.5

```
#include <cmath> // definiert sin(), cos(), tan() etc.

typedef double (*funktion)(double); // Zeiger auf eine Funktion
funktion f[] = { std::sin, std::cos, std::tan };
                // Feld von Funktionszeigern

double auswahl_funktion(int num, double x)
{
    if (num < 0 || num > 2) return 0;
    return f[num](x);           // sin(x), cos(x) oder tan(x)
}
```

¹¹⁷Das zweidimensionale Feld `t1` reserviert 77 Zeichen, `t2` nur ein Feld für 7 Zeiger, dennoch ist `t1[6][5]` und `t2[6][5]` jeweils das `b` in `Sonnabend`.

D.4.5 Freispeicherverwaltung hinter den Kulissen

Die Operatoren `new` und `delete` erschaffen und vernichten dynamisch Instanzen eines vorgegebenen Typs im Freispeicher.

```
<Zeiger> = new <Typ>(<Parameter>)_opt;
```

liefert einen Zeiger, über den auf die Instanz zugegriffen wird. Geeignete `<Parameter>` initialisieren die Instanz. Fehlen diese, wird der Standardkonstruktor aufgerufen. Grunddatentypen ohne Initialisierer enthalten undefinierte Werte.¹¹⁸ Jede dynamische Instanz muss mit

```
delete <Zeiger>;
```

irgendwann wieder abgebaut werden, um „geborgten“ Speicher zurückzugeben.

```
int *ip = new int(9);
std::cout << *ip << '\n'; // Ausgabe: 9
delete ip;
```

Dynamische Felder mit `<Anzahl>` Elementen werden durch

```
<Zeiger> = new <Typ>[<Anzahl>];
delete [] <Zeiger>;
```

mit dem Standardkonstruktor angelegt bzw. vernichtet.

```
int *ip = new int[9];
// Feld mit den Elementen ip[0] ... ip[8]
delete [] ip;
```

Mit `new[]` erzeugte Felder sind immer mit `delete[]` zu löschen, mit `new` erzeugte einzelne Instanzen immer mit `delete`. Vertauschungen bringen den Freispeicher durcheinander und führen zu Fehlfunktionen des Programms oder Systems.

Speicherknappheit führt zum Scheitern von Anforderungen:

```
T *q = new T[1000000]; // wirft bad_alloc-Ausnahme
T *p = new(std::nothrow) T[1000000]; // liefert 0
```

Die Ausnahme muss irgendwo gefangen werden, ist beim Schreiben von Bibliotheken aber bequemer, da der folgende Quelltext von gültigen Zeigern ausgehen kann. Bei der `nothrow`-Variante muss vor der Nutzung immer erst auf Gültigkeit `p!=0` geprüft werden.¹¹⁹

¹¹⁸Eingebaute Typen werden in C++ geringfügig schlechter unterstützt, da sie wegen der Forderung nach Effizienz und Kompatibilität zu C keinen Standardkonstruktor besitzen.

¹¹⁹Das Verhalten des `new`-Operators ist änderbar. Ist kein Speicher verfügbar, wird eine Funktion `void newhandler()` aufgerufen, die entweder weiteren Speicher bereitstellt und dann zu `new` zurückkehrt, eine `bad_alloc`-Ausnahme wirft bzw. `exit()` aufruft. Eigene Newhandler können mit `set_new_handler(myhandler)` installiert werden. Der bisherige Handler wird zurückgeliefert und kann aufbewahrt werden, um das vorherige Verhalten wiederherzustellen.

Platzierungssyntax ermöglicht, eine eigene Speicherverwaltung aufzubauen. Eine Instanz kann an einem vorgegebenen Speicherplatz erstellt werden.

```
void sie_werden_platziert()
{
    char buffer[sizeof(T)];
    T* p = new(buffer) T(startwert); // Konstruktoraufruf
    // ... *p verwenden
    p->~T(); // Destruktoraufruf, nicht delete!
}
```

Fehler mit dynamischen Zeigern sind aufgrund ihrer verheerenden Wirkungen gefürchtet und leider auch schwer zu erkennen:¹²⁰

1. Speicherleichen sind nicht mehr erreichbar und können auch nicht mehr vernichtet werden (Ressourcenleck).
2. Durch Löschen des einen Zeigers werden weitere Zeiger auf dieselbe Instanz ungültig (baumelnde Zeiger).
3. Wildes Schreiben in anderweitig genutzten Speicher kann weitere Daten durcheinanderbringen (undefiniertes Verhalten).
4. Schreiben in Speicher, der dem Programm nicht mehr gehört, führt zu undefiniertem Verhalten, bestenfalls Absturz („Schutzverletzung“ oder „segmentation fault“).
5. Doppelte Freigaben korrumpieren die Speicherverwaltung und können im Systemabsturz enden.

```
void zeigerkatastrophe(T x)
{
    T *p = new T;
    T *q = new T;

    p = q; // Fehler 1: altes *p ist Speicherleiche
    delete q; // Fehler 2: p zeigt auf gekilltes Objekt
    *p = x; // Fehler 3: wildes Schreiben in Freispeicher
    delete p; // Fehler 4: doppelte Freigabe, Absturz ?
}
```

Vor allem die nicht-lokale Wirkung von Zeigerfehlern gestaltet die Fehlersuche schwierig: Die Ursache kann irgendwo im Programm liegen. *Post-mortem-Analyse* erfordert tiefgründige Kenntnisse und viel Zeit zum Debuggen. Überwachungswerkzeuge wie *Valgrind* können helfen, solche Fehler aufzuspüren.

¹²⁰Niemand erzeugt solche Fehler mutwillig. Doch schon die vergessene Neudefinition von Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator von Klassen mit dynamischen Zeigern führt zu diesem Verhalten.

D.5 Bitfelder und Vereinigungen

Knapper Speicherplatz oder die Ansteuerung von Geräteschnittstellen erfordern, kleine Informationseinheiten in ein Maschinenwort zu packen. Hinter jeder Komponente wird die Anzahl der zu reservierenden Bits angegeben. Die *Bitfeldkomponenten* verhalten sich wie kleine ganze Zahlen mit oder ohne Vorzeichen. Für Zwischenräume können unbekannte Bitfelder `unsigned :⟨Breite⟩`; eingeschoben werden. Fast alles an Bitfeldern ist implementierungsabhängig. Bitfeldkomponenten haben keine Speicheradresse und können keine Felder bilden.

```
struct farbe
{
    unsigned vg:4;           // Vordergrundfarbe 0..15
    unsigned hg:3;         // Hintergrundfarbe 0..7
    unsigned bl:1;         // Blinkbit      0..1
};
```

Bei *Vereinigungen* wird der Speicherbereich mehrerer Komponenten überlagert. Je nach Datentyp der Komponenten werden die gleichen Bits unterschiedlich interpretiert. Die Größe der Vereinigung (`union`) entspricht dem größten enthaltenen Typ.¹²¹ Typen mit nichttrivialen Konstruktoren bzw. Destruktoren gehören nicht in eine `union`: ab C++17 gibt es dafür `std::variant<Typelist...>`. Die Nutzung einer `union` zur Typkonversion ist gefährlich, weil nicht portabel: ►C.12.4

```
union
{
    unsigned char color;
    struct farbe bits;
} attrib;           // Farbattribut des Textbildschirms

int main()
{
    attrib.bits.vg = 14;           // YELLOW
    attrib.bits.hg = 1;           // BLUE
    attrib.bits.bl = 1;           // attrib.c=YELLOW+16*BLUE+128

    char far* const screen = (char far*) 0xB8000000; // IBM-PC unter DOS

    for (int i = 0; i < 256; ++i)
    {
        screen[2*i]   = i;           // kompletter IBM-Zeichensatz
        screen[2*i+1] = attrib.color; // gelb auf blau blinkend
    }
}
```

¹²¹Dasselbe sind variante Records (PASCAL) oder EQUIVALENCE-Bereiche (FORTRAN).

E Extras

Unicode in Bezeichnern darf *universal-character-names* mit diesen Codepunkten enthalten (seit C++11):

00A8	00AA	00AD	00AF	00B2-00B5
00B7-00BA	00BC-00BE	00C0-00D6	00D8-00F6	00F8-00FF
0100-02FF	0370-167F	1681-180D	180F-1DBF	1E00-1FFF
200B-200D	202A-202E	203F-2040	2054	2060-206F
2070-20CF	2100-218F	2460-24FF	2776-2793	2C00-2DFF
2E80-2FFF	3004-3007	3021-302F	3031-303F	3040-D7FF
F900-FD3D	FD40-FDCF	FDF0-FE1F	FE30-FE44	FE47-FFFF
10000-1FFFFD	20000-2FFFFD	30000-3FFFFD	40000-4FFFFD	50000-5FFFFD
60000-6FFFFD	70000-7FFFFD	80000-8FFFFD	90000-9FFFFD	A0000-AFFFFD
B0000-BFFFFD	C0000-CFFFFD	D0000-DFFFFD	E0000-EFFFFD	

Welche Codierung unterstützt wird, ist vom Compiler abhängig.¹²² Unter Linux ist UTF-8 ohne Byte Order Mark Standard.

Quelldatei-Angaben ersetzen nicht nur die Makros `__FILE__` und `__FILE__`:

```
#include <source_location> // std::experimental in g++9

auto log(std::string msg,
         const std::source_location& loc = std::source_location::current())
{
    std::cout << msg << " : "
    << loc.function_name() << ":"
    << loc.file_name() << ":"
    << loc.line() << ":"
    << loc.column() << '\n';
}

auto trace_it()
{
    log("Hello world!"); // Ausgabe Funktionsname: trace_it
}
```

Warning! Incomplet, incorrekt, and iNconSisTent... : work in progress.

TODO: coroutines, jthread, ...

¹²² Siehe reddit.com/r/cpp/ just found a use for the poop emoji in C++.

E.1 Coroutinen

Coroutinen enthalten eines der Schlüsselwörter `co_yield`, `co_return` oder `co_await`. Funktionen berechnen einen Wert und liefern diesen zurück. Eine Coroutine liefert (*yield*) einen Wert, unterbricht ihre Arbeit und setzt sie an derselben Stelle fort, wenn sie reaktiviert wird:

```
#include <experimental/generator> // MS VC++ /await /std=c++latest
#include <iostream>
#include <numeric>
#include <tuple>
using Triple = std::tuple<int, int, int>;
using std::experimental::generator;

generator<Triple> pythagorean_triples(int limit)
{
    for (auto z = 1; z < limit; ++z)
        for (auto y = 1; y < z; ++y)
            for (auto x = 1; x < y; ++x)
                if (x * x + y * y == z * z)
                    {
                        std::cout << '\t' << x << ' ' << y << ' ' << z << '\n';
                        co_yield{ x,y,z };
                    }
}

generator<Triple> irreducible_pythagorean_triples(int limit)
{
    for (auto [x, y, z] : pythagorean_triples(limit))
        if (std::gcd(x, z) == 1 && std::gcd(y, z) == 1)
            co_yield {x,y,z};
}

int main()
{
    std::cout << "\tpythagorean triple\nirreducible\n";
    for (auto [x, y, z] : irreducible_pythagorean_triples(30))
        std::cout << x << ' ' << y << ' ' << z << '\n';
}
```

Die Ausgabe zeigt, wie Coroutinen zusammenwirken:

```
    pythagorean triple
irreducible
  3 4 5
3 4 5
  6 8 10
  5 12 13
5 12 13
  9 12 15
  8 15 17
8 15 17
  12 16 20
  15 20 25
  7 24 25
7 24 25
  10 24 26
  20 21 29
20 21 29
```

Wie `std::views::iota` können Coroutinen als Generatoren eingesetzt werden.¹²³ Sie lassen sich mit `<ranges>` kombinieren.

¹²³ Generatoren sind zur Zeit (Juli 2020) experimentell in Visual C++. Eine andere Möglichkeit bietet Lewis Bakers <https://github.com/lewissbaker/cppcoro>

Index

- [], *siehe* Feld

- Ableitung, *siehe* Vererbung
- abstrakte Basis, *siehe* Klasse
- abstrakte Methode, *siehe* Klasse
- Adresse, *siehe* Zeiger
- <algorithm>, *siehe* Algorithmen
- Algorithmen, 64–76
 - modifizierend, 68
 - mutierend, 70
 - nichtmodifizierend, 66
 - numerisch, 74
 - parallele, 76
 - STL, 64
- Aliasname, *siehe* Variable
- and, *siehe* Operatoren
- and_eq, *siehe* Operatoren
- ANSI C, 1
- <any>, *siehe* Datenkapsel
- any, *siehe* Datenkapsel
- argc, *siehe* Hauptprogramm
- argv, *siehe* Hauptprogramm
- <array>, *siehe* Container
- array<>, *siehe* Container
- assert(), *siehe* Zusicherung
- Aufzählungskonstante, 13
- Ausdruck, 8
- Ausnahme, 30
 - erklären, 30
 - fangen, 30
 - werfen, 30
- Auswertereihenfolge, *siehe* Operatoren
- auto, *siehe* Variable

- bad_alloc, *siehe* Freispeicher, Ausnahme
- Basisklasse, *siehe* Vererbung
- Bibliothek, *siehe* Modularisierung
- Bildschirm, *siehe* Ein-/Ausgabe
- bitand, *siehe* Operatoren
- Bitfeld, *siehe* Struktur, bitset
- Bitmengen, 114
- bitor, *siehe* Operatoren

- Bitschieben, *siehe* Operatoren
- <bitset>, *siehe* Bitmengen
- Block, 8
- bool, *siehe* Typ
- break, *siehe* Schleife, Verzweigung

- case, *siehe* Verzweigung
- <cassert>, *siehe* Zusicherung
- catch, *siehe* Ausnahme
- cerr, *siehe* Ein-/Ausgabe
- char, *siehe* Typ
- <chrono>, *siehe* Zeit
- cin, *siehe* Ein-/Ausgabe
- class, *siehe* Klasse
- clog, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <cmath>, *siehe* Mathematik
- Compiler, *siehe* Übersetzung
- compl, *siehe* Operatoren
- <complex>, *siehe* Mathematik
- complex<>, *siehe* Mathematik
- Concepts, 51–52
 - Definition, 52
 - shorthand, 51
 - terse, 51
- <condition_variable>, *siehe* Thread
- const, *siehe* Variable, Methode
- const-Methode, *siehe* Klasse
- const_cast<>, *siehe* Operatoren
- consteval, 14
- constexpr, *siehe* Variable, Methode
- constinit, 14
- Container, 54–59
 - Adapter, 61
 - Eigenschaften, 58
 - Hash-, 56
 - Iterator
 - Ein-/Ausgabe-, 63
 - zum Einfügen, 63
 - Iteratoren, 62–63
 - Operationen, 58
 - assoziativ, 59
 - Hash, 59

- Kosten, 60
- listentypisch, 59
- stapelartig, 59
- sequentiell, 56
- sortiert, 56
 - Kriterium, 56
 - Schlüssel, 56
- unordered_..., 56
- continue, *siehe* Schleife
- cout, *siehe* Ein-/Ausgabe

- dangling pointer, *siehe* Zeiger
- Dateiarbeit, *siehe* Ein-/Ausgabe
- Dateisystem, 124–126
 - Berechtigungen, 125
 - Iterator, 126
 - Pfad, 124
- Dateiumlenkung, *siehe* Ein-/Ausgabe
- Datenkapseln, 85–87
 - any, 87
 - optional, 85
 - variant, 85
- default, *siehe* Klasse, Verzweigung
- #define, *siehe* Vorverarbeitung
- Deklarationsdatei, 29
- Dekrement, *siehe* Operatoren
- delete, *siehe* Freispeicher, Klasse
- <deque>, *siehe* Container
- deque<>, *siehe* Container
- Destruktor, *siehe* Klasse
- directory_iterator, *siehe* Dateisystem
- do, *siehe* Schleife
- double, *siehe* Typ
- duration, *siehe* Zeitspanne
- dynamic_cast<>, *siehe* Operatoren

- Ein-/Ausgabe, 100–107
 - Umlenkung, 100
 - Bildschirm, 100
 - C-Funktionen, 107
 - Formatanweisung, 107
 - Fehlerprotokoll, 100
 - Formatierung, 104
 - Ausgabebreite, 105
 - Manipulatoren, 106
 - Nachkommastellen, 105
 - Vorzeichen, 105
 - Zahlenbasis, 104
 - Ströme, 100–103
 - Ausgabe, 100
 - Dateien, 103
 - Eingabe, 101
 - mit wahlfreiem Zugriff, 103
 - Zeichenketten, 102
 - Zustand, 102
 - Tastatur, 100
- #elif, *siehe* Vorverarbeitung
- else, *siehe* Verzweigung
- Endlosschleife, *siehe* Schleife, endlos
- Entscheidung, *siehe* Verzweigung
- enum, *siehe* Aufzählung
- Erbe, *siehe* Vererbung
- Ergebnistyp, *siehe* Funktion
- #error, *siehe* Vorverarbeitung
- Escape-Sequenz, *siehe* Sonderzeichen
- <exception>, *siehe* Ausnahme
- explicit, *siehe* Konstruktor, Typumwandlung
- extern, *siehe* Variable, Funktion

- false, *siehe* Typ
- Feld, 20
 - Index, 20
 - mehrdimensional, 20
 - Zeichenkette, 7, 20, 88
- <filesystem>, *siehe* Dateisystem
- final, *siehe* Klasse
- float, *siehe* Typ
- for, *siehe* Schleife
- Formatierung, *siehe* Ein-/Ausgabe, Stil
- <forward_list>, *siehe* Container
- forward_list<>, *siehe* Container
- free(), *siehe* Freispeicher
- Freispeicher, 84
 - anfordern, 137
 - Fehler, 138
 - Felder, 137
 - freigeben, 137
 - Knappheit, 137
 - Platzierungssyntax, 138

- smarte Zeiger, 84
- Freunde, *siehe* Klasse
- friend, *siehe* Klasse
- <fstream>, *siehe* Ein-/Ausgabe
- fstream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <functional>, *siehe* Funktoren
- Funktion, 26–29
 - anonyme, *siehe* Lambda-Ausdruck
 - Definition, 26
 - Deklaration, 26
 - inline, 27
 - Parameter, 11, 28
 - Feld als, 29
 - Referenz-, 28
 - Standard-, 28
 - Verschiebe-, 28
 - Wert-, 28
 - Parameterliste, 26
 - Prototyp, 26
 - Rückkehranweisung, 27
 - Rumpf, 26
 - Schablone, 27, 50
 - Spezialisierung, 50
 - überladen, 27
- Funktoren, 42, 80–83
 - Binder, 83
 - Lambda-Ausdruck, 81
 - Negierer, 83
 - Operator-, 82
- <future>, *siehe* Thread
- future<>, *siehe* Thread
- Ganzzahl, *siehe* Zahl, Typ
- Gleitkommazahl, *siehe* Zahl, Typ
- goto, *siehe* Sprung
- gslice, *siehe* Wertfelder
- Gültigkeitsbereich, *siehe* Variable
- Hauptprogramm, 3, 29
 - Parameter, 29
 - Rückgabewert, 3
- Header, *siehe* Deklarationsdatei
- high_resolution_clock, *siehe* Uhr
- #if, *siehe* Vorverarbeitung
- if, *siehe* Verzweigung
- #ifdef, *siehe* Vorverarbeitung
- #ifndef, *siehe* Vorverarbeitung
- ifstream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- #include, *siehe* Vorverarbeitung
- Index, *siehe* Feld
- Initialisierung, *siehe* Variable, Klasse
- <initializer_list>, *siehe* Konstruktor
- Inkrement, *siehe* Operatoren
- inline, *siehe* Funktion
- Instanz, *siehe* Klasse
- int, *siehe* Typ
- <iomanip>, *siehe* Ein-/Ausgabe
- iostream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <iostream>, *siehe* Ein-/Ausgabe
- istream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <iterator>, *siehe* Iteratoren
- Iteratoren, *siehe* Container, Algorithmen
- K&R C, 1
- Klasse, 38–40
 - abgeleitete, 45
 - Basis-, 44
 - abstrakte, 47
 - virtuelle, 49
 - Destruktor, 39
 - Freunde, 40
 - Initialisiererliste, 39
 - Instanz, 38
 - Komponente, 38
 - static, 40
 - Konstruktor, 39
 - delegation, 39
 - default, 39
 - delete, 39
 - Initialisierer, 39
 - Kopier-, 39
 - Verschiebe-, 39
 - Methode, 38
 - abstrakte, 47
 - const, 38
 - final, 47
 - inline, 38
 - override, 47
 - virtuell, 47
 - Objekt, 38

- Schablone, 53
 - Spezialisierung, 53
- Schnittstelle, 38
- Vererbung, 44–49
 - Mehrfach-, 48
 - nicht-öffentlich, 46
 - öffentlich, 45
- Zugriffsrechte, 40
 - bei Vererbung, 46
 - private, 40
 - protected, 40
 - public, 40
- Koenig lookup, *siehe* Namensraum
- Kommentar, 8
- Kompatibilität
 - von C und C++, 127
- Komponente, *siehe* Struktur
- Konstante, *siehe* Variable, Methode
- Konstruktor, *siehe* Klasse
- Kopierkonstruktor, *siehe* Klasse
- Kurzschrift, *siehe* Zuweisung

- Lambda-Ausdruck, *siehe* Funktoren
- Lebensdauer, *siehe* Variable
- Lesemethode, *siehe* Klasse
- <limits>, *siehe* Wertebereich
- #line, *siehe* Vorverarbeitung
- Linker, *siehe* Übersetzung
- <list>, *siehe* Container
- list<>, *siehe* Container
- Literalsuffix, 43
- <locale>, 96
- logische Verknüpfung, *siehe* Operatoren
- long, *siehe* Typ

- main(), *siehe* Hauptprogramm
- Makro, *siehe* Vorverarbeitung
- malloc(), *siehe* Freispeicher
- Manipulatoren, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <map>, *siehe* Container
- map<>, *siehe* Container
- Mathematik, 108–115
 - Funktionen, 108
 - komplexe Zahlen, 110
 - Tupel, 108
- Mehrfachverzweigung, *siehe* Verzweigung
- <memory>, *siehe* Freispeicher
- Methode, *siehe* Klasse
- Modul, 32–33
 - Bindung, 33
 - Implementierung, 32
 - Partition, 33
 - Reexport, 32
 - Schnittstelle, 32
- multimap<>, *siehe* Container
- multiset<>, *siehe* Container
- mutable, *siehe* Variable
- <mutex>, *siehe* Thread

- Nachkomme, *siehe* Vererbung
- Namensraum, 35
 - Koenig lookup, 36
- namespace, *siehe* Namensraum
- <new>, *siehe* Freispeicher
- new, *siehe* Freispeicher
- noexcept, *siehe* Ausnahme
- not, *siehe* Operatoren
- not_eq, *siehe* Operatoren
- nothrow, *siehe* Freispeicher
- nullptr, *siehe* Zeiger
- <numbers>, *siehe* Mathematik
- <numeric>, *siehe* Algorithmen
- numeric_limits<>, *siehe* Wertebereich

- Objekt, *siehe* Klasse
- ofstream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- Operationen, *siehe* Operatoren
- Operator
 - Einschränkungen, 43
- operator, *siehe* Operatoren überladen
- Operatoren, 6, 15–19
 - arithmetisch, 15
 - Auflistung, 18
 - Auswertereihenfolge, 19
 - bitweise, 17
 - Dekrement, 17
 - Dreiwegevergleich, 42
 - Entscheidung, 17
 - Inkrement, 17
 - logische, 17

- Methoden, [41](#)
- Postfix-, [17](#)
- Präfix-, [17](#)
- Rangfolge, [19](#)
- spaceship, [42](#)
- Typinformation, [18](#)
 - sizeof, [18](#)
 - typeid, [18](#)
- Typumwandlung, [16](#), [18](#)
 - const_cast, [18](#)
 - dynamic_cast, [18](#)
 - reinterpret_cast, [18](#)
 - static_cast, [18](#)
- überladen, [41–43](#)
 - () , [42](#)
 - [] , [43](#)
 - als Funktion, [41](#)
 - als Methode, [41](#)
 - Dekrement, [42](#)
 - Ein-/Ausgabe, [41](#)
 - Inkrement, [42](#)
 - Typkonverter, [43](#)
- Vergleich, [42](#)
- Vergleichs-, [17](#)
- Zuweisung, [15](#), [43](#)
 - RAII, [31](#)
 - Verbund-, [15](#), [41](#)
- Operatorobjekte, *siehe* Funktoren
- <optional>, *siehe* Datenkapsel
- optional<>, *siehe* Datenkapsel
- or, *siehe* Operatoren
- or_eq, *siehe* Operatoren
- ostream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- override, *siehe* Klasse
- pair<>, *siehe* map, Tupel
- Parameter, *siehe* Funktion
- path, *siehe* Dateisystem
- Plattformabhängigkeit, [127](#)
- Platzierung, *siehe* Freispeicher
- Postfix, *siehe* Operatoren
- Präfix, *siehe* Operatoren
- #pragma, *siehe* Vorverarbeitung
- Präprozessor, *siehe* Vorverarbeitung
- Priorität, *siehe* Operatoren
- priority_queue<>, *siehe* Container
- private, *siehe* Klasse
- promise<>, *siehe* Thread
- protected, *siehe* Klasse
- Prototyp, *siehe* Funktion
- Prozedur, *siehe* Funktion
- public, *siehe* Klasse
- <queue>, *siehe* Container
- queue<>, *siehe* Container
- <random>, *siehe* Zufallszahlen
- Ranges, [78–79](#)
 - Fabrik, [78](#)
 - Pipes, [78](#)
 - Sicht, [78](#)
- <ranges>, *siehe* Ranges
- Rangfolge, *siehe* Operatoren
- <ratio>, *siehe* Verhältnisse
- realloc(), *siehe* Freispeicher
- Referenzparameter, *siehe* Funktion
- <regex>, *siehe* regulärer Ausdruck
- regex_match, *siehe* regulärer Ausdruck
- regulärer Ausdruck, [97–99](#)
- reinterpret_cast<>, *siehe* Operatoren
- return, *siehe* Funktion
- Rückgabety, *siehe* Funktion
- Rückgabewert, *siehe* Funktion
- Rückkehranweisung, *siehe* Funktion
- Schablone, *siehe* Funktion, Klasse, Variable
- Schleife, [22–23](#)
 - Abbruch, [23](#)
 - endlos, *siehe* Endlosschleife
 - fußgesteuert, [23](#)
 - kopfgesteuert, [22](#)
 - range-based for, [81](#)
 - Testbedingung, [22](#)
 - Zähl-, [22](#)
- Schlüsselwörter, [1](#)
- Schlüsselwörter, [6](#)
- scope, *siehe* Gültigkeitsbereich
- Seiteneffekte, *siehe* Vorverarbeitung
- <set>, *siehe* Container
- set<>, *siehe* Container
- short, *siehe* Typ

- signed, *siehe* Typ
- sizeof, *siehe* Operatoren
- slice, *siehe* Wertfelder
- smart pointer, *siehe* Freispeicher
- Sonderzeichen, 6, 8
 - white spaces, 6
- Speicherbedarf, *siehe* Typ
- Speicherklasse, *siehe* Variable
- Sprung, 25
- <sstream>, *siehe* Ein-/Ausgabe
- sstream, *siehe* Ein-/Ausgabe
- <stack>, *siehe* Container
- stack unwinding, *siehe* Ausnahme
- stack<>, *siehe* Container
- Standard Template Library, *siehe* Container, Algorithmen
- Standardbibliothek
 - Header, 36
- Standardparameter, *siehe* Funktion
- static, *siehe* Variable, Funktion, Klasse
- static_assert, *siehe* Zusicherung
- static_cast<>, *siehe* Operatoren
- std, *siehe* Namensraum
- <stdexcept>, *siehe* Ausnahme
- Stil, 129
 - Formatierung, 130
 - Kommentar, 130
- STL, *siehe* Container, Algorithmen
- <string>, *siehe* string-Klasse
- string-Klasse, 88–95
- Ströme, *siehe* Ein-/Ausgabe
- struct, *siehe* Struktur, Klasse
- Struktur, 21
 - Bitfeld, 139
 - Komponente, 21
- switch, *siehe* Verzweigung
- system_clock, *siehe* Uhr

- Tastatur, *siehe* Ein-/Ausgabe
- template, *siehe* Funktion, Klasse
- Textersatz, *siehe* Vorverarbeitung
- this, 41
- Thread, 118–123
 - Atomics, 123
 - Bedingungsvariable, 120
 - deadlock, 120
 - Future, 122
 - Mutex, 119
 - Promise, 123
 - race condition, 119
 - Task, 122
- <thread>, *siehe* Thread
- throw, *siehe* Ausnahme
- time_point, *siehe* Zeitpunkt
- true, *siehe* Typ
- try, *siehe* Ausnahme
- <tuple>, *siehe* Mathematik
- tuple<>, *siehe* Mathematik
- Typ, 9–10
 - Aliasnamen, 21
 - Modifikation, 9
 - Speicherbedarf, 9
 - typedef, 21
 - using, 21
 - Wertebereich, 9
 - zusammengesetzter, *siehe* Feld, Struktur, Klasse
- typedef, *siehe* Typ
- typeid, *siehe* Operatoren
- typename, *siehe* Schablone
- Typparameter, *siehe* Schablone
- Typumwandlung, *siehe* Operatoren

- überladen, *siehe* Operatoren
- Übersetzung, 34
- #undef, *siehe* Vorverarbeitung
- union, *siehe* Vereinigung
- unordered_..., *siehe* Container
- <unordered_map>, *siehe* Container
- <unordered_set>, *siehe* Container
- unsigned, *siehe* Typ
- Unterprogramm, *siehe* Funktion
- using, 53, *siehe* Namensraum
- <utility>, *siehe* Header

- <valarray>, *siehe* Wertfelder
- Variable, 11–13
 - Definition, 11
 - Deklaration, 11
 - Gültigkeitsbereich, 11

- global, 11
 - lokal, 11
 - Konstante, 13
 - Lebensdauer, 12
 - automatisch, 12
 - statisch, 12
 - Referenz, 12
 - Schablonen, 50
 - Speicherklasse, 12
 - extern, 12
 - static, 12
 - statisch lokal, 12
 - Typ, 11
 - veränderbar, 13
 - <variant>, *siehe* Datenkapsel
 - variant<>, *siehe* Datenkapsel
 - <vector>, *siehe* Container
 - vector<>, *siehe* Container
 - Verbundzuweisung, *siehe* Zuweisung
 - Vereinigung, 139
 - Vererbung, *siehe* Klasse
 - Vergleich, *siehe* Operatoren
 - Verhältnisse, 110
 - Verschiebekonstruktor, *siehe* Klasse
 - Verzweigung, 24–25
 - Entscheidung, 24
 - Mehrfach-, 24
 - virtual, *siehe* Klasse
 - virtuell, *siehe* Klasse
 - virtuelle Basis, *siehe* Klasse
 - virtuelle Methode, *siehe* Klasse
 - void, *siehe* Typ
 - Vorfahr, *siehe* Vererbung
 - Vorverarbeitung, 8, 131–133
 - bedingte Übersetzung, 132
 - Einbinden von Dateien, 132
 - Makro
 - Funktion, 131
 - Konstante, 131
 - Umwandlung in Zeichenkette, 133
 - vordefiniert, 133
 - while, *siehe* Schleife
 - white spaces, *siehe* Sonderzeichen
 - Wiederholung, *siehe* Schleife
 - wild pointer, *siehe* Zeiger
 - xor, *siehe* Operatoren
 - xor_eq, *siehe* Operatoren
 - Zahlkonstanten, 7
 - ganz, 7
 - Gleitkomma-, 7
 - Zählschleife, *siehe* Schleife
 - Zeichen, 7
 - Zeichenkette, *siehe* Feld, string-Klasse
 - Zeiger, 134–136
 - arithmetik, 135
 - Adresse, 134
 - auf Funktion, 136
 - auf Struktur, 136
 - Differenz, 135
 - Feldnamen, 135
 - Komponentenzugriff, 136
 - Vergleich, 135
 - wilde, 134
 - Zeit, 116–117
 - Uhr, 116
 - Zeitpunkt, 117
 - Zeitspanne, 116
 - Zufallszahlen, 111–112
 - Zugriffsrecht, *siehe* Klasse
 - Zugriffsschutz, *siehe* Klasse
 - zusammengesetzte Typen, *siehe* Typ
 - Zusicherung, 14
- Wertebereich, *siehe* Typ
- Wertfelder, 114
- Wertparameter, *siehe* Funktion