

Systemnahe Programmierung in C

6 Einfache Datentypen

J. Kleinöder, D. Lohmann, V. Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2024

<http://sys.cs.fau.de/lehre/ss24>



Was ist ein Datentyp?

■ **Datentyp** := (*<Menge von Werten>*, *<Menge von Operationen>*)

- **Literal** Wert im Quelltext
- **Konstante** Bezeichner für einen Wert
- **Variable** Bezeichner für Speicherplatz, der einen Wert aufnehmen kann
- **Funktion** Bezeichner für Sequenz von Anweisungen, die einen Wert zurückgibt

↪ 5-6

↪ Literale, Konstanten, Variablen, Funktionen haben einen **(Daten-)Typ**

■ Datentyp legt fest

- Repräsentation der Werte im Speicher
- Größe des Speicherplatzes für Variablen
- Erlaubte Operationen

■ Datentyp wird festgelegt

- Explizit, durch Deklaration, Typ-Cast oder Schreibweise (Literale)
- Implizit, durch „Auslassung“ (↪ `int` schlechter Stil!)



Primitive Datentypen in C

- Ganzzahlen/Zeichen `char`, `short`, `int`, `long`, `long long` (C99)
 - Wertebereich: implementierungsabhängig [≠Java]
Es gilt: `char` ≤ `short` ≤ `int` ≤ `long` ≤ `long long`
 - Jeweils als `signed`- und `unsigned`-Variante verfügbar
- Fließkommazahlen `float`, `double`, `long double`
 - Wertebereich: implementierungsabhängig [≠Java]
Es gilt: `float` ≤ `double` ≤ `long double`
 - Ab C99 auch als `_Complex`-Datentypen verfügbar (für komplexe Zahlen)
- Leerer Datentyp `void`
 - Wertebereich: ∅
- Boolescher Datentyp `_Bool` (C99)
 - Wertebereich: {0, 1} (↔ letztlich ein Integertyp)
 - Bedingungsausdrücke (z. B. `if(...)`) sind in C vom Typ `int`! [≠Java]



Integertyp	Verwendung	Literalformen
■ <code>char</code>	kleine Ganzzahl oder Zeichen	'A', 65, 0x41, 0101
■ <code>short [int]</code>	Ganzzahl (<code>int</code> ist optional)	s. o.
■ <code>int</code>	Ganzzahl „natürlicher Größe“	s. o.
■ <code>long [int]</code>	große Ganzzahl	65L, 0x41L, 0101L
■ <code>long long [int]</code>	sehr große Ganzzahl	65LL, 0x41LL, 0101LL

Typ-Modifizierer	werden vorangestellt	Literal-Suffix
■ <code>signed</code>	Typ ist vorzeichenbehaftet (Normalfall)	-
■ <code>unsigned</code>	Typ ist vorzeichenlos	U
■ <code>const</code>	Variable des Typs kann nicht verändert werden	-

■ Beispiele (Variablendefinitionen)

```
char a           = 'A';    // char-Variable, Wert 65 (ASCII: A)
const int b     = 0x41;    // int-Konstante, Wert 65 (Hex: 0x41)
long c         = 0L;      // long-Variable, Wert 0
unsigned long int d = 22UL; // unsigned-long-Variable, Wert 22
```



- Die interne Darstellung (Bitbreite) ist **implementierungsabhängig**

	Datentyp-Breite in Bit				
	Java	C-Standard	gcc/IA32	gcc/IA64	gcc/AVR
char	16	≥ 8	8	8	8
short	16	≥ 16	16	16	16
int	32	≥ 16	32	32	16
long	64	≥ 32	32	64	32
long long	-	≥ 64	64	64	64

- Der Wertebereich berechnet sich aus der Bitbreite

- **signed** $-(2^{Bits-1}-1) \rightarrow +(2^{Bits-1}-1)$
- **unsigned** $0 \rightarrow +(2^{Bits}-1)$



- Die interne Darstellung (Bitbreite) ist **implementierungsabhängig**

	Datentyp-Breite in Bit				
	Java	C-Standard	gcc/A32	gcc/A64	gcc/AVR
<code>char</code>	16	≥ 8	8	8	8
<code>short</code>	16	≥ 16	16	16	16
<code>int</code>	32	≥ 16	32	32	16
<code>long</code>	64	≥ 32	32	64	32
<code>long long</code>	-	≥ 64	64	64	64

- Der Wertebereich berechnet sich aus der Bitbreite

- signed** $-(2^{Bits-1}-1) \rightarrow +(2^{Bits-1}-1)$
- unsigned** $0 \rightarrow +(2^{Bits}-1)$

Hier zeigt sich die C-Philosophie: Effizienz durch **Maschinennähe** \leftrightarrow 3-17

Die interne Repräsentation der Integertypen ist definiert durch die **Hardware** (Registerbreite, Busbreite, etc.). Das führt im Ergebnis zu **effizientem Code**.



Integertypen: Maschinennähe \rightarrow Problemnähe

- **Problem:** Breite (\rightsquigarrow Wertebereich) der C-Standardtypen ist implementierungsspezifisch \mapsto **Maschinennähe**
- **Oft benötigt:** Integertyp definierter Größe \mapsto **Problemnähe**
 - Wertebereich **sicher**, aber möglichst **kompakt** darstellen
 - Register **definierter Breite** n bearbeiten
 - Code unabhängig von Compiler und Hardware halten (\rightsquigarrow Portierbarkeit)



Integertypen: Maschinennähe → Problemnähe

- **Problem:** Breite (\rightsquigarrow Wertebereich) der C-Standardtypen ist implementierungsspezifisch \rightarrow **Maschinennähe**
- **Oft benötigt:** Integertyp definierter Größe \rightarrow **Problemnähe**
 - Wertebereich **sicher**, aber möglichst **kompakt** darstellen
 - Register **definierter Breite** n bearbeiten
 - Code unabhängig von Compiler und Hardware halten (\rightsquigarrow Portierbarkeit)
- **Lösung:** Modul `stdint.h`
 - Definiert Alias-Typen: `intn_t` und `uintn_t` für $n \in \{8, 16, 32, 64\}$
 - Wird vom Compiler-Hersteller bereitgestellt



Integertypen: Maschinennähe \rightarrow Problemnähe

- **Problem:** Breite (\leadsto Wertebereich) der C-Standardtypen ist implementierungsspezifisch \rightarrow **Maschinennähe**
- **Oft benötigt:** Integertyp definierter Größe \rightarrow **Problemnähe**
 - Wertebereich **sicher**, aber möglichst **kompakt** darstellen
 - Register **definierter Breite** n bearbeiten
 - Code unabhängig von Compiler und Hardware halten (\leadsto Portierbarkeit)
- **Lösung:** Modul `stdint.h`
 - Definiert Alias-Typen: `intn_t` und `uintn_t` für $n \in \{8, 16, 32, 64\}$
 - Wird vom Compiler-Hersteller bereitgestellt

Wertebereich `stdint.h`-Typen

<code>uint8_t</code>	0 \rightarrow 255	<code>int8_t</code>	-128 \rightarrow +127
<code>uint16_t</code>	0 \rightarrow 65.535	<code>int16_t</code>	-32.768 \rightarrow +32.767
<code>uint32_t</code>	0 \rightarrow 4.294.967.295	<code>int32_t</code>	-2.147.483.648 \rightarrow +2.147.483.647
<code>uint64_t</code>	0 \rightarrow $> 1,8 * 10^{19}$	<code>int64_t</code>	$< -9,2 * 10^{18}$ \rightarrow $> +9,2 * 10^{18}$



Integertypen: Maschinennähe → Problemnähe

- **Problem:** Breite (\leadsto Wertebereich) der C-Standardtypen ist implementierungsspezifisch \rightarrow **Maschinennähe**
- **Oft benötigt:** Integertyp definierter Größe \rightarrow **Problemnähe**
 - Wertebereich **sicher**, aber möglichst **kompakt** darstellen
 - Register **definierter Breite** n bearbeiten
 - Code unabhängig von Compiler und Hardware halten (\leadsto Portierbarkeit)
- **Lösung:** Modul `stdint.h`
 - Definiert Alias-Typen: `intn_t` und `uintn_t`
 - Wird vom Compiler-Hersteller bereitgestellt

Wie definiert man **problemspezifische** Typen?

Wertebereich `stdint.h`-Typen

<code>uint8_t</code>	0	\rightarrow	255	<code>int8_t</code>	-128	\rightarrow	+127
<code>uint16_t</code>	0	\rightarrow	65.535	<code>int16_t</code>	-32.768	\rightarrow	+32.767
<code>uint32_t</code>	0	\rightarrow	4.294.967.295	<code>int32_t</code>	-2.147.483.648	\rightarrow	+2.147.483.647
<code>uint64_t</code>	0	\rightarrow	$> 1,8 * 10^{19}$	<code>int64_t</code>	$< -9,2 * 10^{18}$	\rightarrow	$> +9,2 * 10^{18}$



- Mit dem `typedef`-Schlüsselwort definiert man einen **Typ-Alias**:
`typedef Typausdruck Bezeichner`;
 - *Bezeichner* ist nun ein **alternativer Name** für *Typausdruck*
 - Kann überall verwendet werden, wo ein Typausdruck erwartet wird

```
// stdint.h (avr-gcc)                // stdint.h (x86-gcc, IA32)
typedef unsigned char  uint8_t;      typedef unsigned char  uint8_t;
typedef unsigned int  uint16_t;     typedef unsigned short uint16_t;
...                                  ...
```

```
// main.c
#include <stdint.h>

uint16_t counter = 0;    // global 16-bit counter, range 0-65535
...
typedef uint8_t Register; // Registers on this machine are 8-bit
...
```



- Typ-Aliase ermöglichen einfache **problembezogene** Abstraktionen
 - Register ist problemnäher als `uint8_t`
 - ↪ Spätere Änderungen (z. B. auf 16-Bit-Register) zentral möglich
 - `uint16_t` ist problemnäher als `unsigned char`
 - `uint16_t` ist **sicherer** als `unsigned char`

Definierte Bitbreiten sind bei der μ C-Entwicklung sehr wichtig!

- Große Unterschiede zwischen Plattformen und Compilern
 - ↪ Kompatibilitätsprobleme
- Um Speicher zu sparen, sollte immer der **kleinstmögliche** Integertyp verwendet werden

Regel: Bei der systemnahen Programmierung werden Typen aus `stdint.h` verwendet!



- Mit dem `enum`-Schlüsselwort definiert man einen **Aufzählungstyp** über eine explizite Menge **symbolischer** Werte:

```
enum Bezeichneropt { KonstantenListe } ;
```

- Beispiel

- Definition:

```
enum eLED {RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0,  
          RED1, YELLOW1, GREEN1, BLUE1};
```

- Verwendung:

```
enum eLED myLed = YELLOW0; // enum necessary here!  
...  
sb_led_on(BLUE1);
```



- Mit dem `enum`-Schlüsselwort definiert man einen **Aufzählungstyp** über eine explizite Menge **symbolischer** Werte:

```
enum Bezeichneropt { KonstantenListe } ;
```

- Beispiel

- Definition:

```
enum eLED {RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0,  
          RED1, YELLOW1, GREEN1, BLUE1};
```

- Verwendung:

```
enum eLED myLed = YELLOW0; // enum necessary here!  
...  
sb_led_on(BLUE1);
```

- Vereinfachung der Verwendung durch typedef

- Definition:

```
typedef enum eLED {RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0,  
                  RED1, YELLOW1, GREEN1, BLUE1} LED;
```

- Verwendung:

```
LED myLed = YELLOW0; // LED --> enum eLED
```



- Technisch sind enum-Typen Integers (int)
 - enum-Konstanten werden von 0 an durchnummeriert

```
typedef enum { RED0,      // value: 0
              YELLOW0,   // value: 1
              GREEN0,    // value: 2
              ... } LED;
```

- Es ist auch möglich, Werte direkt zuzuweisen

```
typedef enum { BUTTON0 = 4, BUTTON1 = 8 } BUTTON;
```

- Man kann sie verwenden wie ints (z. B. mit ihnen rechnen)

```
sb_led_on(RED0 + 2); // -> LED GREEN0 is on
sb_led_on(1);        // -> LED YELLOW0 is on
for (int led = RED0; led <= BLUE1; led++)
    sb_led_off(led); // turn off all LEDs
// Also possible...
sb_led_on(4711);     // no compiler/runtime error!
```

- \rightsquigarrow Es findet **keinerlei Typprüfung** statt!



- Technisch sind enum-Typen Integers (int)
 - enum-Konstanten werden von 0 an durchnummeriert

```
typedef enum { RED0,      // value: 0
              YELLOW0,   // value: 1
              GREEN0,    // value: 2
              ... } LED;
```

- Es ist auch möglich, Werte direkt zuzuweisen

```
typedef enum { BUTTON0 = 4, BUTTON1 = 8 } BUTTON;
```

- Man kann sie verwenden wie ints (z. B. mit ihnen rechnen)

```
sb_led_on(RED0 + 2); // -> LED GREEN0 is on
sb_led_on(1);        // -> LED YELLOW0 is on
for (int led = RED0; led <= BLUE1; led++)
    sb_led_off(led); // turn off all LEDs
// Also possible...
sb_led_on(4711);     // no compiler/runtime error!
```

- ↪ Es findet **keinerlei Typprüfung** statt!

Das entspricht der
C-Philosophie! ↪

3-17



- Fließkommatyp Verwendung Literalformen
 - **float** einfache Genauigkeit (≈ 7 St.) 100.0F, 1.0E2F
 - **double** doppelte Genauigkeit (≈ 15 St.) 100.0, 1.0E2
 - **long double** „erweiterte Genauigkeit“ 100.0L 1.0E2L
- Genauigkeit / Wertebereich sind **implementierungsabhängig** [≠Java]
 - Es gilt: **float** ≤ **double** ≤ **long double**
 - **long double** und **double** sind auf vielen Plattformen identisch

„Effizienz durch Maschinennähe“ ↔ 3-17



- Fließkommatyp Verwendung Literalformen
 - **float** einfache Genauigkeit (\approx 7 St.) 100.0F, 1.0E2F
 - **double** doppelte Genauigkeit (\approx 15 St.) 100.0, 1.0E2
 - **long double** „erweiterte Genauigkeit“ 100.0L 1.0E2L
- Genauigkeit / Wertebereich sind **implementierungsabhängig** [\neq Java]
 - Es gilt: **float** \leq **double** \leq **long double**
 - **long double** und **double** sind auf vielen Plattformen identisch

„Effizienz durch Maschinennähe“ \leftrightarrow 3-17

Fließkommazahlen + μ C-Plattform = \$\$\$

- Oft keine Hardwareunterstützung für **float**-Arithmetik
 - \rightsquigarrow **sehr teure** Emulation in Software (langsam, viel zusätzlicher Code)
- Speicherverbrauch von **float**- und **double**-Variablen ist **sehr hoch**
 - \rightsquigarrow mindestens 32/64 Bit (**float**/**double**)

Regel: Bei der μ -Controller-Programmierung ist auf Fließkommaarithmetik **zu verzichten!**



- Zeichen sind in C ebenfalls Ganzzahlen (Integers) \hookrightarrow 6-3
 - `char` gehört zu den Integer-Typen (üblicherweise 8 Bit = 1 Byte)
- Repräsentation erfolgt durch den `ASCII-Code` \hookrightarrow 6-12
 - 7-Bit-Code \mapsto 128 Zeichen standardisiert (die verbleibenden 128 Zeichen werden unterschiedlich interpretiert)
 - Spezielle Literalform durch Hochkommata
 - 'A' \mapsto ASCII-Code von A
 - Nichtdruckbare Zeichen durch Escape-Sequenzen
 - Tabulator `'\t'`
 - Zeilentrenner `'\n'`
 - Backslash `'\\'`
- Zeichen \mapsto Integer \rightsquigarrow man kann mit Zeichen rechnen

```
char b = 'A' + 1;           // b: 'B'

int lower(int ch) {        // lower('X'): 'x'
    return ch + 0x20;
}
```



ASCII-Code-Tabelle (7 Bit)

ASCII → *American Standard Code for Information Interchange*

NUL 00	SOH 01	STX 02	ETX 03	EOT 04	ENQ 05	ACK 06	BEL 07
BS 08	HT 09	NL 0A	VT 0B	NP 0C	CR 0D	SO 0E	SI 0F
DLE 10	DC1 11	DC2 12	DC3 13	DC4 14	NAK 15	SYN 16	ETB 17
CAN 18	EM 19	SUB 1A	ESC 1B	FS 1C	GS 1D	RS 1E	US 1F
SP 20	! 21	" 22	# 23	\$ 24	% 25	& 26	' 27
(28) 29	* 2A	+ 2B	, 2C	- 2D	. 2E	/ 2F
0 30	1 31	2 32	3 33	4 34	5 35	6 36	7 37
8 38	9 39	: 3A	; 3B	< 3C	= 3D	> 3E	? 3F
@ 40	A 41	B 42	C 43	D 44	E 45	F 46	G 47
H 48	I 49	J 4A	K 4B	L 4C	M 4D	N 4E	O 4F
P 50	Q 51	R 52	S 53	T 54	U 55	V 56	W 57
X 58	Y 59	Z 5A	[5B	\ 5C] 5D	^ 5E	_ 5F
` 60	a 61	b 62	c 63	d 64	e 65	f 66	g 67
h 68	i 69	j 6A	k 6B	l 6C	m 6D	n 6E	o 6F
p 70	q 71	r 72	s 73	t 74	u 75	v 76	w 77
x 78	y 79	z 7A	{ 7B	 7C	} 7D	~ 7E	DEL 7F



- Ein String ist in C ein Feld (Array) von Zeichen
 - Repräsentation: Folge von Einzelzeichen, terminiert durch (letztes Zeichen): **NUL** (ASCII-Wert 0)
 - Speicherbedarf: (Länge + 1) Bytes
- Spezielle Literalform durch doppelte Hochkommata:

"Hi!" →

'H'	'i'	'!'	0
-----	-----	-----	---

 ← abschließendes 0-Byte

- Beispiel (Linux)

```
#include <stdio.h>

char string[] = "Hello, World!\n";

int main(void) {
    printf("%s", string);
    return 0;
}
```



- Ein String ist in C ein Feld (Array) von Zeichen
 - Repräsentation: Folge von Einzelzeichen, terminiert durch (letztes Zeichen): **NUL** (ASCII-Wert 0)
 - Speicherbedarf: (Länge + 1) Bytes
- Spezielle Literalform durch doppelte Hochkommata:

"Hi!" →

'H'	'i'	'!'	0
-----	-----	-----	---

 ← abschließendes 0-Byte

- Beispiel (Linux)

```
#include <stdio.h>

char string[] = "Hello, World!\n";

int main(void) {
    printf("%s", string);
    return 0;
}
```

Zeichenketten brauchen vergleichsweise viel Speicher und „größere“ Ausgabegeräte (z. B. LCD-Display).

~ Bei der μ C-Programmierung spielen sie nur eine untergeordnete Rolle.



Ausblick: Komplexe Datentypen

- Aus einfachen Datentypen lassen sich (rekursiv) auch komplexe(re) Datentypen bilden

- Felder (Arrays) \hookrightarrow Sequenz von Elementen gleichen Typs [\approx Java]

```
int intArray[4];           // allocate array with 4 elements
intArray[0] = 0x4711;     // set 1st element (index 0)
```

- Zeiger \hookrightarrow veränderbare Referenzen auf Variablen [\neq Java]

```
int a = 0x4711;           // a: 0x4711
int *b = &a;              // b: -->a (memory location of a)
int c = *b;               // pointer dereference (c: 0x4711)
*b = 23;                  // pointer dereference (a: 23)
```

- Strukturen \hookrightarrow Verbund von Elementen bel. Typs [\neq Java]

```
struct Point { int x; int y; };
struct Point p;           // p is Point variable
p.x = 0x47;               // set x-component
p.y = 0x11;               // set y-component
```

- Wir betrachten diese detailliert in [späteren Kapiteln](#)

