Systemnahe Programmierung in C

7 Operatoren und Ausdrücke

J. Kleinöder, D. Lohmann, V. Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2025

http://sys.cs.fau.de/lehre/ss25

Arithmetische Operatoren [=Java]

- Stehen für alle Ganzzahl- und Fließkommatypen zur Verfügung

$+$	Addition	
$-$	Subtraktion	
$\star$	Multiplikation	
/	Division	
unäres $-$	negatives Vorzeichen (z. B. $-a$)	$\leadsto$ Multiplikation mit -1
unäres $+$	positives Vorzeichen (z. B. $+3$)	$\leadsto$ kein Effekt

- Zusätzlich nur für Ganzzahltypen:

%	Modulo (Rest bei Division)

Inkrement-/Dekrement-Operatoren [=Java]

- Stehen für Ganzzahltypen und Zeigertypen zur Verfügung

++	Inkrement (Erhöhung um 1)
−−	Dekrement (Verminderung um 1)

- Linksseitiger Operator (Präfix) ++x bzw. --x
  - Erst wird der Inhalt von x verändert
  - Dann wird der (neue) Inhalt von x als Ergebnis geliefert
- Rechtsseitiger Operator (Postfix) x++ bzw. x--
  - Erst wird der (alte) Inhalt von x als Ergebnis geliefert
  - Dann wird der Inhalt von x verändert
- Beispiele

```
a = 10;
b = a++;  // b: 10, a: 11
c = ++a;  // c: 12, a: 12
```

Vergleichsoperatoren [=Java]

- Vergleichen von zwei Ausdrücken

$<$	kleiner
$<=$	kleiner gleich
$>$	größer
$>=$	größer gleich
$==$	gleich (zwei Gleichheitszeichen!)
$!=$	ungleich

- Beachte: Ergebnis ist vom Typ `int` [≠Java]
  - Ergebnis: *falsch* $\mapsto$ 0
    wahr $\mapsto$ 1
  - Man kann mit dem Ergebnis rechnen
- Beispiele

```
if (a >= 3) {···}
if (a == 3) {···}
return a * (a > 0);   // return 0 if a is negative
```

Logische Operatoren [≈Java]

- Verknüpfung von Wahrheitswerten (wahr / falsch), kommutativ

&&	„und“	*wahr*	&&	*wahr*	→	*wahr*
	(Konjunktion)	*wahr*	&&	*falsch*	→	*falsch*
		falsch	&&	*falsch*	→	*falsch*
||	„oder“	*wahr*	||	*wahr*	→	*wahr*
	(Disjunktion)	*wahr*	||	*falsch*	→	*wahr*
		falsch	||	*falsch*	→	*falsch*
!	„nicht“		!	*wahr*	→	*falsch*
	(Negation, unär)		!	*falsch*	→	*wahr*

- Beachte: Operanden und Ergebnis sind vom Typ `int` [≠Java]
  - Operanden (Eingangsparameter): $0 \mapsto$ *falsch*, $\neq 0 \mapsto$ *wahr*
  - Ergebnis: *falsch* $\mapsto 0$, *wahr* $\mapsto 1$

Logische Operatoren – Auswertung [=Java]

- Die Auswertung eines logischen Ausdrucks wird abgebrochen, sobald das Ergebnis feststeht
  - Sei `int a = 5; int b = 3; int c = 7;`

$$\underbrace{\underbrace{a > b}_{1} \;||\; \underbrace{a > c}_{?}}_{1} \quad \longleftarrow$$

wird nicht ausgewertet, da der erste Term bereits *wahr* ergibt

$$\underbrace{\underbrace{a > c}_{0} \;\&\&\; \underbrace{a > b}_{?}}_{0} \quad \longleftarrow$$

wird nicht ausgewertet, da der erste Term bereits *falsch* ergibt

- Kann überraschend sein, wenn Teilausdrücke Nebeneffekte haben

```
int a = 5; int b = 3; int c = 7;
if ( a > c && !func(b) ) {···}      // func() will not be called
```

Zuweisungsoperatoren [=Java]

- Allgemeiner Zuweisungsoperator (=)
  - Zuweisung eines Wertes an eine Variable
  - Beispiel: `a = b + 23`
- Arithmetische Zuweisungsoperatoren (+=, −=, ...)
  - Abgekürzte Schreibweise zur Modifikation des Variablenwerts
  - Beispiel: `a += 23` ist äquivalent zu `a = a + 23`
  - Allgemein: `a` *op*`= b` ist äquivalent zu `a = a` *op* `b`
    für $op \in \{ +, -, \star, /, \%, <<, >>, \&, \hat{}, | \}$
- Beispiele

```
int a = 8;
a += 8;     // a: 16
a %= 3;     // a: 1
```

Zuweisungen sind Ausdrücke!

- Zuweisungen können in komplexere Audrücke geschachtelt werden
  - Das Ergebnis eines Zuweisungsausdrucks ist der zugewiesene Wert

```
int a, b, c;
a = b = c = 1;  // c: 1, b: 1, a: 1
```

  - Die Verwendung von Zuweisungen in beliebigen Ausdrücken führt zu **Nebeneffekten**, die nicht immer offensichtlich sind

```
a += b += c;    // Value of a and b?
```

Zuweisungen sind Ausdrücke!

- Zuweisungen können in komplexere Audrücke geschachtelt werden
  - Das Ergebnis eines Zuweisungsausdrucks ist der zugewiesene Wert

```
int a, b, c;
a = b = c = 1;  // c: 1, b: 1, a: 1
```

  - Die Verwendung von Zuweisungen in beliebigen Ausdrücken führt zu **Nebeneffekten**, die nicht immer offensichtlich sind

```
a += b += c;    // Value of a and b?
```

Besonders gefährlich: Verwendung von = statt ==

In C sind Wahrheitswerte Integers: $0 \mapsto$ *falsch*, $\emptyset \mapsto$ *wahr*

- Typischer „Anfängerfehler“ in Kontrollstrukturen:

```
if (a = 6) {···} else {···} // BUG: if-branch is always taken!!!
```

- Compiler beanstandet das Konstrukt nicht, es handelt sich um einen gültigen Ausdruck! $\rightsquigarrow$ Fehler wird leicht übersehen!

Bitoperationen [= Java]

- Bitweise Verknüpfung von Ganzzahltypen, kommutativ

&	bitweises „Und“ (Bit-Schnittmenge)	$1 \,\&\, 1 \rightarrow 1$ $1 \,\&\, 0 \rightarrow 0$ $0 \,\&\, 0 \rightarrow 0$
|	bitweises „Oder“ (Bit-Vereinigungsmenge)	$1 \mid 1 \rightarrow 1$ $1 \mid 0 \rightarrow 1$ $0 \mid 0 \rightarrow 0$
$\wedge$	bitweises „Exklusiv-Oder“ (Bit-Antivalenz)	$1 \wedge 1 \rightarrow 0$ $1 \wedge 0 \rightarrow 1$ $0 \wedge 0 \rightarrow 0$
~	bitweise Inversion (Einerkomplement, unär)	$\sim 1 \rightarrow 0$ $\sim 0 \rightarrow 1$

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)
- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
x=156	1	0	0	1	1	1	0	0	0x9c

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
x=156	1	0	0	1	1	1	0	0	0x9c
~x	0	1	1	0	0	0	1	1	0x63

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
`x=156`	1	0	0	1	1	1	0	0	`0x9c`
`~x`	0	1	1	0	0	0	1	1	`0x63`
`7`	0	0	0	0	0	1	1	1	`0x07`
`x | 7`	1	0	0	1	1	1	1	1	`0x9f`

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
`x=156`	1	0	0	1	1	1	0	0	`0x9c`
`~x`	0	1	1	0	0	0	1	1	`0x63`
`7`	0	0	0	0	0	1	1	1	`0x07`
`x | 7`	1	0	0	1	1	1	1	1	`0x9f`
`x & 7`	0	0	0	0	0	1	0	0	`0x04`

Bitoperationen (Forts.) [= Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
`x=156`	1	0	0	1	1	1	0	0	`0x9c`
`~x`	0	1	1	0	0	0	1	1	`0x63`
`7`	0	0	0	0	0	1	1	1	`0x07`
`x | 7`	1	0	0	1	1	1	1	1	`0x9f`
`x & 7`	0	0	0	0	0	1	0	0	`0x04`
`x ^ 7`	1	0	0	1	1	0	1	1	`0x9B`

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)
- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
x=156	1	0	0	1	1	1	0	0	0x9c
~x	0	1	1	0	0	0	1	1	0x63
7	0	0	0	0	0	1	1	1	0x07
x | 7	1	0	0	1	1	1	1	1	0x9f
x & 7	0	0	0	0	0	1	0	0	0x04
x ^ 7	1	0	0	1	1	0	1	1	0x9B
x << 2	0	1	1	1	0	0	0	0	0x70

Bitoperationen (Forts.) [=Java]

- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ
  - `<<` bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)
  - `>>` bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele (`x` sei vom Typ `uint8_t`)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
`x=156`	1	0	0	1	1	1	0	0	`0x9c`
`~x`	0	1	1	0	0	0	1	1	`0x63`
`7`	0	0	0	0	0	1	1	1	`0x07`
`x | 7`	1	0	0	1	1	1	1	1	`0x9f`
`x & 7`	0	0	0	0	0	1	0	0	`0x04`
`x ^ 7`	1	0	0	1	1	0	1	1	`0x9B`
`x << 2`	0	1	1	1	0	0	0	0	`0x70`
`x >> 1`	0	1	0	0	1	1	1	0	`0x4e`

Bitoperationen – Anwendung

- Durch Verknüpfung lassen sich gezielt einzelne Bits setzen/löschen

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0
PORTD	?	?	?	?	?	?	?	?

Bit 7 soll verändert werden, die anderen Bits jedoch erhalten bleiben!

Bitoperationen – Anwendung

- Durch Verknüpfung lassen sich gezielt einzelne Bits setzen/löschen

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0
`PORTD`	?	?	?	?	?	?	?	?
`0x80`	1	0	0	0	0	0	0	0
`PORTD |= 0x80`	1	?	?	?	?	?	?	?

Bit 7 soll verändert werden, die anderen Bits jedoch erhalten bleiben!

Setzen eines Bits durch **Ver-odern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist

Bitoperationen – Anwendung

- Durch Verknüpfung lassen sich gezielt einzelne Bits setzen/löschen

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0
`PORTD`	?	?	?	?	?	?	?	?
`0x80`	1	0	0	0	0	0	0	0
`PORTD |= 0x80`	1	?	?	?	?	?	?	?
`~0x80`	0	1	1	1	1	1	1	1
`PORTD &= ~0x80`	0	?	?	?	?	?	?	?

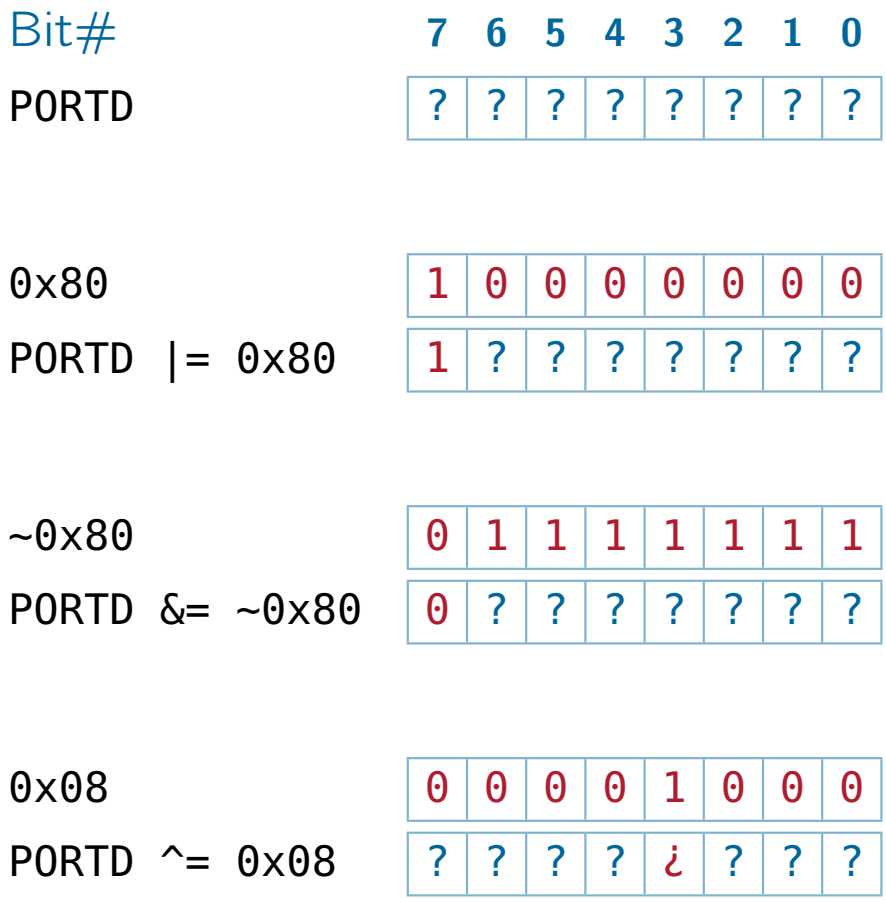
Bit 7 soll verändert werden, die anderen Bits jedoch erhalten bleiben!

Setzen eines Bits durch **Ver-odern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist

Löschen eines Bits durch **Ver-unden** mit Maske, in der nur das Zielbit 0 ist

Bitoperationen – Anwendung

- Durch Verknüpfung lassen sich gezielt einzelne Bits setzen/löschen



Bit 7 soll verändert werden, die anderen Bits jedoch erhalten bleiben!

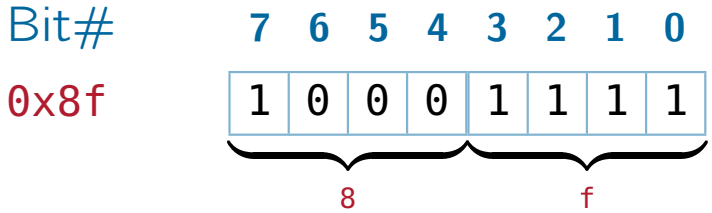
Setzen eines Bits durch **Ver-odern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist

Löschen eines Bits durch **Ver-unden** mit Maske, in der nur das Zielbit 0 ist

Invertieren eines Bits durch **Ver-xodern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist

Bitoperationen – Anwendung (Forts.)

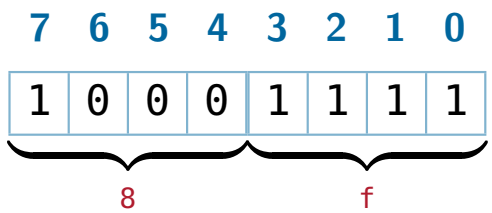
- Bitmasken werden gerne als Hexadezimal-Literale angegeben



Jede Hex-Ziffer repräsentiert genau ein Halb-Byte (*Nibble*) ⇝ Verständlichkeit

Bitoperationen – Anwendung (Forts.)

- Bitmasken werden gerne als Hexadezimal-Literale angegeben



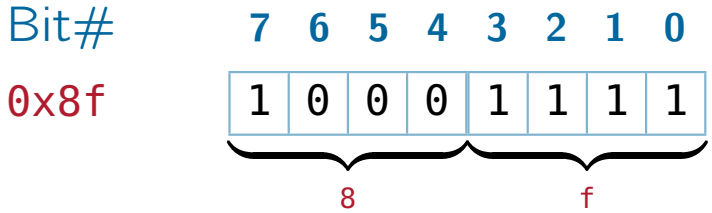
Jede Hex-Ziffer repräsentiert genau ein Halb-Byte (*Nibble*) ⇝ Verständlichkeit

- Für „Dezimal-Denker“ bietet sich die Linksschiebe-Operation an

```
PORTD |= (1<<7);    // set bit 7:  1<<7 --> 10000000
PORTD &= ~(1<<7);   // mask bit 7: ~(1<<7) --> 01111111
```

Bitoperationen – Anwendung (Forts.)

- Bitmasken werden gerne als Hexadezimal-Literale angegeben



Jede Hex-Ziffer repräsentiert genau ein Halb-Byte (*Nibble*) ⇝ Verständlichkeit

- Für „Dezimal-Denker“ bietet sich die Linksschiebe-Operation an

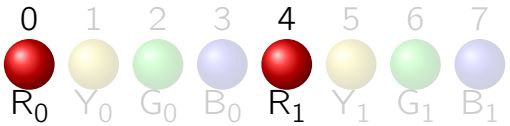
```
PORTD |= (1<<7);    // set bit 7:  1<<7 --> 10000000
PORTD &= ~(1<<7);   // mask bit 7: ~(1<<7) --> 01111111
```

- Zusammen mit der Oder-Operation auch für komplexere Masken

```
#include <led.h>
void main(void) {
  uint8_t mask = (1<<RED0) | (1<<RED1);

  sb_led_setMask (mask);

  while(1) ;
}
```

⇝ 

Bedingte Auswertung [≈Java]

- Formulierung von Bedingungen in Ausdrücken

  $Ausdruck_1$ **?** $Ausdruck_2$ **:** $Ausdruck_3$

  - Zunächst wird $Ausdruck_1$ ausgewertet
    - $Ausdruck_1 \neq 0$ (*wahr*) $\rightsquigarrow$ Ergebnis ist $Ausdruck_2$
    - $Ausdruck_1 = 0$ (*falsch*) $\rightsquigarrow$ Ergebnis ist $Ausdruck_3$
  - `?:` ist der einzige ternäre (dreistellige) Operator in C

- Beispiel

```
int abs(int a) {
  // if (a<0) return -a; else return a;
  return (a<0) ? -a : a;
}
```

Sequenzoperator

[≠Java]

- Reihung von Ausdrücken

  $Ausdruck_1$, $Ausdruck_2$

  - Zunächst wird $Ausdruck_1$ ausgewertet
    $\leadsto$ Nebeneffekte von $Ausdruck_1$ werden sichtbar
  - Ergebnis ist der Wert von $Ausdruck_2$

- Verwendung des Komma-Operators ist selten erforderlich!
  (Präprozessor-Makros mit Nebeneffekten)

Vorrangregeln bei Operatoren [≈Java]

	Klasse	Operatoren	Assoziativität
1	Funktionsaufruf, Feldzugriff	`x() x[]`	links → rechts
	Strukturzugriff	`x.y x->y`	
	Post-Inkrement/-Dekrement	`x++ x--`	
2	Prä-Inkrement/-Dekrement	`++x --x`	rechts → links
	unäre Operatoren	`+x -x ~x !x`	
	Adresse, Verweis (Zeiger)	`& *`	
	Typkonvertierung (cast)	`(<Typ>)x`	
	Typgröße	`sizeof(x)`	
3	Multiplikation, Division, Modulo	`* / %`	links → rechts
4	Addition, Subtraktion	`+ -`	links → rechts
5	Bitweises Schieben	`>> <<`	links → rechts
6	Relationaloperatoren	`< <= > >=`	links → rechts
7	Gleichheitsoperatoren	`== !=`	links → rechts
8	Bitweises UND	`&`	links → rechts
9	Bitweises OR	`|`	links → rechts
10	Bitweises XOR	`^`	links → rechts
11	Konjunktion	`&&`	links → rechts
12	Disjunktion	`||`	links → rechts
13	Bedingte Auswertung	`?:=`	rechts → links
14	Zuweisung	`= op=`	rechts → links
15	Sequenz	`,`	links → rechts

Typumwandlung in Ausdrücken

- Eine Operation wird *mindestens* mit `int`-Wortbreite berechnet
  - `short`- und `signed char`-Operanden werden implizit „aufgewertet“ (↪ *Integer Promotion*)
  - Erst das Ergebnis wird auf den Zieldatentyp abgeschnitten/erweitert

```
int8_t a=100, b=3, c=4, res;   // range: -128 --> +127

res   =   a   *   b   /   c   ; // promotion to int: 300 fits in!
```

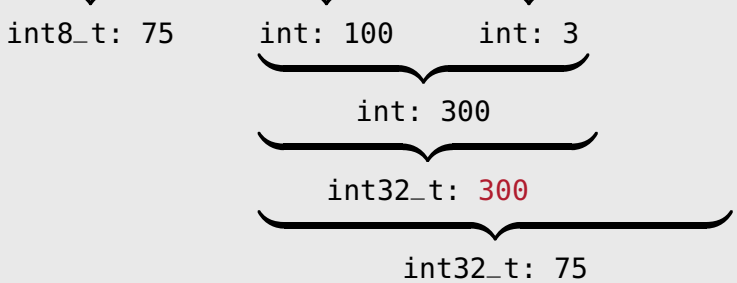
int8_t: 75 — int: 100 — int: 3 — int: 4 — int: 300 — int: 75

Typumwandlung in Ausdrücken (Forts.)

- Generell wird die *größte* beteiligte Wortbreite verwendet ↪ 6–3

```
  int8_t a=100, b=3, res;  // range: -128 --> +127
  int32_t c=4;             // range: -2147483648 --> +2147483647

  res   =   a   *   b   / c; // promotion to int32_t
```



Typumwandlung in Ausdrücken (Forts.)

- Fließkomma-Typen gelten dabei als „größer” als Ganzzahl-Typen
- Alle Fließkomma-Operationen werden *mindestens* mit `double`-Wortbreite berechnet

```
int8_t a=100, b=3, res;                    // range: -128 --> +127

res   =   a   *   b   /   4.0f   ;  // promotion to double
```

```
int8_t: 75    int: 100    int: 3    double 4.0
                 int: 300
                 double: 300.0
                          double: 75.0
```

Typumwandlung in Ausdrücken (Forts.)

- `unsigned`-Typen gelten dabei als „größer” als `signed`-Typen

```
int s = -1, res;            // range: -32768 --> +32767
unsigned u = 1;             // range: 0 --> 65535

res  =     s     < u;      // promotion to unsigned: -1 --> 65535
int: 0    unsigned: 65535
          unsigned: 0
```

↝ Überraschende Ergebnisse bei negativen Werten!

↝ Mischung von `signed`- und `unsigned`-Operanden vermeiden!

Typumwandlung in Ausdrücken – Typ-Casts

- Durch den Typ-Cast-Operator kann man einen Ausdruck gezielt in einen anderen Typ konvertieren

  (*Typ***)** *Ausdruck*

```
int s = -1, res;        // range: -32768 --> +32767
unsigned u = 1;         // range: 0 --> 65535

 res  = s < (int) u ;   // cast u to int
int: 1      int: 1
            int: 1
```