

7. Fließkommazahlen II

Fließkommazahlensysteme; IEEE Standard;
Grenzen der Fließkommaarithmetik;
Fließkomma-Richtlinien; Harmonische Zahlen

Flieskommazahlensysteme

Ein Flieskommazahlensystem ist durch vier natürliche Zahlen definiert:

- $\beta \geq 2$, die Basis,
- $p \geq 1$, die Präzision (Stellenzahl),
- e_{\min} , der kleinste Exponent,
- e_{\max} , der grösste Exponent.

Bezeichnung:

$$F(\beta, p, e_{\min}, e_{\max})$$

Flieskommazahlensysteme

$F(\beta, p, e_{\min}, e_{\max})$ enthält die Zahlen

$$\pm \sum_{i=0}^{p-1} d_i \beta^{-i} \cdot \beta^e,$$

$$d_i \in \{0, \dots, \beta - 1\}, \quad e \in \{e_{\min}, \dots, e_{\max}\}.$$

In Basis- β -Darstellung:

$$\pm d_0 \bullet d_1 \dots d_{p-1} \times \beta^e,$$

Flieskommazahlensysteme

Beispiel

■ $\beta = 10$

Darstellungen der Dezimalzahl 0.1

$$1.0 \cdot 10^{-1}, \quad 0.1 \cdot 10^0, \quad 0.01 \cdot 10^1, \quad \dots$$

Normalisierte Darstellung

Normalisierte Zahl:

$$\pm d_0 \bullet d_1 \dots d_{p-1} \times \beta^e, \quad d_0 \neq 0$$

Bemerkung 1

Die normalisierte Darstellung ist eindeutig und deshalb zu bevorzugen.

Bemerkung 2

Die Zahl 0 (und alle Zahlen kleiner als $\beta^{e_{\min}}$) haben keine normalisierte Darstellung (werden wir später beheben)!

Normalisierte Darstellung

Normalisierte Zahlen: $F^*(\beta, p, e_{\min}, e_{\max})$

Beispiel $F^*(2, 3, -2, 2)$

(nur positive Zahlen)

$d_0 \bullet d_1 d_2$	$e = -2$	$e = -1$	$e = 0$	$e = 1$	$e = 2$
1.00_2	0.25	0.5	1	2	4
1.01_2	0.3125	0.625	1.25	2.5	5
1.10_2	0.375	0.75	1.5	3	6
1.11_2	0.4375	0.875	1.75	3.5	7



Binäre und dezimale Systeme

- Intern rechnet der Computer mit $\beta = 2$
(binäres System)
- Literale und Eingaben haben $\beta = 10$
(dezimales System)
- Eingaben müssen umgerechnet werden!

Umrechnung dezimal \rightarrow binär

Angenommen, $0 < x < 2$.

■ Also: $x' = b_{-1} \cdot b_{-2} b_{-3} b_{-4} \dots = 2 \cdot (x - b_0)$

■ Schritt 1 (für x): Berechnen von b_0 :

$$b_0 = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \geq 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

■ Schritt 2 (für x): Berechnen von b_{-1}, b_{-2}, \dots :

Gehe zu Schritt 1 (für $x' = 2 \cdot (x - b_0)$)

Binärdarstellung von 1.1

x	b_i	$x - b_i$	$2(x - b_i)$
1.1	$b_0 = \mathbf{1}$	0.1	0.2
0.2	$b_{-1} = \mathbf{0}$	0.2	0.4
0.4	$b_{-2} = \mathbf{0}$	0.4	0.8
0.8	$b_{-3} = \mathbf{0}$	0.8	1.6
1.6	$b_{-4} = \mathbf{1}$	0.6	1.2
1.2	$b_{-5} = \mathbf{1}$	0.2	0.4

$\Rightarrow 1.000\overline{11}$, periodisch, *nicht* endlich

Binärdarstellungen von 1.1 und 0.1

- sind nicht endlich, also gibt es Fehler bei der Konversion in ein (endliches) binäres Fließkommazahlensystem.
- `1.1f` und `0.1f` sind nicht `1.1` und `0.1`, sondern geringfügig fehlerhafte Approximationen dieser Zahlen.
- In `diff.cpp`: $1.1 - 1.0 \neq 0.1$

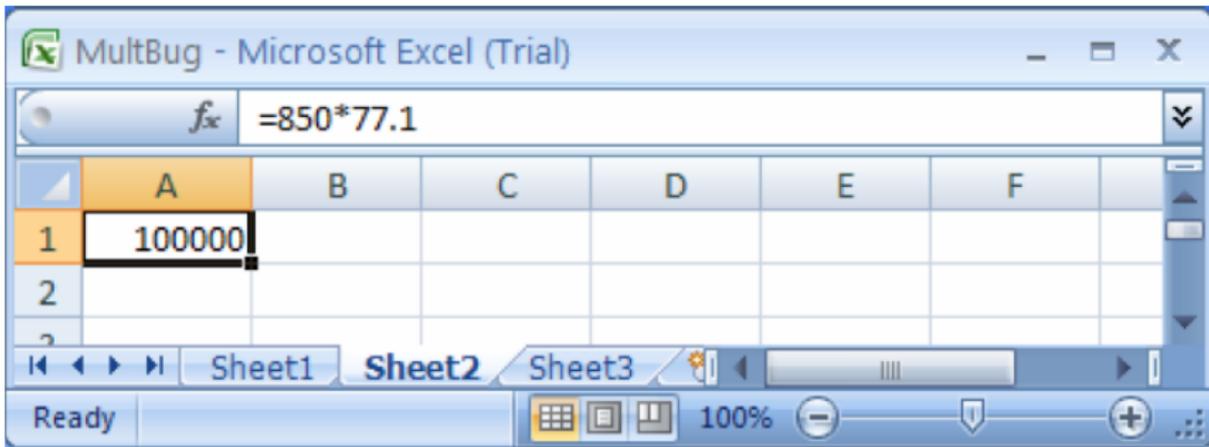
Binärdarstellungen von 1.1 und 0.1

auf meinem Computer:

$$\begin{aligned} \mathbf{1.1} &= \underline{1.100000000000000000}888178\dots \\ \mathbf{1.1f} &= \underline{1.1000000}238418\dots \end{aligned}$$

Der Excel-2007-Bug

```
std::cout << 77.1 * 850; // 65535
```



- 77.1 hat keine endliche Binärdarstellung, wir erhalten $65534.9999999999927\dots$
- Für diese und andere "seltene" Zahlen war die Rundung zur Ausgabe fehlerhaft.

Rechnen mit Fließkommazahlen

Beispiel ($\beta = 2, p = 4$):

$$\begin{array}{r} 1.111 \cdot 2^{-2} \\ + 1.011 \cdot 2^{-1} \\ \hline \end{array}$$

$$= 1.001 \cdot 2^0$$

1. Exponenten anpassen durch Denormalisieren einer Zahl
2. Binäre Addition der Signifikanden
3. Renormalisierung
4. Runden auf p signifikante Stellen, falls nötig

Der IEEE Standard 754

- legt Fließkommazahlensysteme und deren Rundungsverhalten fest
- wird fast überall benutzt
- Single precision (**float**) Zahlen:

$$F^*(2, 24, -126, 127) \quad \text{plus } 0, \infty, \dots$$

- Double precision (**double**) Zahlen:

$$F^*(2, 53, -1022, 1023) \quad \text{plus } 0, \infty, \dots$$

- Alle arithmetischen Operationen runden das *exakte* Ergebnis auf die nächste darstellbare Zahl

Der IEEE Standard 754

Warum

$$F^*(2, 24, -126, 127)?$$

- 1 Bit für das Vorzeichen
- 23 Bit für den Signifikanden (führendes Bit ist 1 und wird nicht gespeichert)
- 8 Bit für den Exponenten (256 mögliche Werte)(254 mögliche Exponenten, 2 Spezialwerte: 0, ∞ ,...)

⇒ insgesamt 32 Bit.

Der IEEE Standard 754

Warum

$$F^*(2, 53, -1022, 1023)?$$

- 1 Bit für das Vorzeichen
- 52 Bit für den Signifikanden (führendes Bit ist 1 und wird nicht gespeichert)
- 11 Bit für den Exponenten (2046 mögliche Exponenten, 2 Spezialwerte: 0, ∞ , ...)

⇒ insgesamt 64 Bit.

Regel 1

Teste keine gerundeten Fließkommazahlen auf Gleichheit!

```
for (float i = 0.1; i != 1.0; i += 0.1)
    std::cout << i << "\n";
```

Endlosschleife, weil i niemals exakt 1 ist!

Regel 2

Addiere keine zwei Zahlen sehr unterschiedlicher Grösse!

$$\begin{aligned} & 1.000 \cdot 2^4 \\ & + 1.000 \cdot 2^0 \\ & = 1.0001 \cdot 2^4 \end{aligned}$$

“=” $1.000 \cdot 2^4$ (Rundung auf 4 Stellen)

Addition von 1 hat keinen Effekt!

- Die n -te Harmonische Zahl ist

$$H_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \approx \ln n.$$

- Diese Summe kann vorwärts oder rückwärts berechnet werden, was mathematisch gesehen natürlich äquivalent ist.

```
// Program: harmonic.cpp
// Compute the n-th harmonic number in two ways.

#include <iostream>

int main()
{
    // Input
    std::cout << "Compute H_n for n =? ";
    unsigned int n;
    std::cin >> n;

    // Forward sum
    float fs = 0;
    for (unsigned int i = 1; i <= n; ++i)
        fs += 1.0f / i;

    // Backward sum
    float bs = 0;
    for (unsigned int i = n; i >= 1; --i)
        bs += 1.0f / i;

    // Output
    std::cout << "Forward sum = " << fs << "\n"
              << "Backward sum = " << bs << "\n";
    return 0;
}
```

Ergebnisse:



```
Compute H_n for n =? 10000000  
Forward sum = 15.4037  
Backward sum = 16.686
```



```
Compute H_n for n =? 100000000  
Forward sum = 15.4037  
Backward sum = 18.8079
```

Beobachtung:

- Die Vorwärtssumme wächst irgendwann nicht mehr und ist “richtig” falsch.
- Die Rückwärtssumme approximiert H_n gut.

Erklärung:

- Bei $1 + 1/2 + 1/3 + \dots$ sind späte Terme zu klein, um noch beizutragen.
- Problematik wie bei $2^4 + 1 = 2^4$

Regel 3

Subtrahiere keine zwei Zahlen sehr ähnlicher Grösse!

Auslöschungsproblematik, siehe Skript.

David Goldberg: What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic (1991)



Randy Glasbergen, 1996

8. Funktionen I

Funktionsdefinitionen- und Aufrufe, Auswertung von Funktionsaufrufen, Der Typ `void`, Vor- und Nachbedingungen

Funktionen

- kapseln häufig gebrauchte Funktionalität (z.B. Potenzberechnung) und machen sie einfach verfügbar
- strukturieren das Programm: Unterteilung in kleine Teilaufgaben, jede davon durch eine Funktion realisiert

Prozedurales Programmieren⁶



⁶Prozedur: anderes Wort für Funktion.

Beispiel: Potenzberechnung

```
// input
std::cout << "Compute a^n for a =? ";
double a;
std::cin >> a;
std::cout << "and n =? ";
int n;
std::cin >> n;
```

```
double result = 1.0;
if (n < 0) { // a^n = (1/a)^(-n)
    a = 1.0/a;
    n = -n;
}
for (int i = 0; i < n; ++i)
    result *= a;
```

 "Funktion pow"

```
std::cout << a << "^" << n << " = " << resultpow(a, n) << ".\\n";
```

Funktion zur Potenzberechnung

```
// PRE: e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow(double b, int e){
    double result = 1.0;
    if (e < 0) { // b^e = (1/b)^(-e)
        b = 1.0/b;
        e = -e;
    }
    for (int i = 0; i < e; ++i)
        result *= b;
    return result;
}
```

Programm zur Potenzberechnung

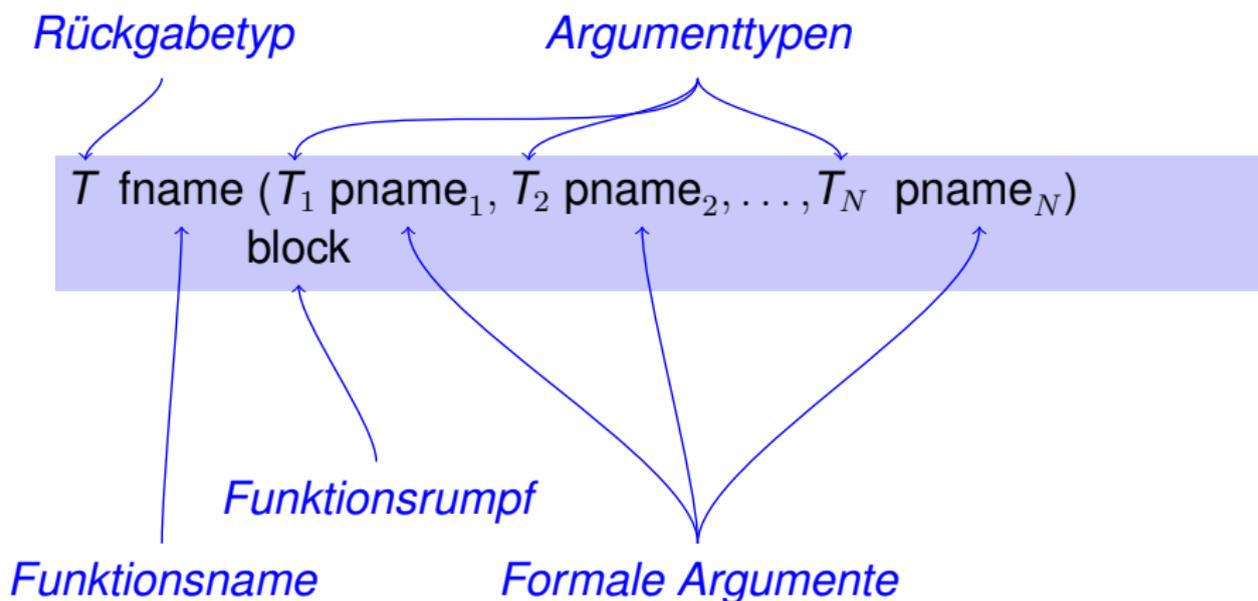
```
// Prog: callpow.cpp
// Define and call a function for computing powers.
#include <iostream>
```

```
// PRE: e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
    double result = 1.0;
    if (e < 0) {
        b = 1.0/b;
        e = -e;
    }
    for (int i = 0; i < e; ++i)
        result *= b;
    return result;
}
```

```
int main()
{
    std::cout << pow( 2.0, -2) << "\n"; // outputs 0.25
    std::cout << pow( 1.5,  2) << "\n"; // outputs 2.25
    std::cout << pow(-2.0,  9) << "\n"; // outputs -512

    return 0;
}
```

Funktionsdefinitionen



Funktionsdefinitionen

- dürfen nicht *lokal* auftreten, also nicht in Blocks, nicht in anderen Funktionen und nicht in Kontrollanweisungen
- können im Programm ohne Trennsymbole aufeinander folgen

```
double pow (double b, int e)
{
    ...
}

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

Beispiel: Xor

```
// post: returns l XOR r
bool Xor(bool l, bool r)
{
    return l && !r || !l && r;
}
```

Beispiel: Harmonic

```
// PRE: n >= 0
// POST: returns nth harmonic number
//       computed with backward sum
float Harmonic(int n)
{
    float res = 0;
    for (unsigned int i = n; i >= 1; --i)
        res += 1.0f / i;
    return res;
}
```

Beispiel: min

```
// POST: returns the minimum of a and b
int min(int a, int b)
{
    if (a<b)
        return a;
    else
        return b;
}
```

pow

```
// PRE: e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow(double b, int e){
    double result = 1.0;
    if (e < 0) { // b^e = (1/b)^(-e)
        b = 1.0/b;
        e = -e;
    }
    for (int i = 0; i < e; ++i)
        result *= b;
    return result;
}
```

- Aussagekräftige Namen (**b**ase, **e**xponent)
- Vor- und Nachbedingungen – Funktionalität

Funktionsaufrufe

$fname (expression_1, expression_2, \dots, expression_N)$

- Alle Aufrufargumente müssen konvertierbar sein in die entsprechenden Argumenttypen.
- Der Funktionsaufruf selbst ist ein Ausdruck vom Rückgabebetyp. Wert und Effekt wie in der Nachbedingung der Funktion *fname* angegeben.

Beispiel: **pow (a, n)** : Ausdruck vom Typ **double**

Funktionsaufrufe

Für die Typen, die wir bisher kennen, gilt:

- Aufrufargumente und Aufrufargumente sind R-Werte
- Funktionsaufruf selbst ist R-Wert.

fname: R-Wert \times R-Wert $\times \dots \times$ R-Wert \longrightarrow R-Wert

Auswertung eines Funktionsaufrufes

- Auswertung der Aufrufargumente
- Initialisierung der formalen Argumente mit den resultierenden Werten
- Ausführung des Funktionsrumpfes: formale Argumente verhalten sich dabei wie lokale Variablen
- Ausführung endet mit **return *expression***;

Rückgabewert ergibt den Wert des Funktionsaufrufes.

Beispiel: Auswertung Funktionsaufruf

Aufruf von power

```
double pow(double b, int e)
{
    assert (e >= 0 || b != 0);
    double result = 1.0;
    if (e<0) {
        //  $b^e = (1/b)^{-e}$ 
        b = 1.0/b;
        e = -e;
    }
    for (int i = 0; i < e ; ++i)
        result * = b;
    return result;
}
```

Rückgabe

...
pow (2.0, -2)

Formale Funktionsargumente⁷

- Deklarative Region: Funktionsdefinition
- sind ausserhalb der Funktionsdefinition *nicht* sichtbar
- werden bei jedem Aufruf der Funktion neu angelegt (automatische Speicherdauer)
- Änderungen ihrer Werte haben keinen Einfluss auf die Werte der Aufrufargumente (Aufrufargumente sind R-Werte)

⁷oder „formale Parameter“

Gültigkeit formaler Argumente

```
double pow(double b, int e){
    double r = 1.0;
    if (e<0) {
        b = 1.0/b;
        e = -e;
    }
    for (int i = 0; i < e ; ++i)
        r * = b;
    return r;
}
```

```
int main(){
    double b = 2.0;
    int e = -2;
    double z = pow(b, e);

    std::cout << z; // outputs 0.25
    std::cout << b; // outputs 2
    std::cout << e; // outputs -2
    return 0;
}
```

Nicht die formalen Argumente **b** und **e** von `pow`, sondern die hier definierten Variablen lokal zum Rumpf von `main`



Der Typ `void`

- Fundamentaler Typ mit leerem Wertebereich
- Verwendung als Rückgabebetyp für Funktionen, die *nur* einen Effekt haben

```
// POST: "(i, j)" has been written to
//      standard output
void print_pair (const int i, const int j)
{
    std::cout << "(" << i << ", " << j
                << ")\n";
}

int main()
{
    print_pair(3,4); // outputs (3, 4)
    return 0;
}
```

void-Funktionen

- benötigen kein **return**.
- Ausführung endet, wenn Ende des Funktionsrumpfes erreicht wird oder
- **return**; erreicht wird
oder
- **return** *expression*; erreicht wird.



Ausdruck vom Typ **void** (z.B.
Aufruf einer Funktion mit
Rückgabety **void**)

Vor- und Nachbedingungen

- beschreiben (möglichst vollständig) was die Funktion „macht“
- dokumentieren die Funktion für Benutzer / Programmierer (wir selbst oder andere)
- machen Programme lesbarer: wir müssen nicht verstehen, *wie* die Funktion es macht
- werden vom Compiler ignoriert
- Vor- und Nachbedingungen machen – unter der Annahme ihrer Korrektheit – Aussagen über die Korrektheit eines Programmes möglich.

Vorbedingungen

Vorbedingung (precondition):

- Was muss bei Funktionsaufruf gelten?
- Spezifiziert *Definitionsbereich* der Funktion.

0^e ist für $e < 0$ undefiniert

```
// PRE: e >= 0 || b != 0.0
```

Nachbedingungen

Nachbedingung (postcondition):

- Was gilt nach Funktionsaufruf?
- Spezifiziert *Wert* und *Effekt* des Funktionsaufrufes.

Hier nur Wert, kein Effekt.

```
// POST: return value is  $b^e$ 
```

Vor- und Nachbedingungen

- sollten korrekt sein:
- *Wenn* die Vorbedingung beim Funktionsaufruf gilt, *dann* gilt auch die Nachbedingung nach dem Funktionsaufruf.

Funktion `pow`: funktioniert für alle Basen $b \neq 0$

Vor- und Nachbedingungen

- Gilt Vorbedingung beim Funktionsaufruf nicht, so machen wir keine Aussage.
- C++-Standard-Jargon: „Undefined behavior“.

Funktion `pow`: Division durch 0

Vor- und Nachbedingungen

- Vorbedingung sollte so *schwach* wie möglich sein (möglichst grosser Definitionsbereich)
- Nachbedingung sollte so *stark* wie möglich sein (möglichst detaillierte Aussage)

Fromme Lügen... sind erlaubt.

```
// PRE: e >= 0 || b != 0.0  
// POST: return value is b^e
```

ist formal inkorrekt:

- Überlauf, falls e oder b zu gross sind
- b^e vielleicht nicht als double Wert darstellbar (Löcher im Wertebereich)

Die exakten Vor- und Nachbedingungen sind plattformabhängig und meist sehr kompliziert. Wir abstrahieren und geben die mathematischen Bedingungen an. \Rightarrow Kompromiss zwischen formaler Korrektheit und lascher Praxis.

Prüfen von Vorbedingungen...

- Vorbedingungen sind nur Kommentare.
- Wie können wir *sicherstellen*, dass sie beim Funktionsaufruf gelten?

```
#include <cassert>
...
// PRE: e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow(double b, int e) {
    assert (e >= 0 || b != 0);
    double result = 1.0;
    ...
}
```

Assertions: Syntax und Semantik

```
assert ( expression )
```

- *expression*: Ausdruck, dessen Wert nach `bool` konvertierbar ist.
- Semantik:
 - Fall *expression* `== true`: kein Effekt
 - Falls *expression* `== false`: Programm wird mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.

Assertions – Empfehlung

- Assertions sind ein wichtiges Werkzeug zur Fehlervermeidung während der Programmentwicklung, wenn man sie *konsequent* und *oft* einsetzt.
- Der Laufzeit-Overhead ist vernachlässigbar. Darüber hinaus kann der Compiler angewiesen werden, die Assertions „hinauszukompilieren“, also zu ignorieren.

Ausnahmen (Exception Handling)

- Assertions sind ein grober Hammer; falls eine Assertion fehlschlägt, wird das Programm hart abgebrochen.
- C++ bietet elegantere Mittel (Exceptions), um auf solche Fehlschläge situationsabhängig (und oft auch ohne Programmabbruch) zu reagieren.
- “Narrensichere” Programmen sollten nur im Notfall abbrechen und deshalb mit Exceptions arbeiten; für diese Vorlesung führt das aber zu weit.