

Echtzeitsysteme - Übungen

System-Software-Entwicklung

Sommersemester 2024

Eva Dengler Peter Wägemann

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Übersicht

Wiederholung: Stack-Aufbau

Standards in der Softwareentwicklung

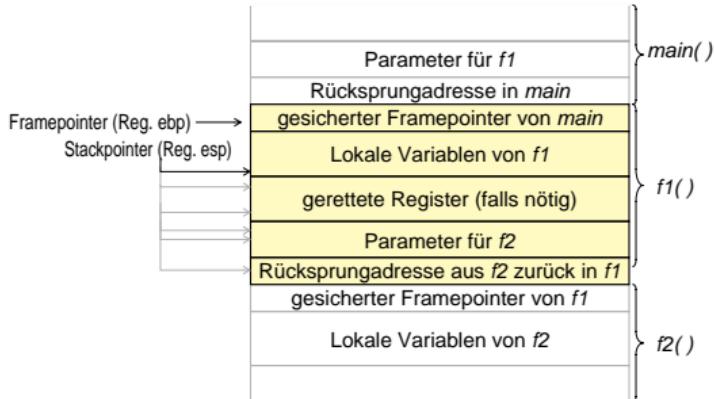
Verwendung von Fließkommazahlen

Überblick: Toolchain

Hardware

Wiederholung: Stack-Aufbau

```
1 int main() {  
2     int a, b, c;  
3  
4     a = 10;  
5     b = 20;  
6  
7     f1(a, b);  
8  
9     return a;  
10 }
```



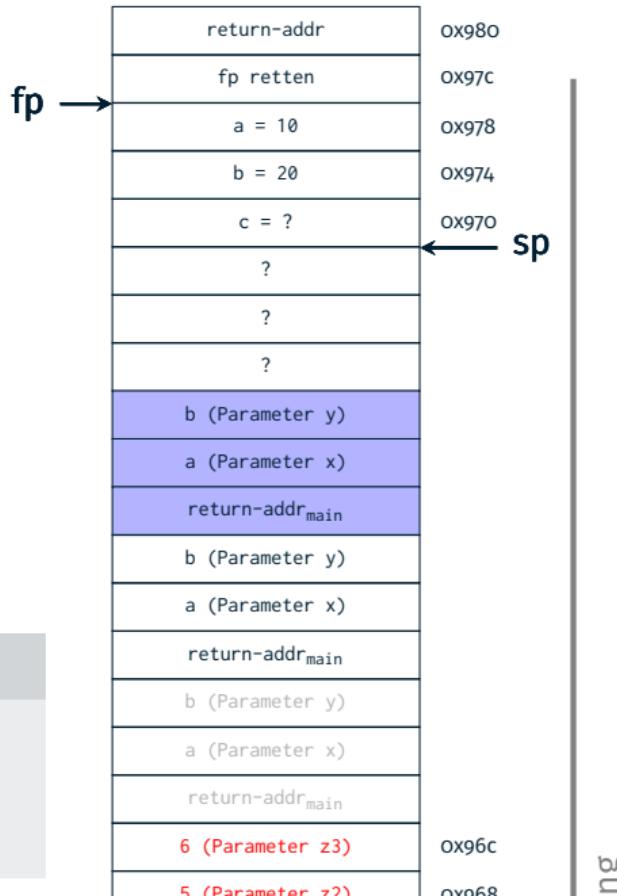
- Stack-Frame zur Verwaltung des Stacks
 - Lokale Variablen
 - Funktionsparameter
 - Rücksprungadressen
- Register zur Verwaltung des Stacks
 - Stackpointer: Zeigt auf nächsten freien Speicherbereich
 - Framepointer: Zeigt auf Beginn des aktuellen Stackframes

Ablauf Funktionsaufruf

```
int main(void) {  
    int a, b , c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return a;  
}  
  
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return n;  
} →  
→  
→  
→  
  
int f2(int z) {  
    int m;  
→    m = 100;  
→    return z+1;  
} →  
→  
→  
→  
int main(void) {  
    int a, b , c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
} →  
→
```

Stackframe abräumen
Was passiert bei weiterem
■ $sp = fp$
Funktionsaufruf?

- $fp = pop(sp)$
-



Übersicht

Wiederholung: Stack-Aufbau

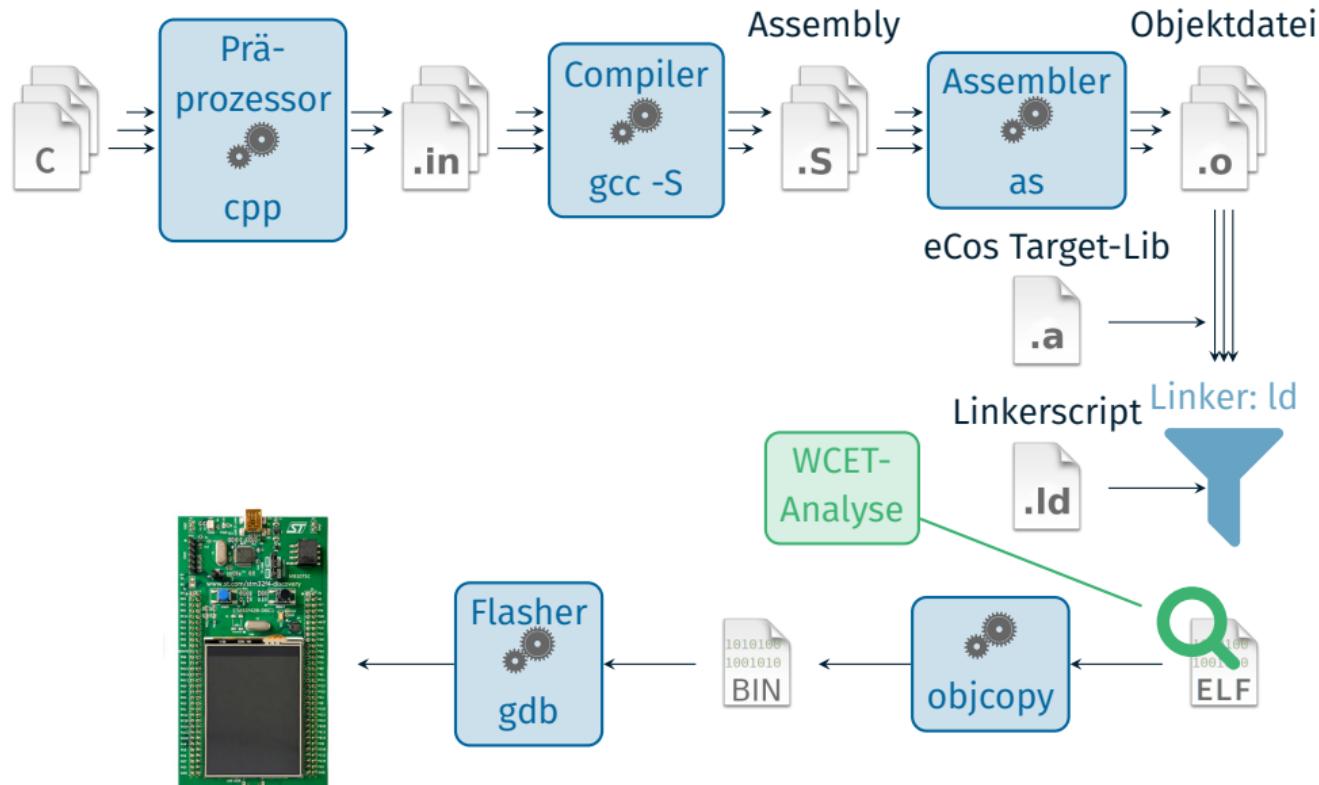
Standards in der Softwareentwicklung

Verwendung von Fließkommazahlen

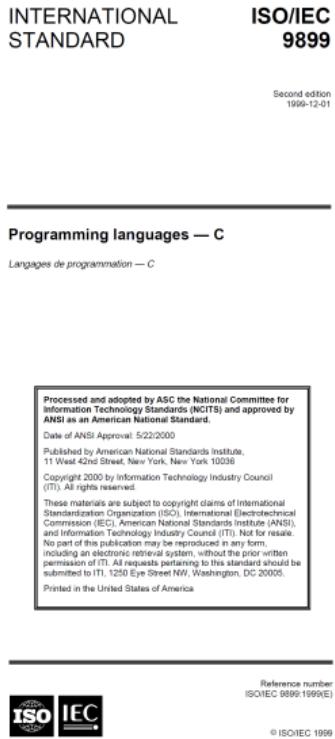
Überblick: Toolchain

Hardware

EZS-Toolchain



C Standard



- Mehrere Iterationen:
C89, C99, C11, C18
- Früher ANSI, heute ISO/IEC Standards:
 - ANSI X3.159-1989
 - ISO/IEC 9899:1990
 - ...
- Unabhängiger Standard, von ISO entwickelt
- Beschreibt C Syntax & Semantik

6.5.5 Multiplicative operators

Syntax

```
multiplicative-expression:
    cast-expression
    multiplicative-expression * cast-expression
    multiplicative-expression / cast-expression
    . . .
```

3.4.3

undefined behavior

behavior, upon use of a nonportable or erroneous program construct or of erroneous data, for which this International Standard imposes no requirements

NOTE Possible undefined behavior ranges from ignoring the situation completely with unpredictable results, to behaving during translation or program execution in a documented manner characteristic of the environment (with or without the issuance of a diagnostic message), to terminating a translation or execution (with the issuance of a diagnostic message).

EXAMPLE An example of undefined behavior is the behavior on integer overflow.

Source: ISO/IEC 9899:TC3, S.4

Source: ISO/IEC 9899:TC3, S.94

Übersicht

Wiederholung: Stack-Aufbau

Standards in der Softwareentwicklung

Verwendung von Fließkommazahlen

Überblick: Toolchain

Hardware

Frage #1

Zu was wird $7/2$ ausgewertet?

1. 3.5
2. 3
3. nicht definiert in C

Erklärung

- Standard-Typ für Ganzzahlen ist `int`
- Rest verschwindet bei Ganzzahl-Division

Frage #2

Zu was wird $2/7$ ausgewertet?

1. 1
2. 0
3. nicht definiert in C

Erklärung

- Standard-Typ für Ganzzahlen ist `int`
- Rest verschwindet bei Ganzzahl-Division

Frage #3

Zu was wird $7/2.$ ausgewertet?

1. immer noch 3
2. 0
3. 3.5

Erklärung

- $2.0 == 2.$ $\leadsto \text{double}$ auf der rechten Seite
- 7 wird in diesem Ausdruck als `double` behandelt, auch linke Seite
- Division zweier `double` Werte

Frage #5

Zu was wird $1/2 + 1/2$ ausgewertet?

1. nicht definiert
2. 0
3. 1 (dank Compileroptimierung)

Erklärung

- $\text{int}_1 / \langle \text{größerer } \text{int}_2 \rangle \rightsquigarrow 0 + 0 = 0$
- Compileroptimierung nicht C-Konform

Frage #6

Zu was wird `2 * M_PI` ausgewertet?

1. 6
2. ungefähr 6.28
3. 6.283185307179586476925286766559005768394338798750...

Erklärung

- `M_PI` \leadsto `double`
- `double` Standard-Typ, außer zusätzliches Literal (3.14 f)
- Begrenzter Wertebereich:
`6.2831853071795860000000000000000`

Frage #7

```
1 double a = 0.1;
2 double b = 0.2;
3
4 float aa = 0.1;
5 float bb = 0.2;
6
7 if (a+b == aa+bb){
8     ezs_printf("equal\n");
9 }else{
10     ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
11 }
```

Was wird ausgegeben?

1. equal
2. unequal...

Fließkomma-Arithmetik

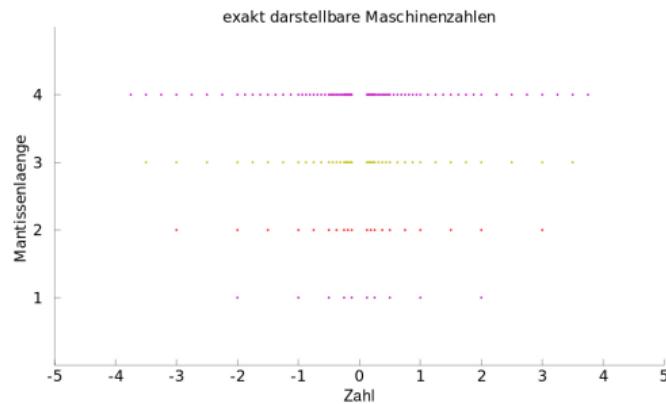
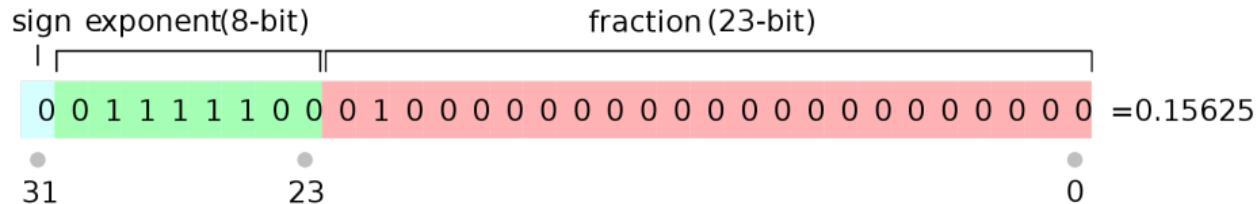
```
1 double a = 0.1;
2 double b = 0.2;
3
4 float aa = 0.1;
5 float bb = 0.2;
6
7 if (a+b == aa+bb){
8     ezs_printf("equal\n");
9 }else{
10    ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
11 }
```



```
1 /* Ausgabe:
2 unequal:
3 0.30000000000000000000000000000000 != 
4 0.30000011920929000000000000000000
5 */
```

- Angenommen die Einheit ist Sekunden
 - 11,9 ns Fehler durch *einzelne Berechnung*
 - Kumulation der Rundungsfehler

Begrenzte Wertebereiche – IEEE 754



■ IEEE 754

- `sizeof(float) == 4`
- `sizeof(double) == 8`

Probleme begrenzter Wertebereiche

- *What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic [1]*
- Rundungsfehler & Überläufe äußerst kritisch in *harten Echtzeitsystemen*
- Konvertierungen zwischen Größeneinheiten (sec_to_nsec: * 1e9)
- Vermeidung des Wechsels von Größeneinheiten
- Verwendung von Festkomma-Arithmetik \leadsto VEZS
- Integer-Division ist *kein sicherer Ausweg*
 \Rightarrow *Sorgfalt bei arithmetischen Operationen in begrenzten Wertebereichen*

Wahl des Datentyps bei Berechnung des Sinus-Wertes

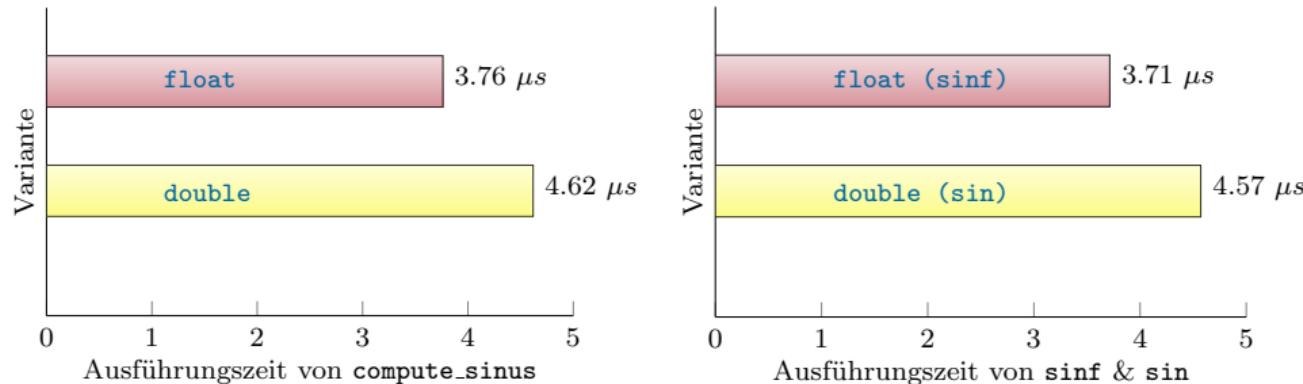
- Harmonische Schwingung¹: $y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$ und $\omega = 2\pi f$

```
1 #define TYPE {int|double|float} ?
2 ...
3 TYPE compute_sinus(OTHER_TYPE real_time) {
4     TYPE f      = ...
5     TYPE omega = 2 * M_PI * f;
6     ...
7     ... sin(omega * real_time) // oder doch sinf(omega * real_time)?
8     ...
9 }
10 }
```

- float oder double für Realzeit sinnvoll? Was ist OTHER_TYPE?
- Laufzeit von compute_sinus()?

¹https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung#Harmonische_Schwingung

Vergleich der Laufzeiten



- Laufzeitzuwachs um **23 %** bei Wechsel `float` → `double`
- Soft Float? Hard Float? hier: Soft Float
- Noch mehr Optimierungspotential? Wo wird die Laufzeit verbraucht?
 - **99 %** der Gesamtlaufzeit für `sinf` und `sin`
- Wahl des Datentyps in Abh. der Wortbreite (32-Bit Cortex-M4, 8-Bit AVR)
- Spezialbibliothek für Signalverarbeitung mit Integer-Arithmetik
- Spezielle Hardware-Einheiten zur Signalverarbeitung

Übersicht

Wiederholung: Stack-Aufbau

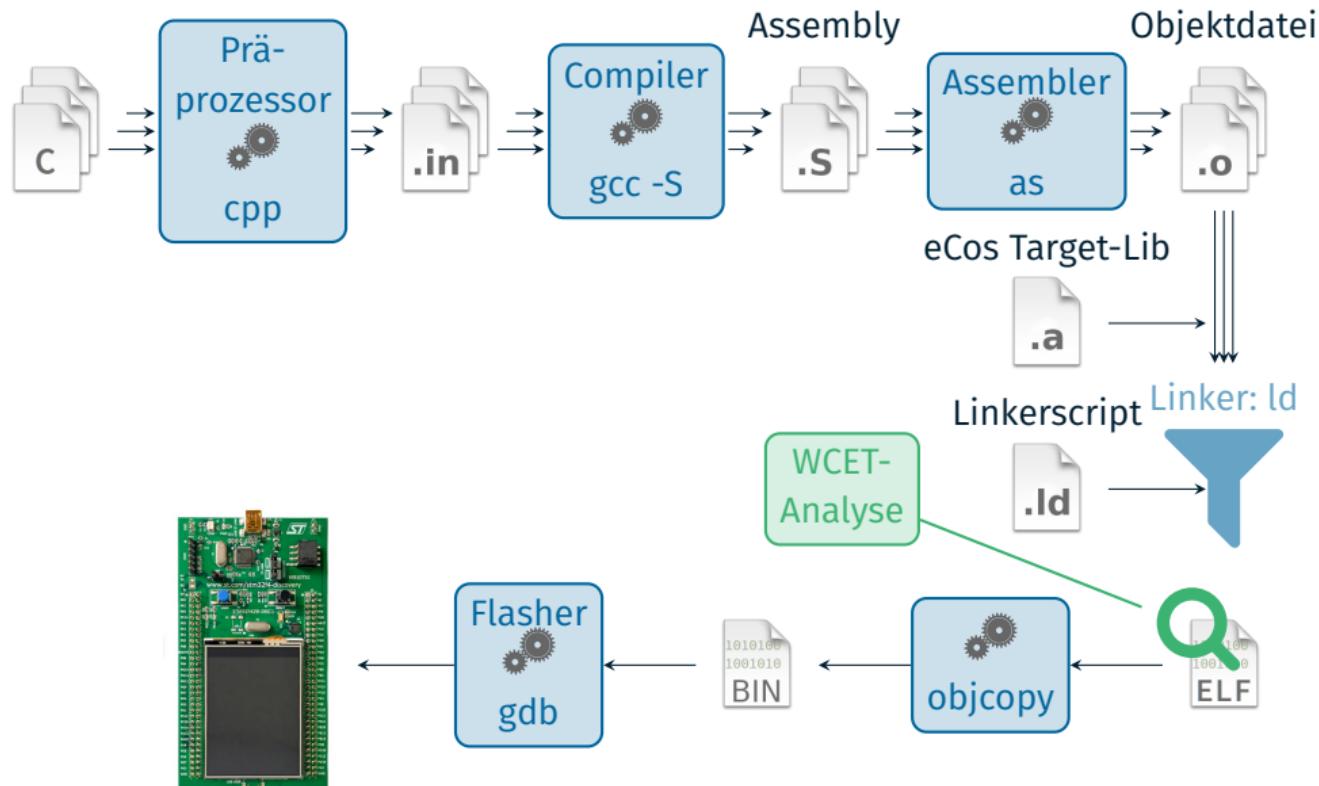
Standards in der Softwareentwicklung

Verwendung von Fließkommazahlen

Überblick: Toolchain

Hardware

EZS-Toolchain



Präprozessor

Quellcode

```
1 #define FOO 42
2
3 #include "example.h"
4
5 #if defined(FOO)
6     int i = FOO;
7 #else
8     int i = 0;
9 #endif
```

Expandiert

```
1 // Inhalt example.h
2 void example();
3
4 int i = 42;
```

Präprozessor

- Vorverarbeitungsschritt vor der Übersetzung
 - Konfigurationsabhängiger Code `#if(def)`
 - Definierbare Konstanten und Makros `#define`
 - Auflösen von `#include`-Direktiven
- Reine Zeichenersetzung/Textmanipulation

Übersetzer

Quellcode

```
1 volatile extern int i;
2 int j = 42;
3
4 int main(int argc, ...)
5 {
6     i = 0;
7     if(argc % 2) {
8         i = 1;
9     }
10    return i + j;
11 }
```

Assembly

```
...
ldr r3, [fp, #-8]
and r3, r3, #1
cmp r3, #0
beq .L2
ldr r3, .L4
mov r2, #1
str r2, [r3]
.L2:
...
```

Übersetzer

- Interpretation des Quelltextes gemäß Semantik laut Standard
- Umwandlung in Befehlssatz der Zielplattform
- Aufrufe gemäß Application Binary Interface (ABI)
- Optimierung des Kompilats

Beispiel: Schleifenaufrollen

Unoptimiert

```
1 for(i = 0; i < 40; i++) {  
2     x++;  
3 }  
4 x++;  
5 x++;
```

Größenoptimiert

```
1 for(i = 0; i < 42; i++) {  
2     x++;  
3 }
```

Laufzeitverhalten

- Optimierungen verändern Kontrollflussstrukturen
 - Schleifenaufrollen (siehe oben)
 - Schleifentauschen (loop interchange)
 - Schleifenneigen (loop skewing)
 - if-conversion
 - ...

~ invalidiert z.T. Annotationen und Annahmen über Laufzeitverhalten

Assembler

Assembly

```
...
ldr r3, [fp, #-8]
and r3, r3, #1
cmp r3, #0
beq .L2
ldr r3, .L4
mov r2, #1
str r2, [r3]
.L2:
...
...
```

Objektdatei

```
...
e51b3008
e2033001
e3530000
0a000002
e59f3028
e3a02001
e5832000
...
...
```

Assembler

- Umwandlung der textuellen Repräsentation in Maschinencode (binär)
- 1:1 Übersetzung
- z.T. Macroassembler: Komplexbefehle zu Instruktionsfolge

Linker

Objektdatei

```
$ nm test.o
      U i      # extern int i
00000000 D j
00000000 T main

$ nm i.o
00000004 C i      # Definition int i = 0
```

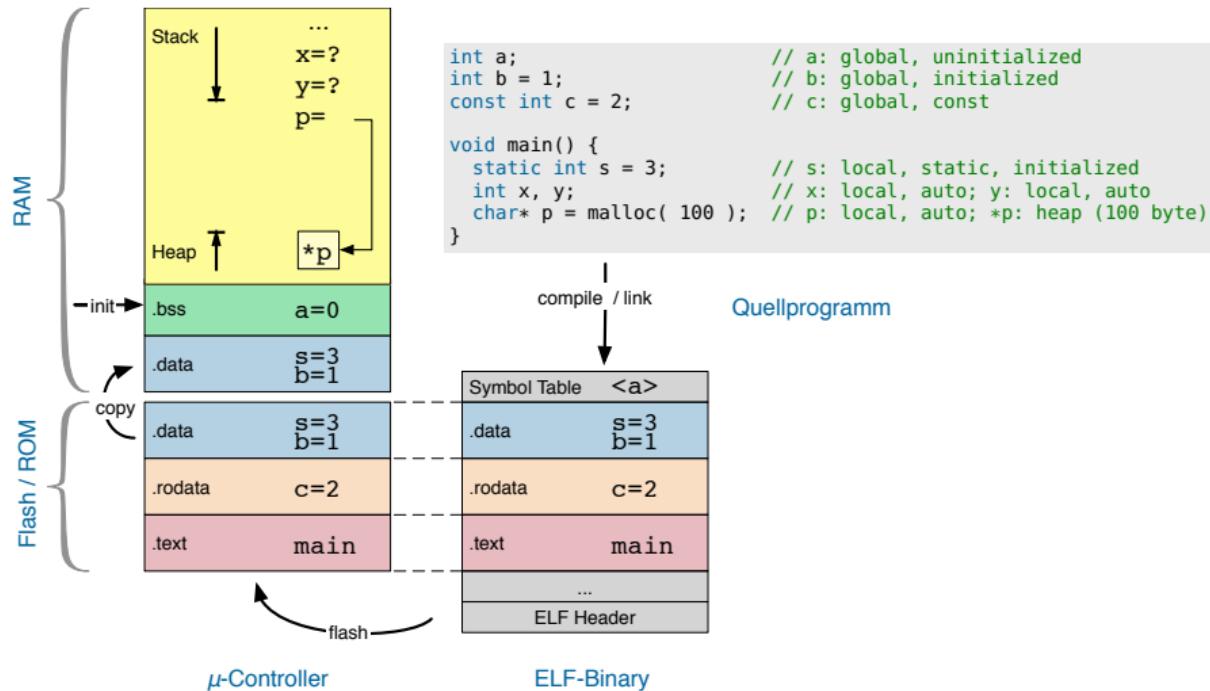
Binary

```
$ nm test.elf
00018a84 B i
00018634 D j
000081ec T main
...
```

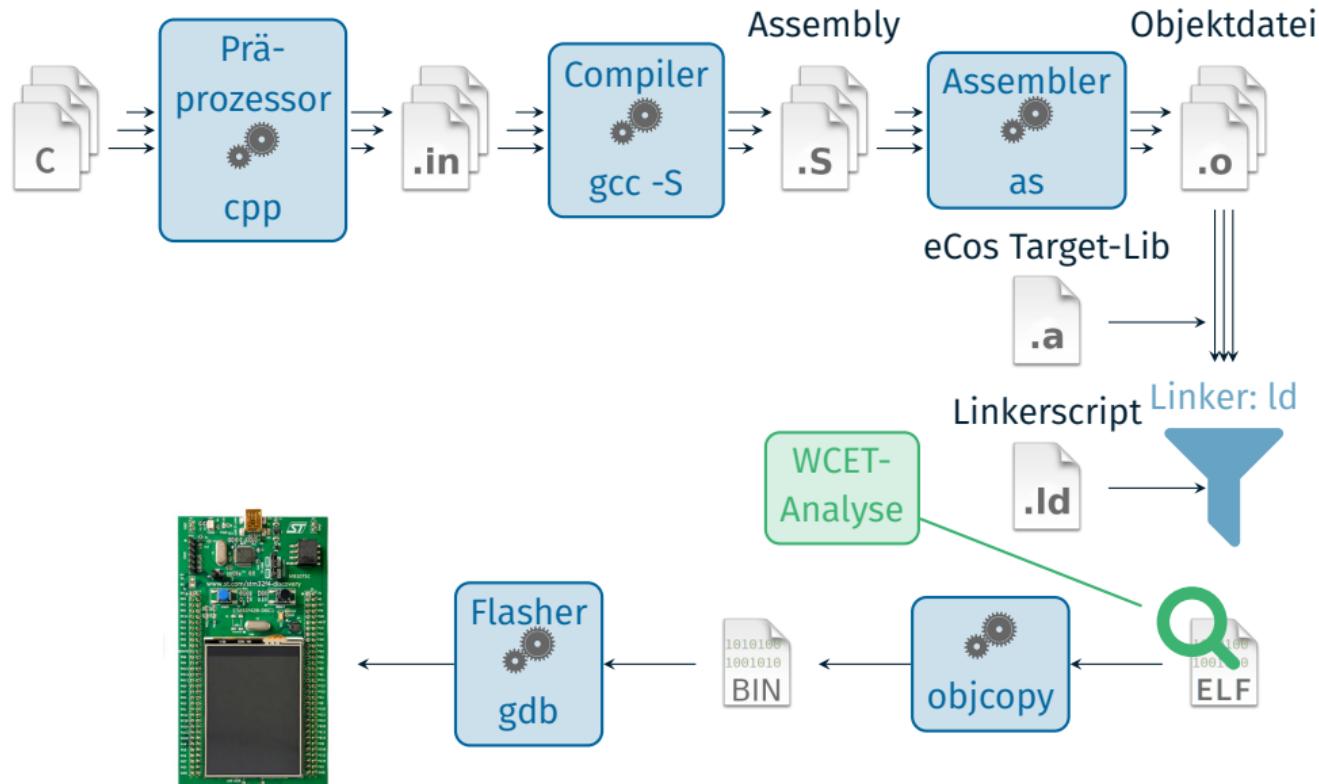
Linker

- Variablen/Funktionen über Objektdateien verteilt
 - ~ Zusammenführung der Funktionen und Variablen aus Objektdateien
 - ~ Vergabe globaler Adressen gemäß Konfiguration
 - ~ Auflösen der Adressen im Code

Flasher: Speicherorganisation auf einem Mikrocontroller



EZS-Toolchain



Instruktionssatz, Operationslaufzeiten

Logical	AND	AND Rd, Rn, <op2>	1
	Exclusive OR	EOR Rd, Rn, <op2>	1
Divide	Signed	SDIV Rd, Rn, Rm	2 to 12 ^a
	Unsigned	UDIV Rd, Rn, Rm	2 to 12 ^a

3.3.1 Cortex-M4 instructions

Instruktionslaufzeiten

- Zyklendauern aus Datenblättern
- Jedoch: Meist nicht vollständig
- Annahme hier: Zero-Wait-States \leadsto Kein Warten auf Speicher
 - \leadsto Konkrete Hardwaremodellierung für jedes Board erforderlich

Übersicht

Wiederholung: Stack-Aufbau

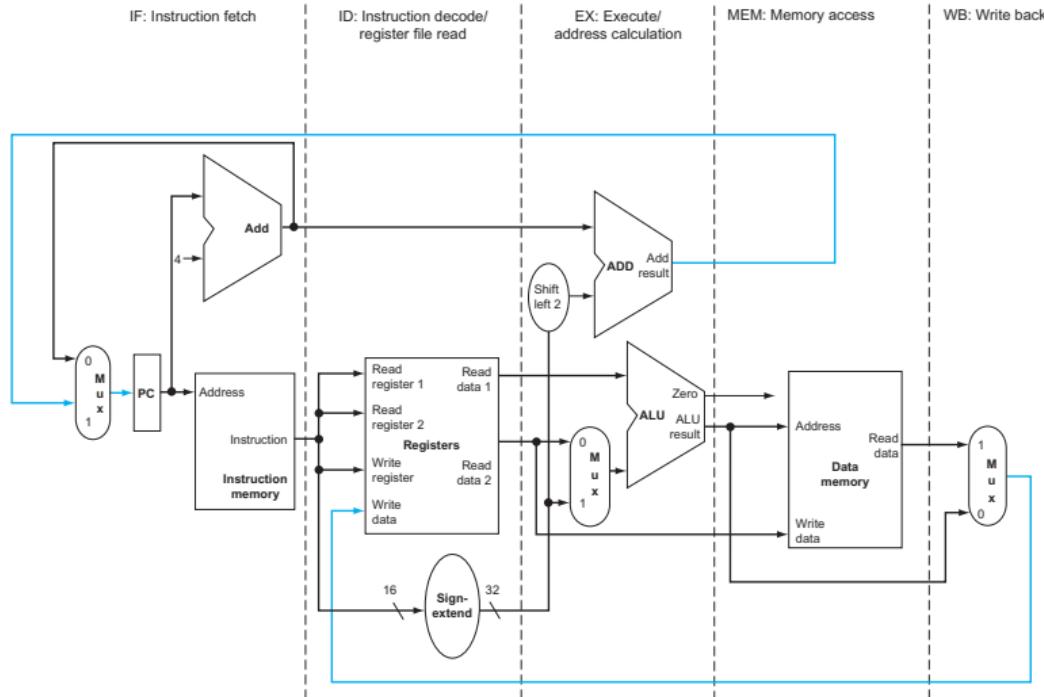
Standards in der Softwareentwicklung

Verwendung von Fließkommazahlen

Überblick: Toolchain

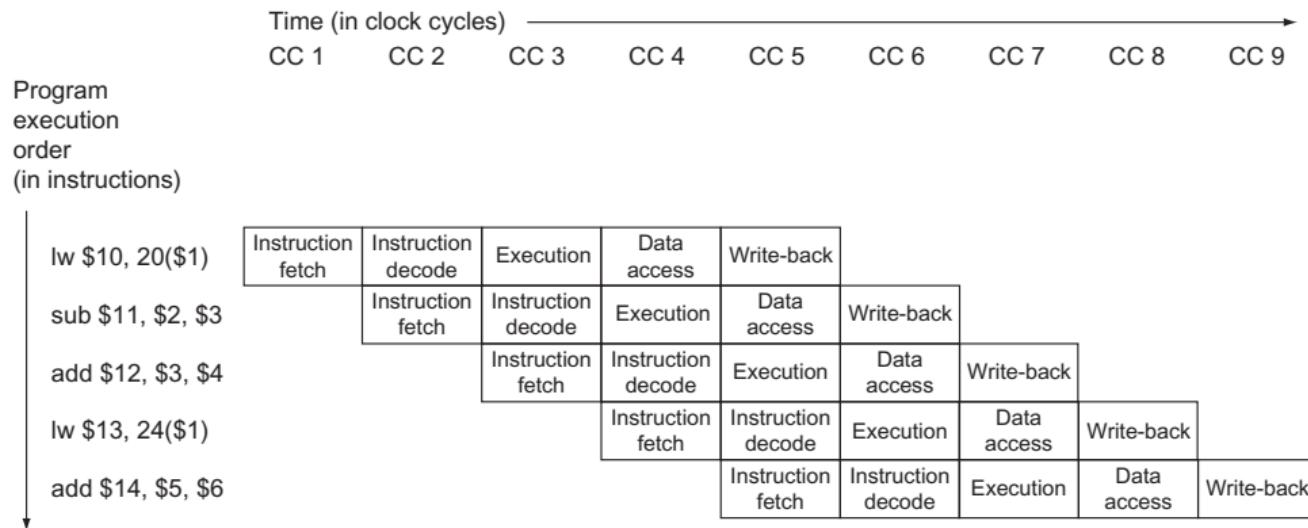
Hardware

MIPS: Single-Cycle



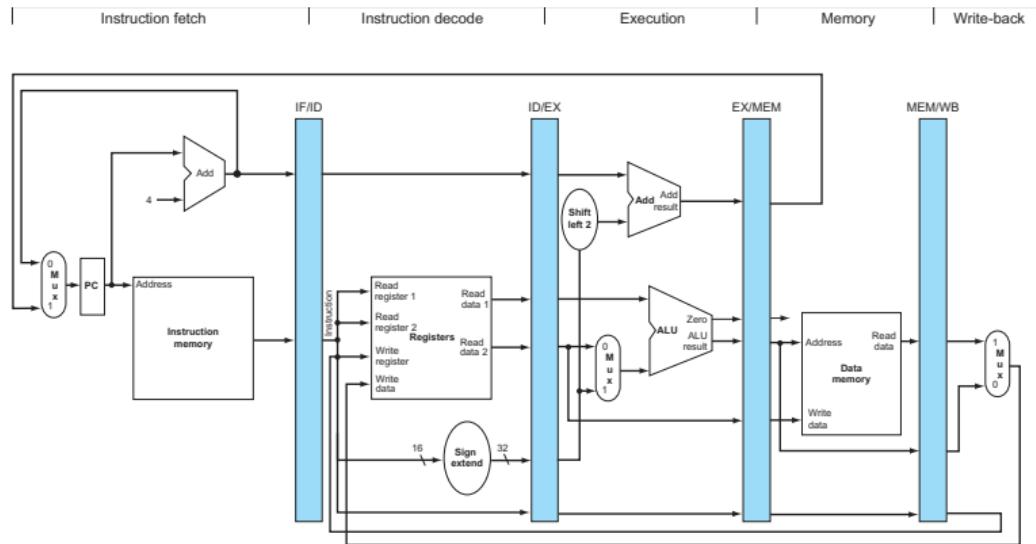
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



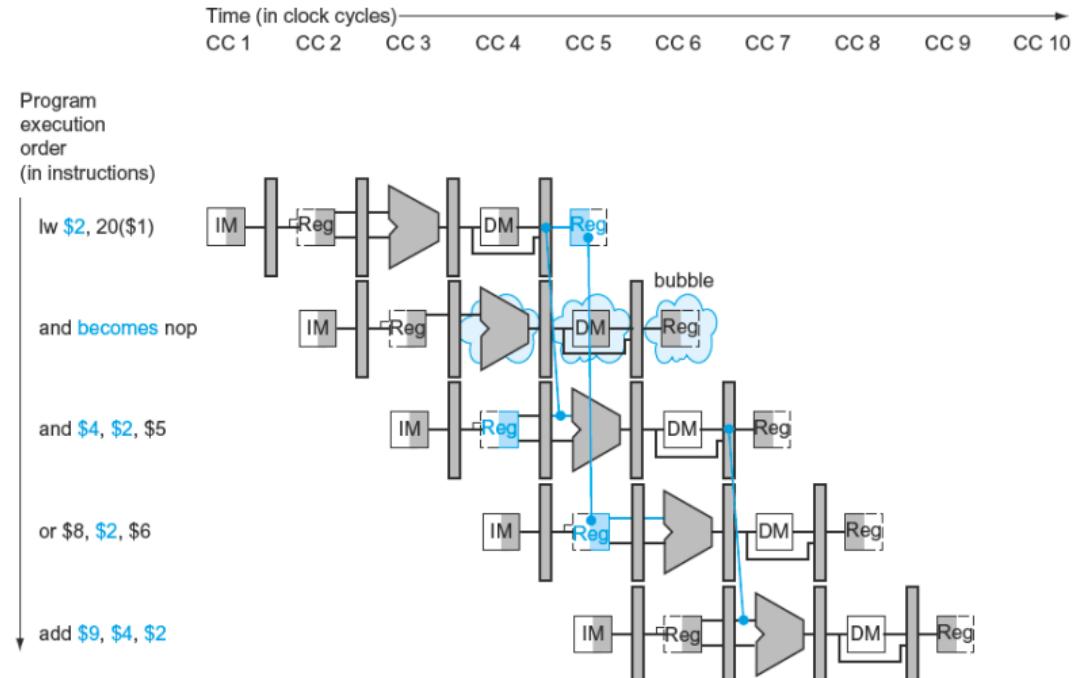
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



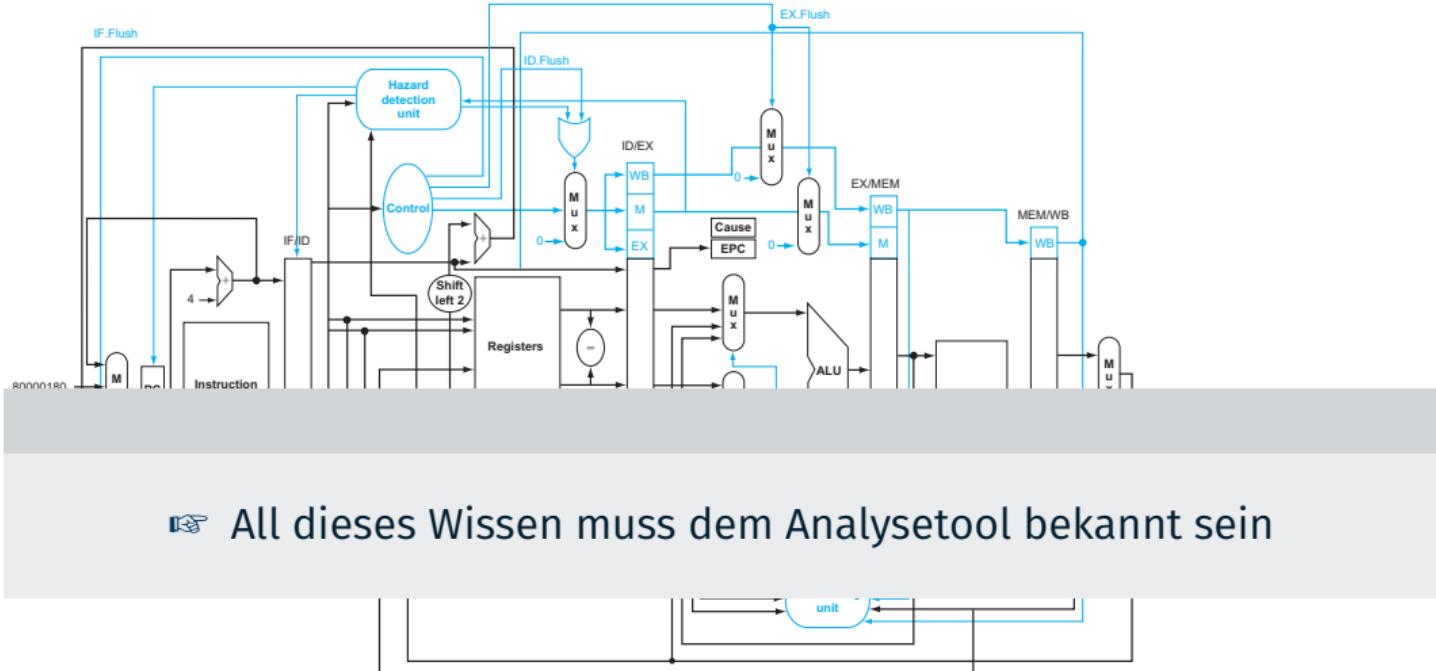
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



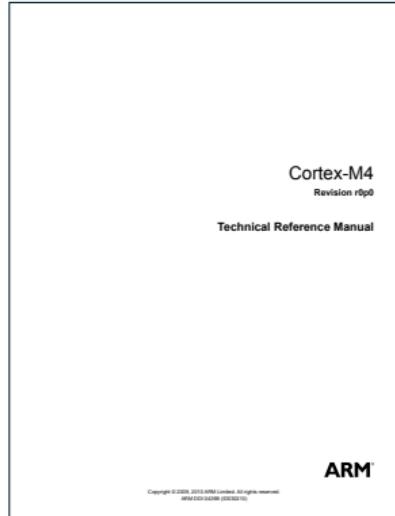
👉 All dieses Wissen muss dem Analysetool bekannt sein

Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

Eigenschaften von CPU-Architekturen

- Pipelining
 - Caching
 - Sprungvorhersage
 - Mikroprogrammierbar vs. Fixed-Function
 - Out-of-Order-Prozessoren
 - Transaktionaler Speicher
 - Superskalarität
 - Mehrkernarchitekturen
 - Hyperthreading
 - ...
- ☞ All diese Funktionalitäten müssen dem Entwickler bekannt sein
- ☞ Berücksichtigung in der WCET-Analyse

Referenzen



ARM: Cortex M4 –
Technical Reference
Manual
111 Seiten
Prozessorinterna

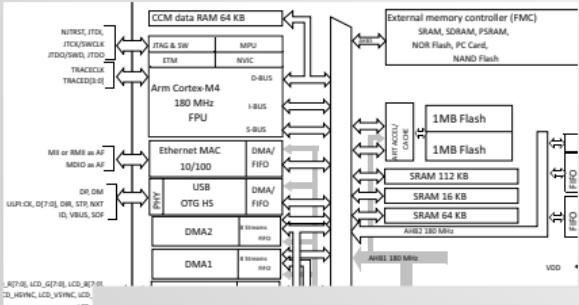


ST: STM32F427xx
STM32F429xx
Datasheet
240 Seiten
Boardspezifika



ST: RM0090 Reference
manual
1747 Seiten
"Complete
Information on
STM32F4xxx"

Speichertopologie STM32F429i-DISC1



Source

3.6 Embedded SRAM

All devices embed:

9xx Datasheet

3.2

Adaptive real-time memory accelerator (ART Accelerator™)

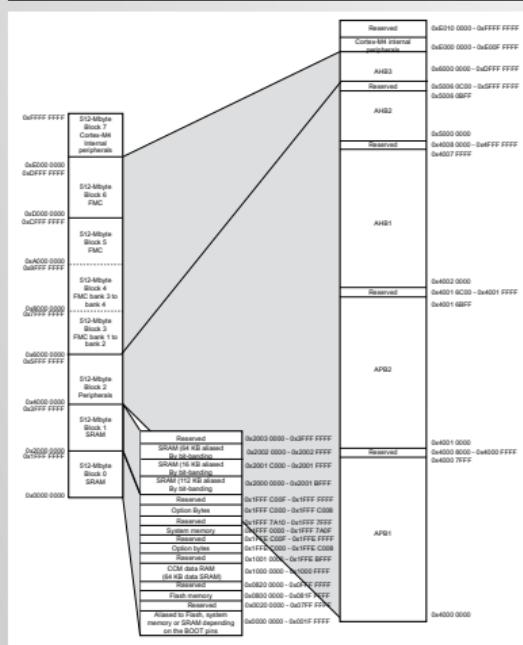
The ART Accelerator™ is a memory accelerator which is optimized for STM32 industry-standard Arm® Cortex®-M4 with FPU processors. It balances the inherent performance advantage of the Arm® Cortex®-M4 with FPU over Flash memory technologies, which normally requires the processor to wait for the Flash memory at higher frequencies.

To release the processor full 225 DMIPS performance at this frequency, the accelerator implements an instruction prefetch queue and branch cache, which increases program execution speed from the 128-bit Flash memory. Based on CoreMark benchmark, the

Source: ST: STM32F427xx STM32F429xx Datasheet, S.21

Speicherlayout STM32F429i-DISC1

Figure 19. Memory map



Source: ST: STM32F427xx STM32F429xx Datasheet,

APB2

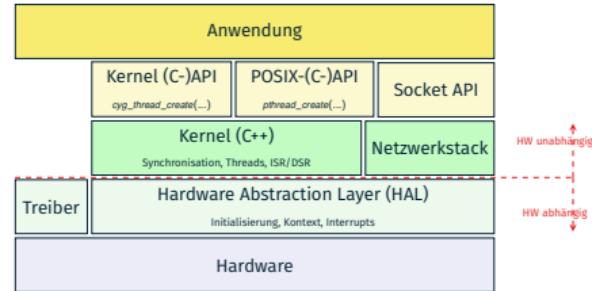
0x4001 3800 - 0x4001 3BFF	SYSCFG
0x4001 3400 - 0x4001 37FF	SPI4
0x4001 3000 - 0x4001 33FF	SPI1
0x4001 2C00 - 0x4001 2FFF	SDIO
0x4001 2400 - 0x4001 2BFF	Reserved
0x4001 2000 - 0x4001 23FF	ADC1 - ADC2 - ADC3
0x4001 1800 - 0x4001 1FFF	Reserved
0x4001 1400 - 0x4001 17FF	USART6
0x4001 1000 - 0x4001 13FF	USART1

Source: ST, STM32F427xx STM32F429xx Datasheet

Peripherie

- Im Adressraum eingeblendet
- Am Peripheriebus (APBx)
- ~ Anderes Zugriffsverhalten als Speicher

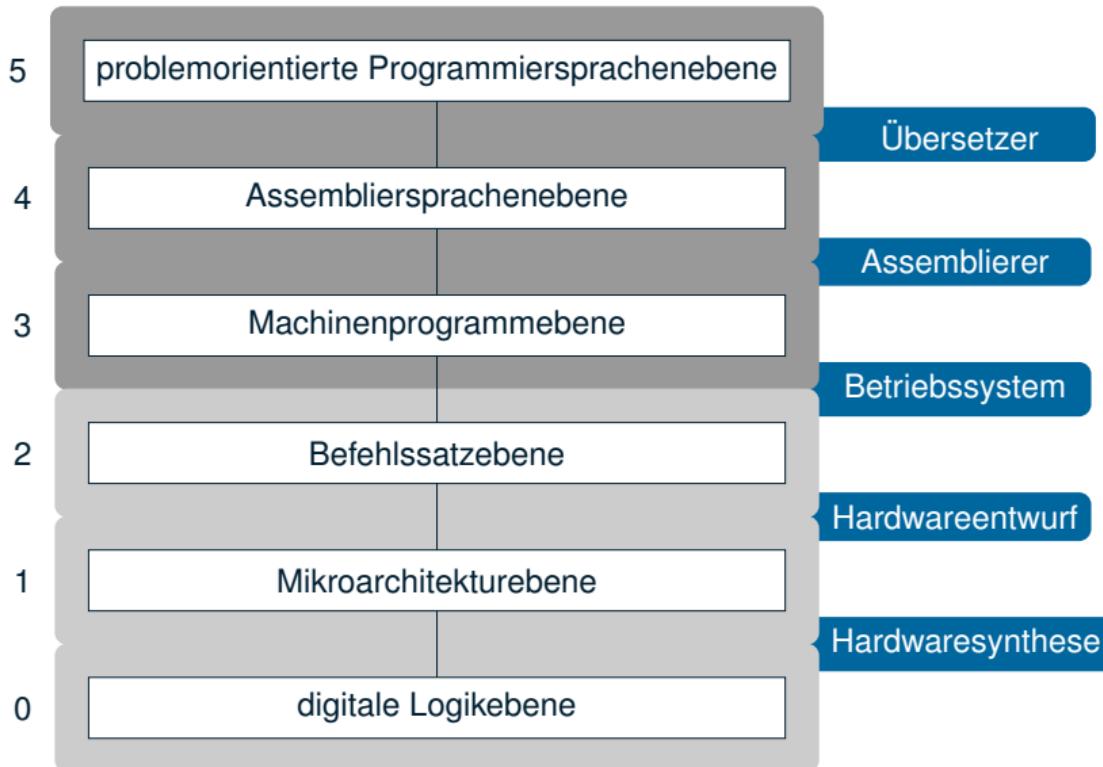
Betriebssystem



Betriebssystem

- in jedem Fall Ablaufplaner
 - oft Treiber/BSP mitgeliefert
 - ggf. interne Kontrollflüsse/Fäden/Unterbrechungen
 - meist konfigurierbar
- ~ Großer Einfluss auf Zeitverhalten des Gesamtsystems

Ebenen



- Systemsoftwareentwicklung benötigt holistisches Wissen über
 - Werkzeugkette
 - Betriebssystem
 - Zielarchitektur
 - Echtzeittheorie
- ~ Umfasst Interna, nicht immer verfügbar
- Entwickler muss all diese Einflussfaktoren kennen:
 - Zur Entwicklung
 - Zur Analyse
- ~ Annahmen durch statische Analyse kontinuierlich verifizieren
- ~ Nur so erhalten wir ein **sicheres** Echtzeitsystem

[1] David Goldberg.

What every computer scientist should know about floating-point arithmetic.

ACM Computing Surveys (CSUR), 23(1):5–48, 1991.