# Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

System-Software-Entwicklung

**Simon Schuster** **Phillip Raffeck**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
Lehrstuhl für Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
https://www4.cs.fau.de

Wintersemester 2019/20

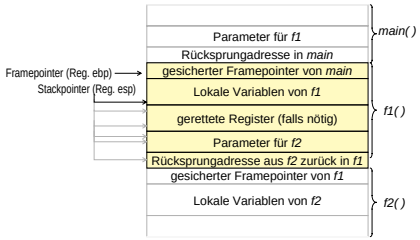






## Wiederholung: Stack-Aufbau

```
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.



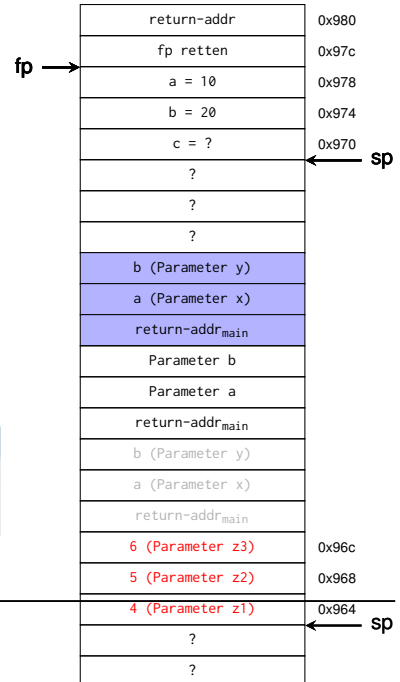
## Ablauf Funktionsaufruf

```
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;
  f1(a, b);
  return a;
}

int f3(int z1, int z2, int z3) {
  int o;
  return o;
}
```




Stackframe abräumen

Was passiert bei weiterem Funktionsaufruf?

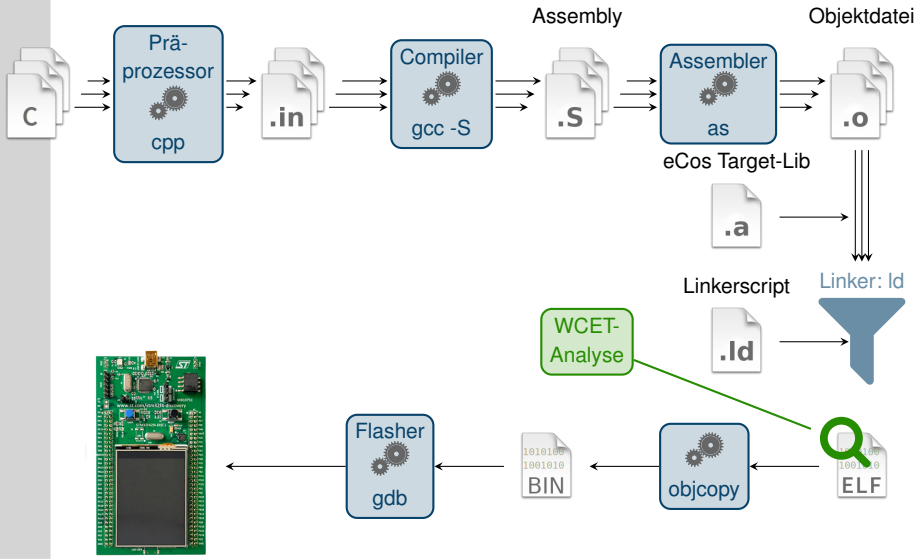
- sp = fp
- fp = pop(sp)

# Übersicht



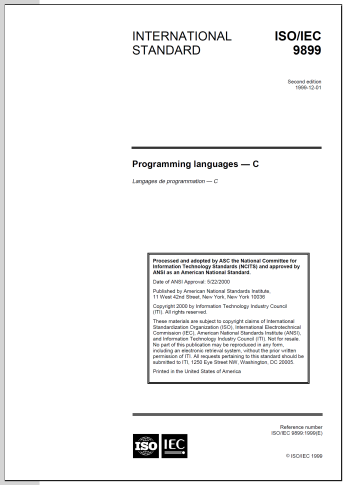


# EZS-Toolchain






# C Standard



INTERNATIONAL STANDARD **ISO/IEC 9899**

Second edition 1999-12-01

**Programming languages — C**

*Langages de programmation — C*

Processed and adopted by ASC the National Committee for Information Technology Standards (NCITS) and approved by ANSI as an American National Standard.

Date of ANSI Approval: 5/22/2000

Published by American National Standards Institute, 11 West 42nd Street, New York, New York 10036

Copyright 2000 by Information Technology Industry Council (ITI). All rights reserved.

These materials are subject to copyright claims of International Standardization Organization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), American National Standards Institute (ANSI), and Information Technology Industry Council (ITI). Not for resale. No part of this publication may be reproduced in any form, including an electronic retrieval system, without the prior written permission of ITI. All requests pertaining to this standard should be submitted to ITI, 1250 Eye Street NW, Washington, DC 20005.

Printed in the United States of America

Reference number ISO/IEC 9899:1999(E)

© ISO/IEC 1999

- 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



# C Standard II

**6.5.5 Multiplicative operators**

**Syntax**

*multiplicative-expression:*
*cast-expression*
*multiplicative-expression* ***** *cast-expression*
*multiplicative-expression* **/** *cast-expression*
*multiplicative-expression* **%** *cast-expression*

**Constraints**

Each of the operands shall have arithmetic type. The operands of the **%** operator shall have integer type.

**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

## Übersicht





## 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.` $\rightsquigarrow$ `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

- $\texttt{int}_1$/<größerer $\texttt{int}_2$> $\rightsquigarrow$ `0 + 0 = 0`
- Compileroptimierung nicht C-Konform



## Frage #6

### Zu was wird `2 * M_PI` ausgewertet?

1. 6
2. ungefähr `6.28`
3. `6.28318530717958647692528676655900576839433879875 0...`

### Erklärung

- `M_PI` $\rightsquigarrow$ `double`
- `double` Standard-Typ, außer zusätzliches Literal ( `3.14 f`)
- Begrenzter Wertebereich:
  `6.28318530717958600000000000000000`



## 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...`



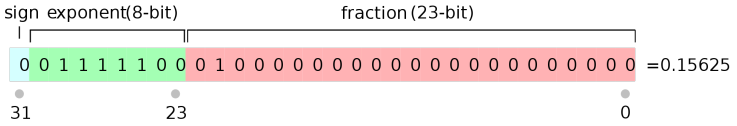
## Fließkomma-Arithmetik

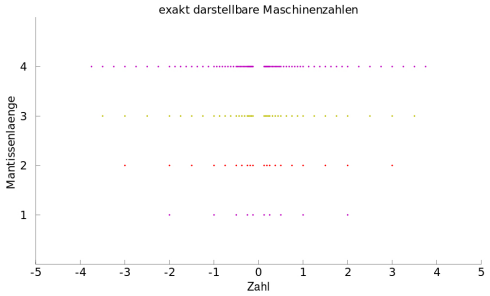
```
1  double a = 0.1;
2  double b = 0.2;
3
4  float aa = 0.1;
5  float bb = 0.2;
6
7  if (a+b == aa+bb){
8    ezs_printf("equal\n");
9  }else{
10   ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
11 }
```

```
1  /* Ausgabe:
2  unequal:
3  0.300000000000000000000000000000 !=
4  0.300000011920928955078125000000
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_nanosec: * 1e9`)
- Vermeidung des Wechsels von Größeneinheiten
- Verwendung von Festkomma-Arithmetik $\rightsquigarrow$ VEZS
- Integer-Division ist *kein sicherer Ausweg*

☞ *Sorgfalt bei arithmetischen Operationen in begrenzten Wertebereichen*



## Wahl des Datentyps bei Berechnung des Sinus-Wertes

- Harmonische Schwingung[1]: $y(t) = y_0 \cdot sin(\omega t + \varphi_0)$ und $\omega = 2\pi f$

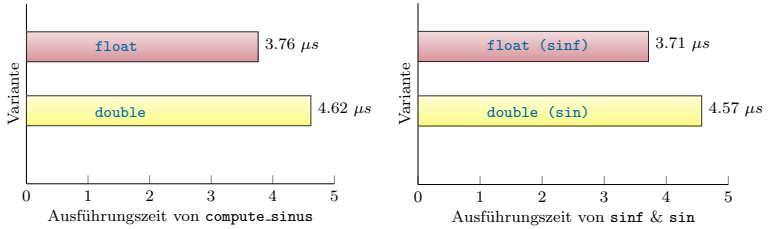
```
1  #define TYPE {int|double|float} ?
2  ...
3  TYPE compute_sinus(OTHER_TYPE real_time) {
4
5    TYPE f     = ...
6    TYPE omega = 2 * M_PI * f;
7    ...
8    ... sin(omega * real_time) // oder doch sinf(omega * real_time)?
9    ...
10 }
```

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

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

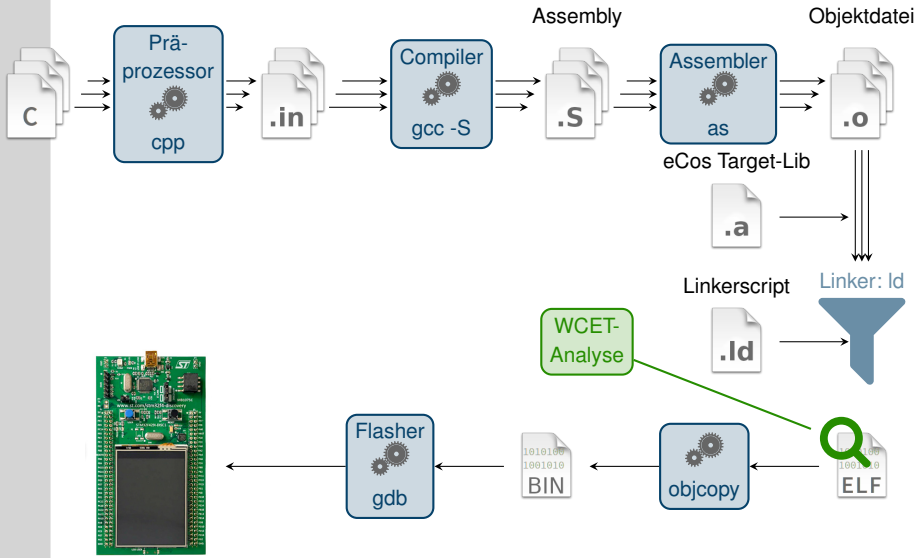


## Vergleich der Laufzeiten




- 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 Abhängigkeit der Wortbreite (32-Bit Cortex-M4, 8-Bit AVR)
- Spezialbibliothek für Signalverarbeitung mit Integer-Arithmetik
- Spezielle Hardware-Einheiten zur Signalverarbeitung

# 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
  - Konfigurationsabhäniger Code `#if(def)`
  - Definierbare Konstanten `#define`
  - Auflösen von `#include`-Direktiven
- Reine Zeichernersetzung/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 Quelltexts gemäß Semantik laut Standard
- Umwandlung in Befehlssatz der Zielplattform
- Aufrufe gemäß Application Binary Interface (ABI)
- Optimierung des Kompilats



# Übersetzer II



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 Machinencode (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

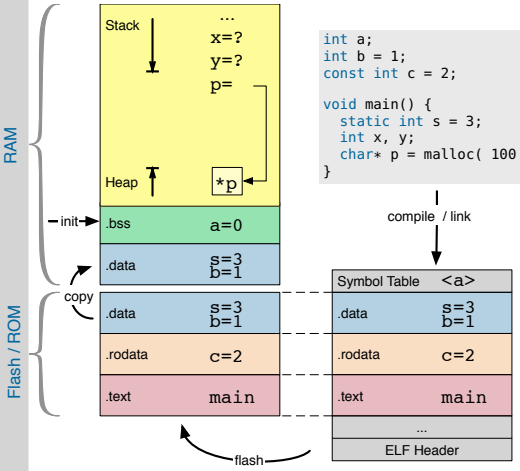
⇝ Zusammenführung der Funktionen und Variablen aus Objektdateien

⇝ Vergabe globaler Adressen gemäß Konfiguration

⇝ Auflösen der Adressen im Code



# Flasher: Speicherorganisation auf einem Mikrocontroller




```
int a;                      // a: global, uninitialized
int b = 1;                  // b: global, initialized
const int c = 2;            // c: global, const

void main() {
  static int s = 3;         // s: local, static, initialized
  int x, y;                 // x: local, auto; y: local, auto
  char* p = malloc( 100 );  // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
```

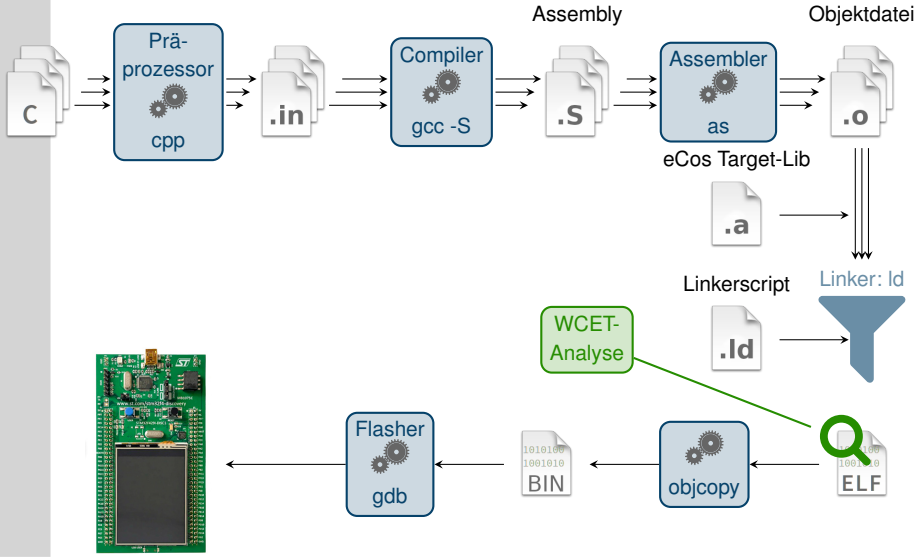
compile / link

Quellprogramm






# EZS-Toolchain



# Instruktionssatz, Operationslaufzeiten

| | | | |
|---|---|---|---|
| Logical | AND | AND 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**

The processor implements the ARMv7-M Thumb instruction set. Table 3-1 shows the Cortex-M4 instructions and their cycle counts. The cycle counts are based on a system with zero wait states.

Source: ARM, Cortex M4 Reference Manual r0p0, S.29

## Instruktionslaufzeiten

- Zyklendauern aus Datenblättern
- Jedoch: Meist nicht vollständig
- Annahme hier: Zero-Wait-States $\rightsquigarrow$ Kein Warten auf Speicher

$\rightsquigarrow$ Konkrete Hardwaremodellierung für jedes Bord erforderlich

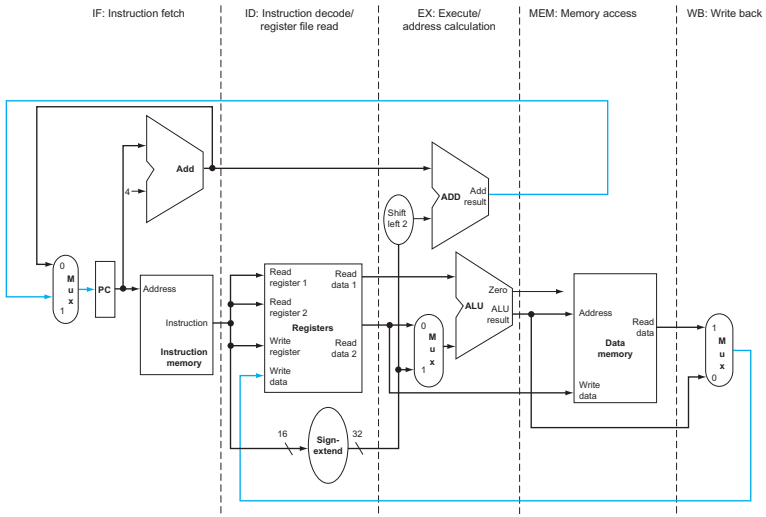


# Übersicht





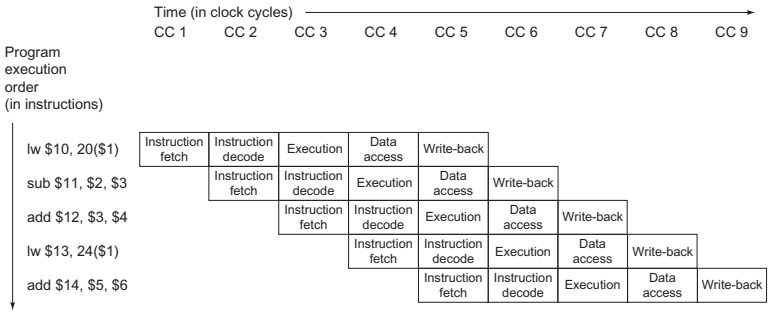
# MIPS: Single-Cycle




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

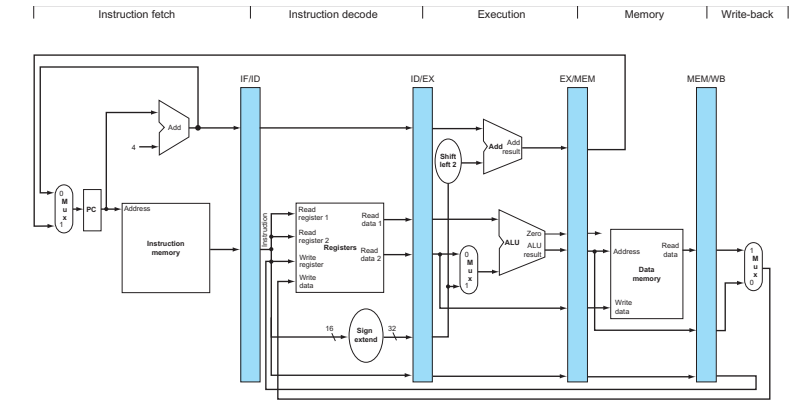


# MIPS: Pipelining




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

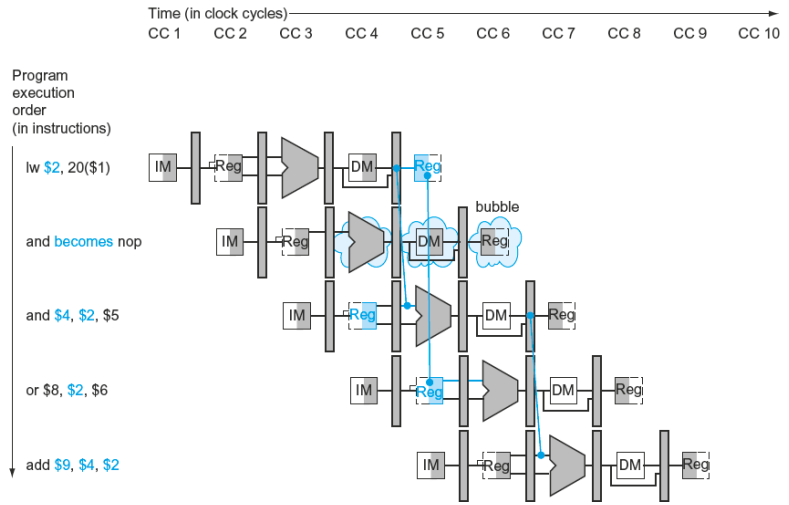
# MIPS: Pipelining




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



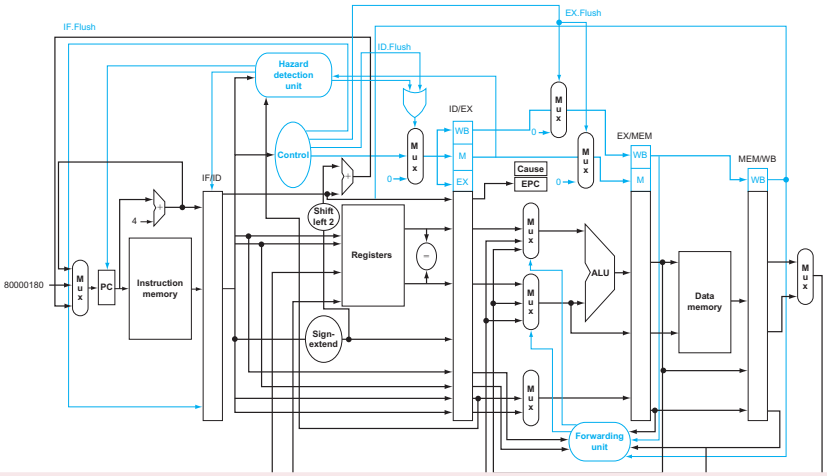
# MIPS: Pipelining




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



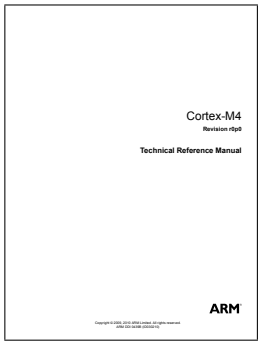
# Eigenschaften von CPU-Architekturen

- 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

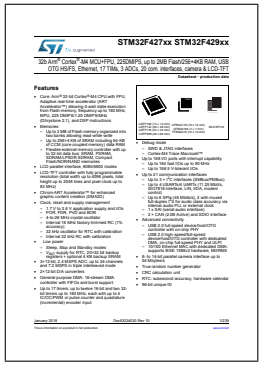
# Referenzen




ARM: Cortex M4 – Technical Reference Manual

111 Seiten

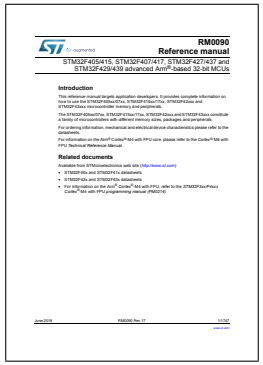
Prozessorinterna




ST: STM32F427xx STM32F429xx Datasheet

240 Seiten

Boardspezifika



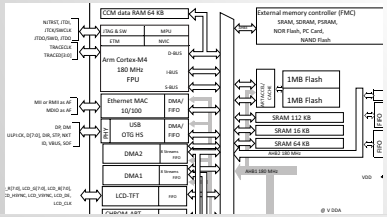

ST: RM0090 Reference manual

1747 Seiten

"Complete Information on STM32F4xxx"



# Speichertopologie STM32F429i-DISC1




**3.6 Embedded SRAM**

All devices embed:

- Up to 256Kbytes of system SRAM including 64 Kbytes of CCM (core coupled memory) data RAM
- RAM memory is accessed (read/write) at CPU clock speed with 0 wait states

**3.2 Adaptive real-time memory accelerator (ART Accelerator™)**

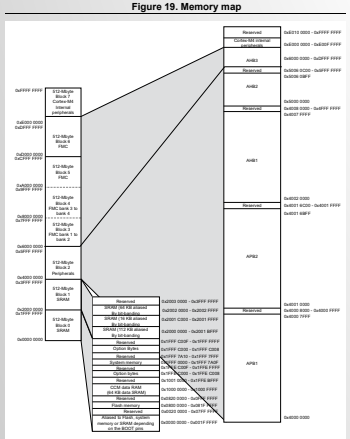
The ART Accelerator™ is a memory accelerator which is optimized for STM32 industry-standard Arm® Cortex®-M4 with FPU processors. It balances the inherent performance advantage of the Arm® Cortex®-M4 with FPU over Flash memory technologies, which normally requires the processor to wait for the Flash memory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




Source: ST: STM32F427xx STM32F429xx Datasheet, S.53

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, S.55

## Peripherie

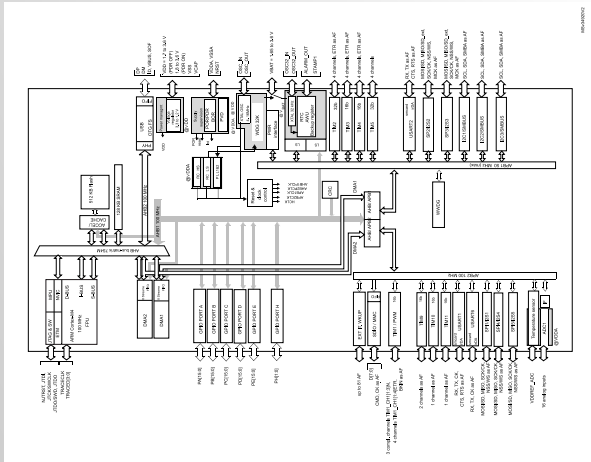
- Im Adressraum eingeblendet
- Am Peripheriebus (APBx)

⇝ Anderes Zugriffsverhalten als Speicher



# Beispiel: USART

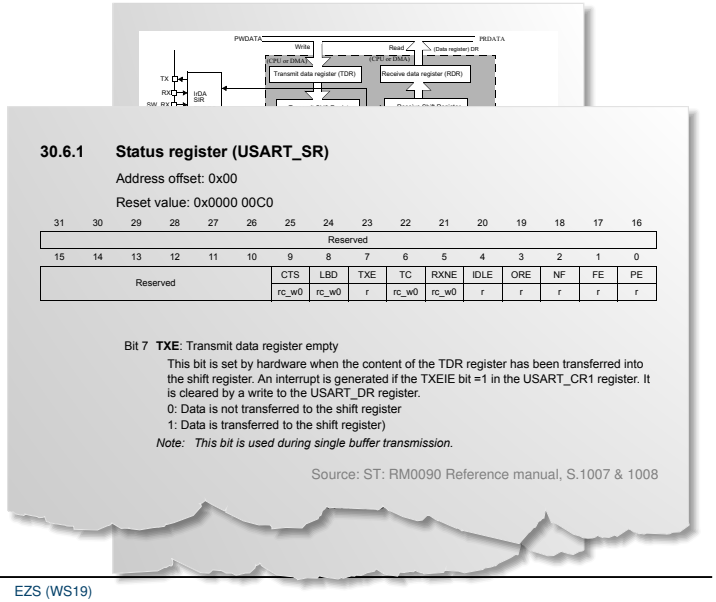
Blockdiagramm



Source: ST, STM32F427xx STM32F429xx Datasheet, S.20

# Beispiel: USART

Innerer Aufbau



**30.6.1 Status register (USART_SR)**

Address offset: 0x00

Reset value: 0x0000 00C0

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | | | | | | CTS | LBD | TXE | TC | RXNE | IDLE | ORE | NF | FE | PE |
| | | | | | | rc_w0 | rc_w0 | r | rc_w0 | rc_w0 | r | r | r | r | r |

Bit 7 **TXE**: Transmit data register empty

This bit is set by hardware when the content of the TDR register has been transferred into the shift register. An interrupt is generated if the TXEIE bit =1 in the USART_CR1 register. It is cleared by a write to the USART_DR register.

0: Data is not transferred to the shift register

1: Data is transferred to the shift register)

*Note: This bit is used during single buffer transmission.*

Source: ST: RM0090 Reference manual, S.1007 & 1008



# Board Support Package

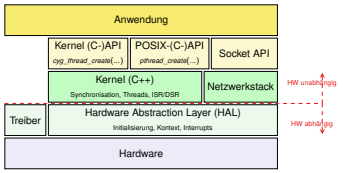
```
stm32f411e-discovery
|-- Release_Notes.html
|-- stm32f411e_discovery_accelerometer.c
|-- stm32f411e_discovery_accelerometer.h
|-- stm32f411e_discovery_audio.c
|-- stm32f411e_discovery_audio.h
|-- STM32F411E-Discovery_BSP_User_Manual.chm
|-- stm32f411e_discovery.c
|-- stm32f411e_discovery_gyroscope.c
|-- stm32f411e_discovery_gyroscope.h
`-- stm32f411e_discovery.h
```

## Board Support Package

- Vom Hersteller vorgegeben
- Ansteuerung für Boardperipherie
- Meist permissive Lizenzen



# Betriebssystem

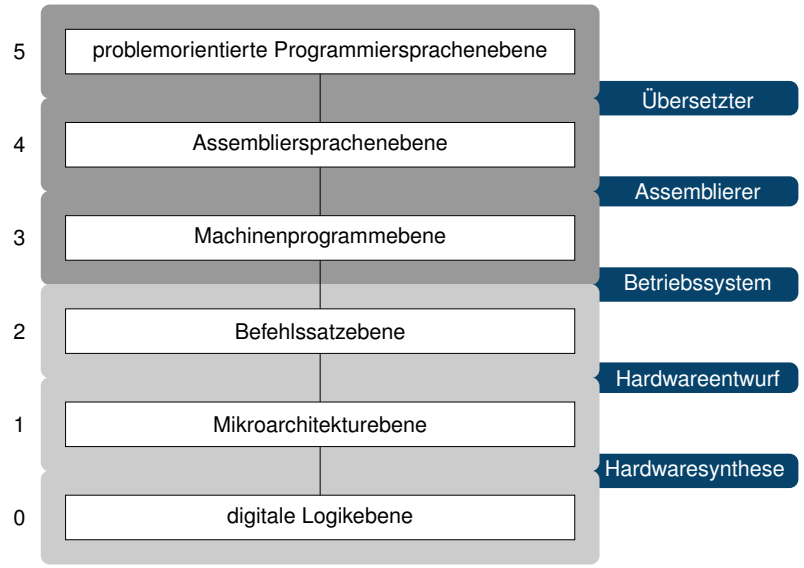

## Betriebssystem

- in jedem Fall Ablaufplaner
- oft Treiber/BSP mitgeliefert
- ggf. interne Kontrollflüsse/Fäden/Unterbrechungen
- meist konfigurierbar

⇝ Großer Einfluss auf Zeitverhalten des Gesamtsystems



# Ebenen



## Fazit

- 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



## Literatur

[1] David Goldberg.
What every computer scientist should know about floating-point arithmetic.
*ACM Computing Surveys (CSUR)*, 23(1):5–48, 1991.