Code-Coverage auf Embedded Systems

Daniel Fischer
Hochschule Offenburg
Badstraße 24
77652 Offenburg
daniel.fischer@hs-offenburg.de
Tel.: 0781-205-148

Andreas Behr
Verifysoft Technology GmbH
In der Spöck 10-12
77656 Offenburg
behr@verifysoft.com
Tel.:0781-127-81189

Roland Bär
Verifysoft Technology GmbH
In der Spöck 10-12
77656 Offenburg
baer@verifysoft.com
Tel.:0781-127-81189

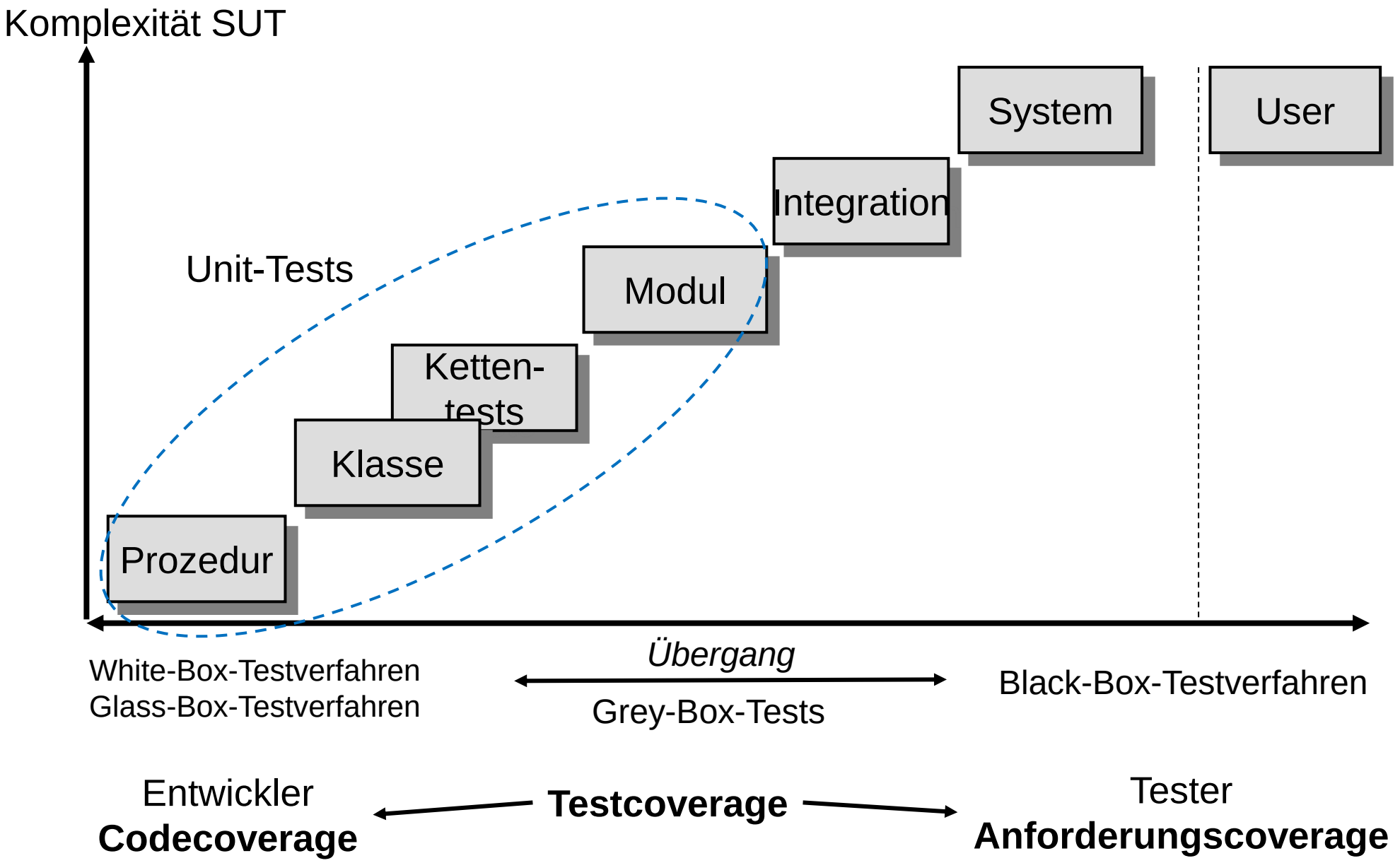
Hochschule Offenburg
University of Applied Sciences

Verifysoft TECHNOLOGY

Inhalt

1. Grundlagen
2. Coveragestufen
3. Normen
4. Instrumentierung
5. Herausforderungen kleine Targets
6. Beispiel

Grundlagen - Teststufen



Grundlagen – Testtechniken / Prinzipien

Embedded Software Engineering Kongress

Ursache-Wirkungsgraph

Classification Tree Method (CTM)

Realtime Testing

Rare Event Testing

Last Tests

Recovery Tests

Stress Tests

Kontrollflussorientiertes Testen

Statistisches Testen

Äquivalenzklassen
Mehrdimensionale Äquivalenzklassen
Grenzwertanalyse
Test besonderer Werte
Informelle Tests
Smoke Tests
Basis

Advanced

Back-to-Back Testing

CRUD

Rare Event Testing

Mutation Testing

Zufallsgesteuerter Test

Monkeytest

Fuzzing (Fuzz Testing)

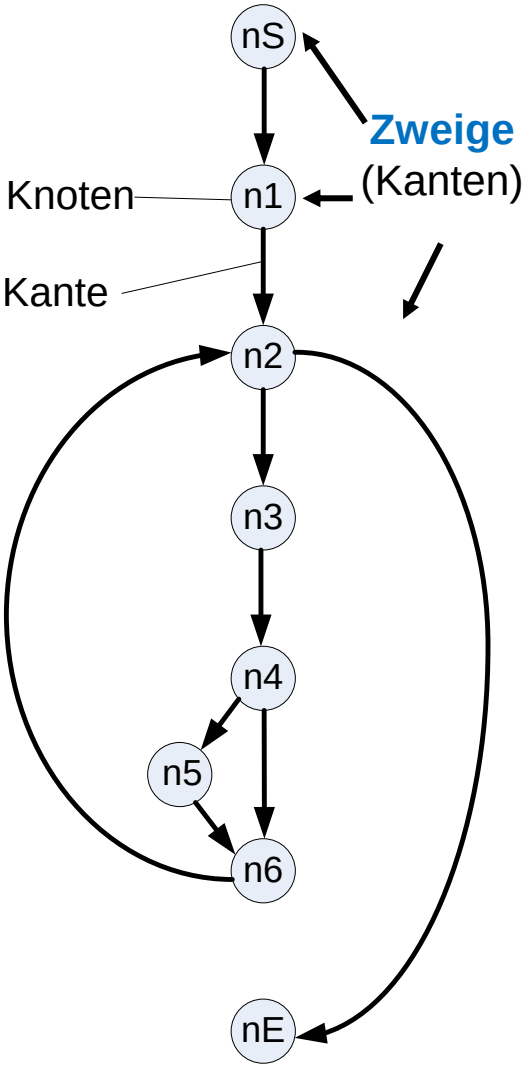
Evolutionäres Testen

Pairwise Testing

Etablierte Testtechnik für sicherheitskritische Embedded Systems
Testendekritierium (White-Box-Testverfahren)
Notwendig für die Erfüllung verschiedener Normen

Grundlagen – Kontrollflussorientiert

Pfade



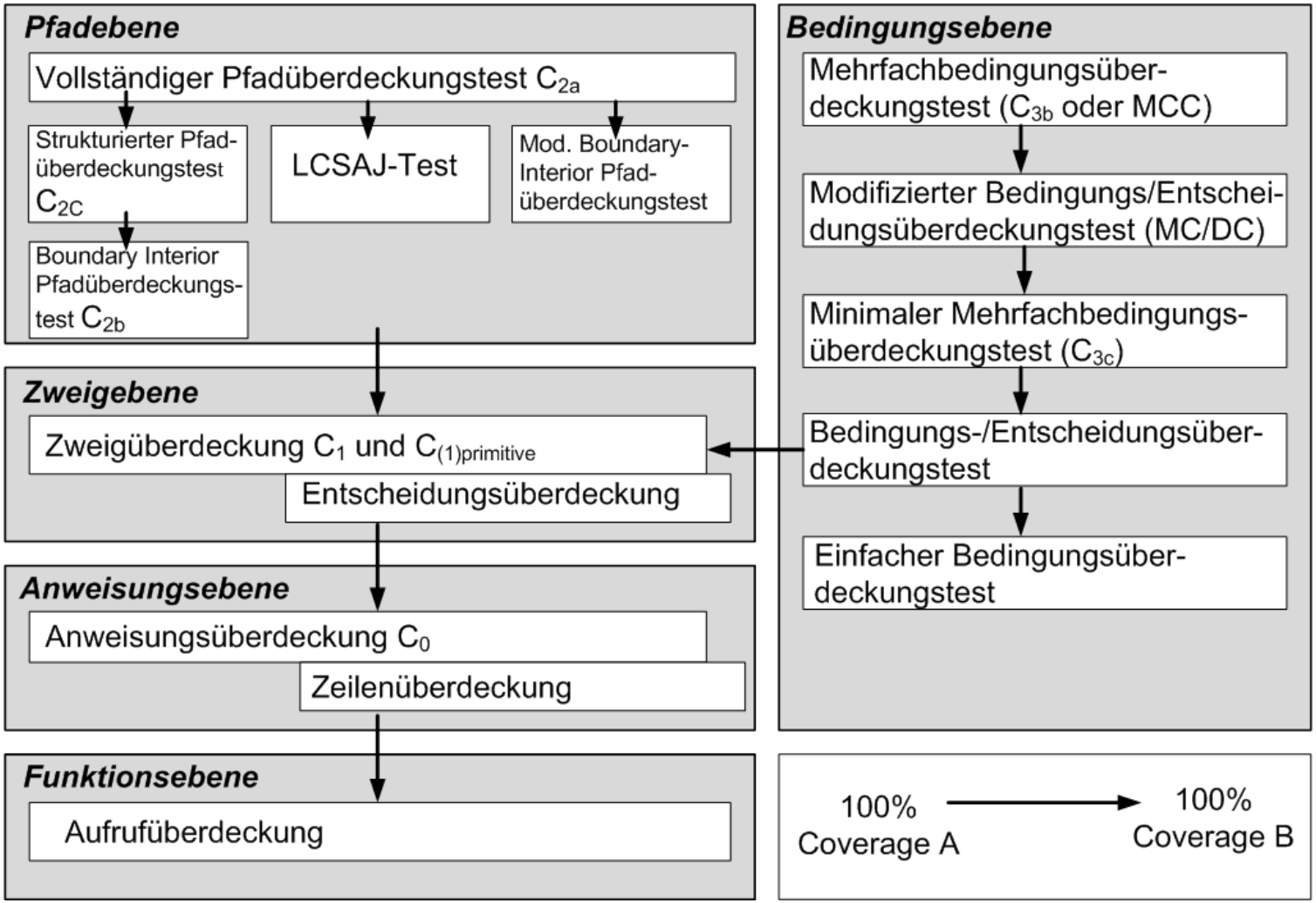

```
void ZaehleZchn (int& VokalAnzahl, int& GesamtAnzahl)
{
unsigned char Zchn;

Zchn = getch();

while ((Zchn>='A')&&(Zchn<='Z')&&(GesamtAnzahl<INT_MAX))
{

        GesamtAnzahl = GesamtAnzahl + 1;

        if ((Zchn=='A')||(Zchn=='E')||(Zchn=='I')||(Zchn=='O')||(Zchn=='U'))
        {
                VokalAnzahl = VokalAnzahl + 1;
        }

        Zchn = getch();
}

}
```

Funktionen

Anweisungen (Knoten)

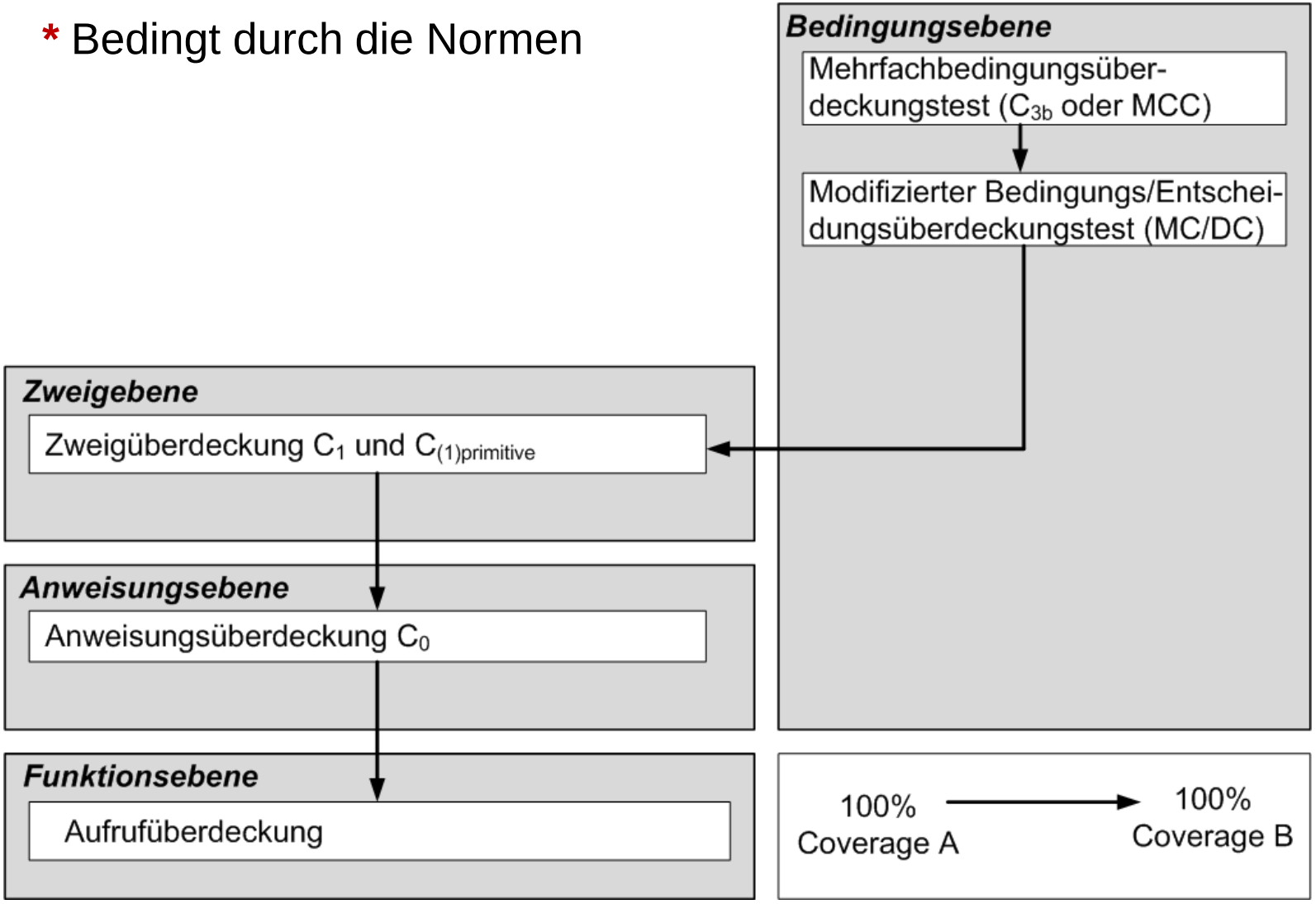
Bedingungen

Coveragestufen – Übersicht



Coveragestufen – Die wichtigsten Stufen

* Bedingt durch die Normen



Coveragestufen – Funktionsebene


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

```
UCUNIT__TESTCASE_BEGIN("Function Coverage");
UCUNIT__CHECKLIST_BEGIN(UCUNIT__ACTION_WARNING);
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(1,goo(1,0,1));
UCUNIT__CHECKLIST_END();
UCUNIT__TESTCASE_END("Function Coverage");
```

```
================================================
TESTCASE:Function Coverage:BEGIN
------------------------------------------------
CHECK: Line 22:IsEqual(1,goo(1,0,1)):PASSED
CHECK: Line 23:Checklist():PASSED
------------------------------------------------
TESTCASE:Function Coverage:PASSED
================================================

**************************************
Testcases: failed: 0
           passed: 1
Checks:    failed: 0
           passed: 1
**************************************
_
```

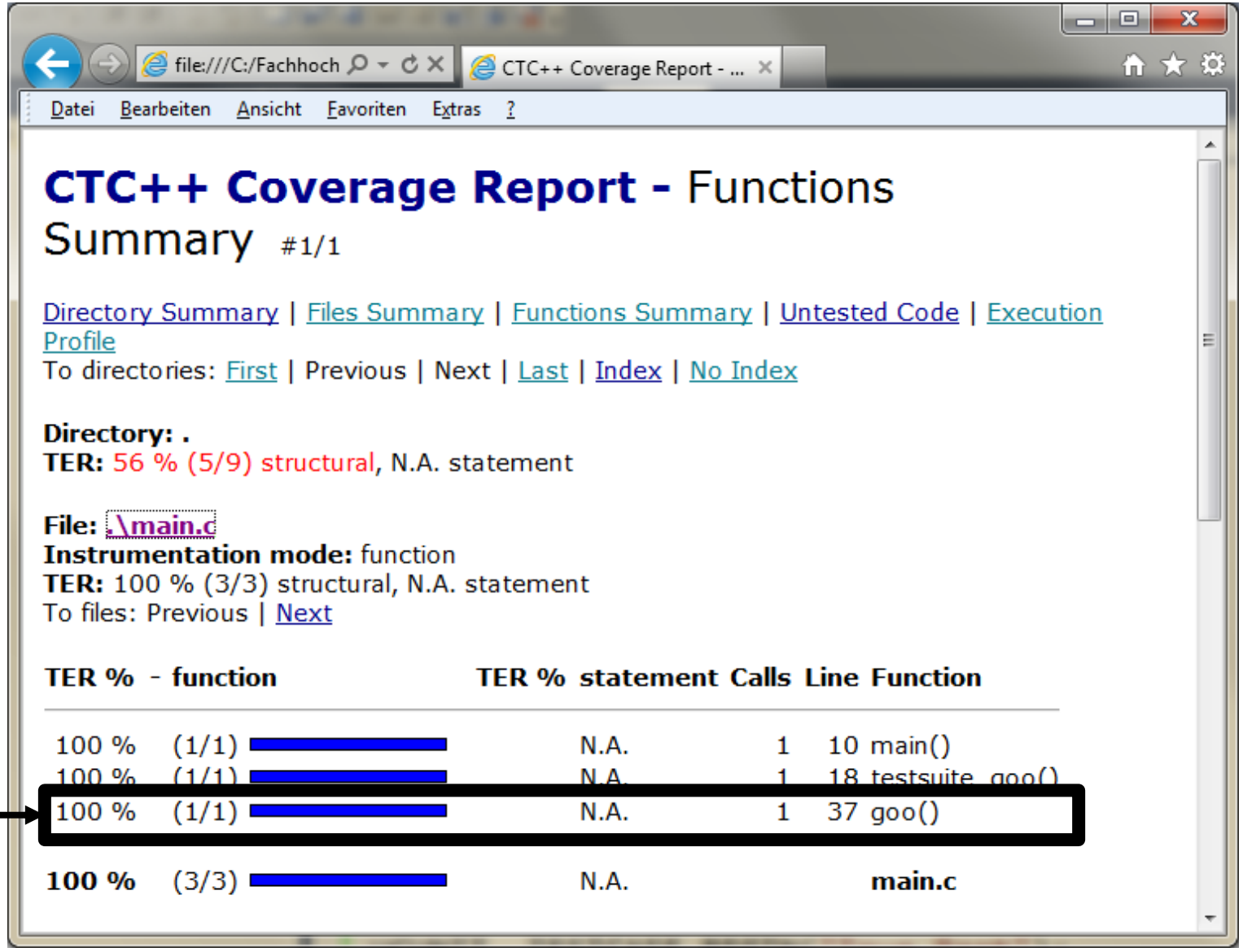
Coveragestufen – Aufrufüberdeckung

Embedded Software Engineering Kongress

TER
Test
Effectiveness
Ratio

TER entspricht
der entsprechend
gewählten Coverage …

Für die zu testende
Funktion goo ()
wurde eine
Aufrufüberdeckung
von 100% erreicht.



Coveragestufen – Anweisungsüberdeckung C_0


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

```
UCUNIT__TESTCASE_BEGIN(“Statement Coverage");
UCUNIT__CHECKLIST_BEGIN(UCUNIT__ACTION_WARNING);
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(1,goo(1,0,1));
UCUNIT__CHECKLIST_END();
UCUNIT__TESTCASE_END(“Statement Coverage");
```

```
==========================================
TESTCASE:Statement Coverage:BEGIN
------------------------------------------
CHECK: Line 22:IsEqual(1,goo(1,0,1)):PASSED
CHECK: Line 23:Checklist():PASSED
------------------------------------------
TESTCASE:Statement Coverage:PASSED
==========================================

**************************************
Testcases: failed: 0
           passed: 1
Checks:    failed: 0
           passed: 1
**************************************
```

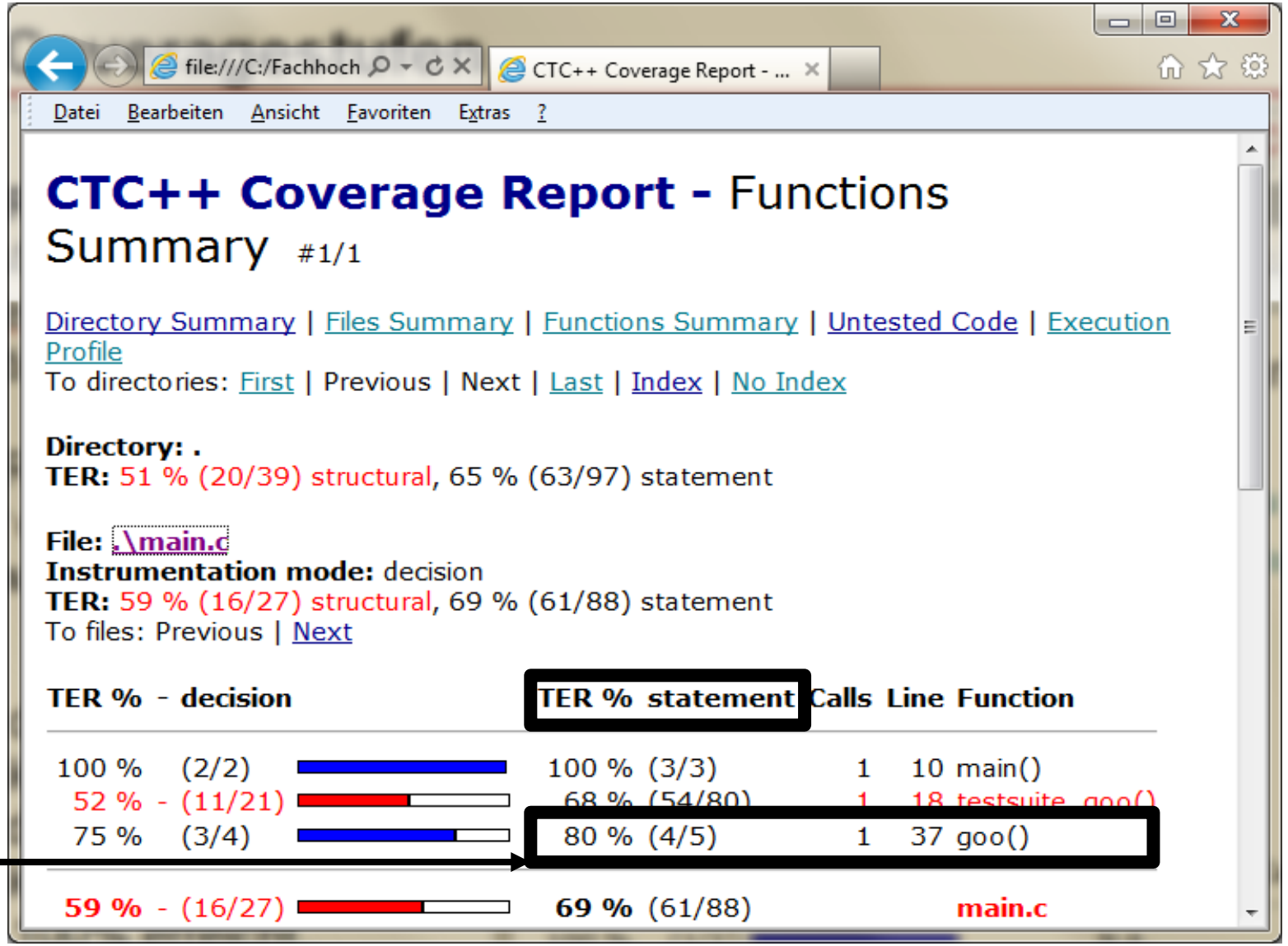
Coveragestufen – Anweisungsüberdeckung C_0

Embedded Software Engineering Kongress

TER
Test
Effectiveness
Ratio

TER entspricht
der entsprechend
gewählten Coverage …

Für die zu testende
Funktion goo ()
wurde nur eine
Anweisungs-
überdeckung
von 80% (4/5) erreicht.



Coveragestufen – Zweigüberdeckung C_1


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

```
UCUNIT__TESTCASE_BEGIN(“Branch Coverage");
UCUNIT__CHECKLIST_BEGIN(UCUNIT__ACTION_WARNING);
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(1,goo(1,0,1));
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(0,goo(1,0,0));
UCUNIT__CHECKLIST_END();
UCUNIT__TESTCASE_END(“Branch Coverage");
```

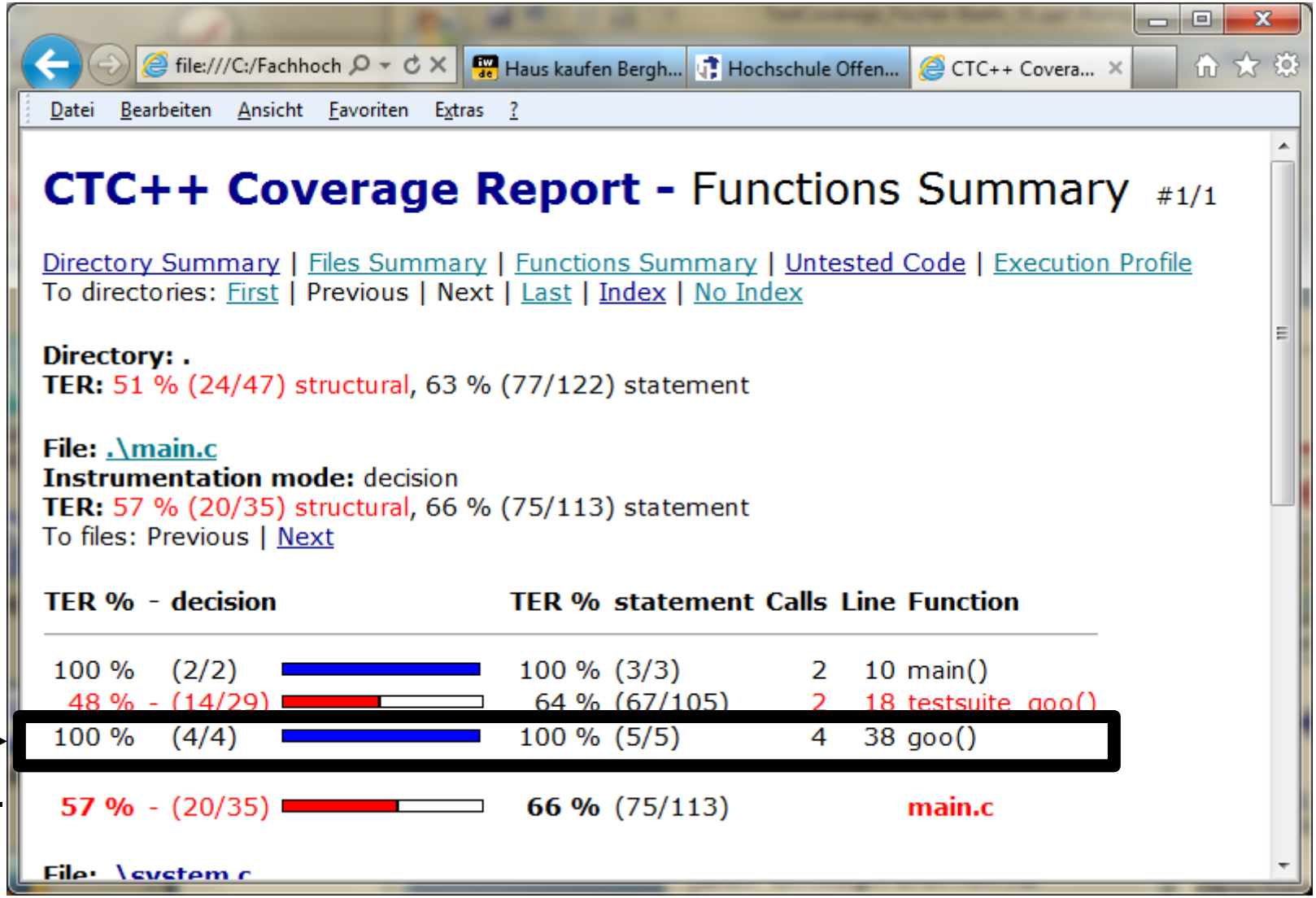
```
================================================
TESTCASE:Branch Coverage:BEGIN
------------------------------------------------
CHECK: Line 22:IsEqual(1,goo(1,0,1)):PASSED
CHECK: Line 23:IsEqual(0,goo(1,0,0)):PASSED
CHECK: Line 24:Checklist():PASSED
------------------------------------------------
TESTCASE:Branch Coverage:PASSED
================================================

**************************************
Testcases: failed: 0
           passed: 1
Checks:    failed: 0
           passed: 2
**************************************
```

Coveragestufen – Zweigüberdeckung C_1

TER
Test
Effectiveness
Ratio

TER entspricht der entsprechend gewählten Coverage …

Für die zu testende Funktion goo () wurde eine Zweigüberdeckung-überdeckung → von 100% (4/4) erreicht.



Coveragestufen – Bedingungsebene MC/DC


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

DO-178B Definition:

„Every decision has taken all possible outcomes at least once, and every condition in a decision is shown to independently affect that decision‘s outcome.“

(a>0)	(b>0)	(c>0)	x
wahr	-	wahr	1
wahr	-	falsch	0
falsch	wahr	wahr	1
falsch	wahr	falsch	0
falsch	falsch	-	0

Unvollständige Evaluation in C/C++
-wird nicht ausgewertet, kann wahr oder falsch sein

n+1 Tests sind notwendig, n := Anzahl atomarer Bedingungen

Coveragestufen – Bedingungsebene MC/DC


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

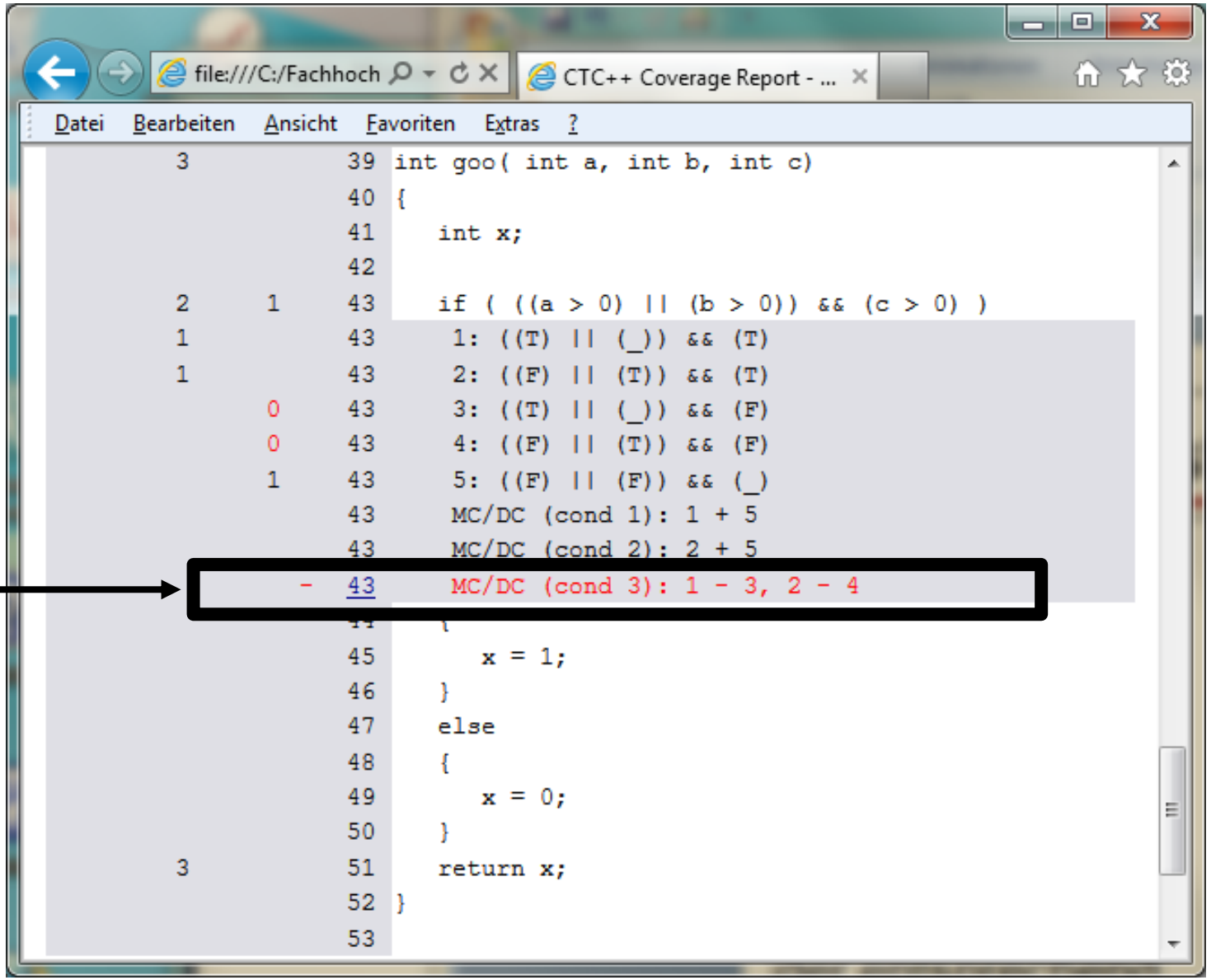
```
UCUNIT__TESTCASE_BEGIN("MC/DC Coverage");
UCUNIT__CHECKLIST_BEGIN(UCUNIT__ACTION_WARNING);
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(1,goo(1,0,1));
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(1,goo(0,1,1));
UCUNIT__CHECK_IS_EQUAL(0,goo(0,0,0));
UCUNIT__CHECKLIST_END();
UCUNIT__TESTCASE_END("MC/DC Coverage");
```

```
================================================
TESTCASE:MC/DC Coverage:BEGIN
------------------------------------------------
CHECK: Line 22:IsEqual(1,goo(1,0,1)):PASSED
CHECK: Line 23:IsEqual(1,goo(0,1,1)):PASSED
CHECK: Line 24:IsEqual(0,goo(0,0,0)):PASSED
CHECK: Line 25:Checklist():PASSED
------------------------------------------------
TESTCASE:MC/DC Coverage:PASSED
================================================

************************************************
Testcases: failed: 0
           passed: 1
Checks:    failed: 0
           passed: 3
************************************************
```

Coveragestufen – Bedingungsebene MC/DC

Für die letzte atomare Bedingung (cond 3) wurde der Nachweis für MC/DC nicht erbracht. Es wird angezeigt, welche Testpaare noch notwendig sind.

3 atomare Bedingung
-> 4 Testfälle



Coveragestufen –Multicondition Coverage MCC


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

(a>0)	(b>0)	(c>0)	x
wahr	-	wahr	1
wahr	-	falsch	0
falsch	wahr	wahr	1
falsch	wahr	falsch	0
falsch	falsch	-	0

Alle Testfälle (hier fünf) werden ausgeführt. Normen fordern Multicondition Coverage nicht ein.
Aber: Hat man 100% Multicondition Coverage, so ergibt sich auch 100% MC/DC (Subsumption).

Statt vier Testfälle (n+1) werden alle fünf Testfälle ausgeführt und man erhält automatisch eine 100%ige MC/DC Testüberdeckung.

Coveragestufen – DIN EN 61508

Industrieübergreifend

SIL: Safety Integrity Level

Verfahren/Maßnahme		SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
…	…	…	…	…	…
7a	Strukturabhängige Tests mit einer Testabdeckung (Eingangspunkte) 100% ***Aufrufüberdeckung***	++	++	++	++
7b	Strukturabhängige Tests mit einer Testabdeckung (Anweisungen) 100% ***Anweisungsüberdeckung***	+	++	++	++
7c	Strukturabhängige Tests mit einer Testabdeckung (Verzweigungen) 100% ***Zweigüberdeckung***	+	+	++	++
7d	Strukturabhängige Tests mit einer Testabdeckung (Bedingungen) 100% ***MC/DC oder MCC?***	+	+	+	++

Auszug Tabelle B.2 aus der DIN EN 61508-3

++ Besonders empfohlene Maßnahmen, bei Nichtverwendung ist dies zu begründen
+ Empfohlene Maßnahmen

Normen– ISO 26262

Automotive

ASIL: Automotive Safety Integrity Level

Methods			ASIL			
			A	B	C	D
1a	Statement coverage	***Anweisungsüberdeckung***	++	++	+	+
1b	Branch coverage	***Zweigüberdeckung***	+	++	++	++
1c	MC/DC (Modified Condition/Decision Coverage)	***MC/DC***	+	+	+	++

Tabelle 12 (Software Unit Level) aus der ISO 26262-6

Methods			ASIL			
			A	B	C	D
1a	Function coverage	***Aufrufüberdeckung***	+	+	++	++
1b	Call coverage	***Call Pair Coverage***	+	+	++	++

Tabelle 15 (Software Architectural Level) aus der ISO 26262-6

++ Besonders empfohlene Maßnahmen
+ Empfohlene Maßnahmen

Normen– DO 178B/C und IEC 62304

Luft- und Raumfahrt

DO-178B/C

Level	Auswirkungen	Coveragestufen	Anteile Systeme	Anteile Software
A	„Catastrophic“	MC/DC, C_1, C_0	20-30%	40%
B	„Hazardous/Severe“	C_1, C_0	20%	30%
C	„Major“	C_0	25%	20%
D	„Minor“	-	20%	10%
E	„No Effect“	-	10%	5%

Anweisungsüberdeckung C_0, Zweigüberdeckung C_1, Modifizierter Bedingungs-/ Entscheidungsüberdeckungstest MC/DC

Medizintechnik

IEC 62304

„… it might be **desirable** to use white box methods to more efficiently accomplish certain tests, initiate stress conditions or faults, or increase code coverage of the qualification tests.“ (IEC 62304, Kapitel B.5.7 Software System testing)

Instrumentierung– Prinzip

- Einbau von globalen Zähler (Integer-Arrays) in Programmcode
- Speicherung der Information: Wo welcher Zähler instrumentiert ist!
- Inkrementierung der Zähler beim Durchlauf
- Speicherung der Zählerstände
- Spätere Auswertung der Zählerstände für den Report

```
if ( a<0 )
  { /* … */}
else
  { /* … */}
```

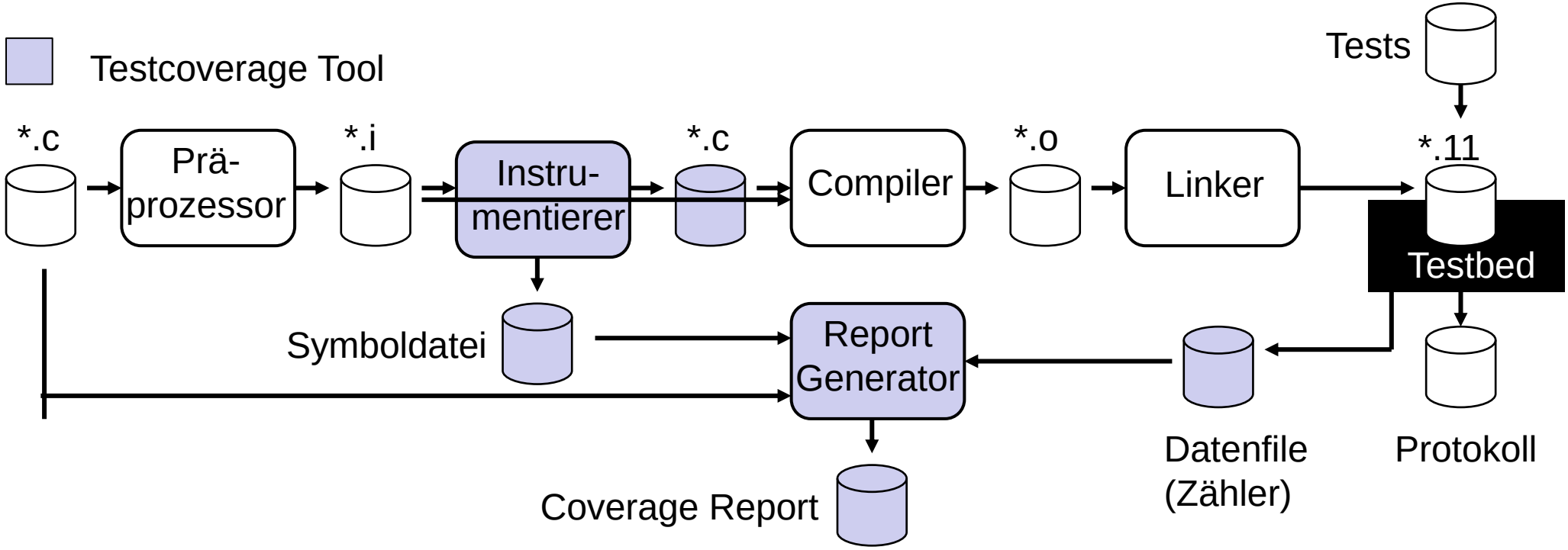
Ohne Komma-Operator

```
if ( (a<0&&(zaehler1++||1)) || (zaehler2++&&0) )
  { /* … */}
else
  { /* … */}
```

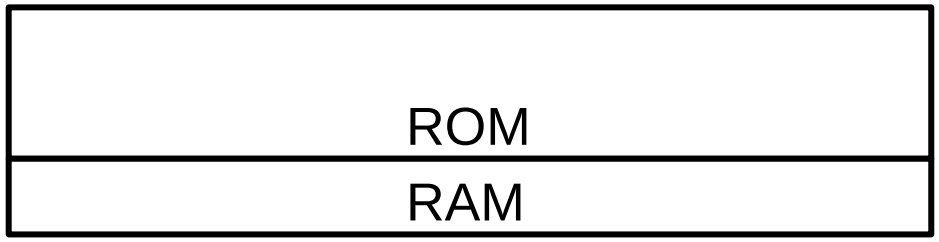
Mit Komma-Operator

```
if ( (a<0) ? (zaehler1++,1) : (zaehler2++,0) )
  { /* … */}
else
  { /* … */}
```

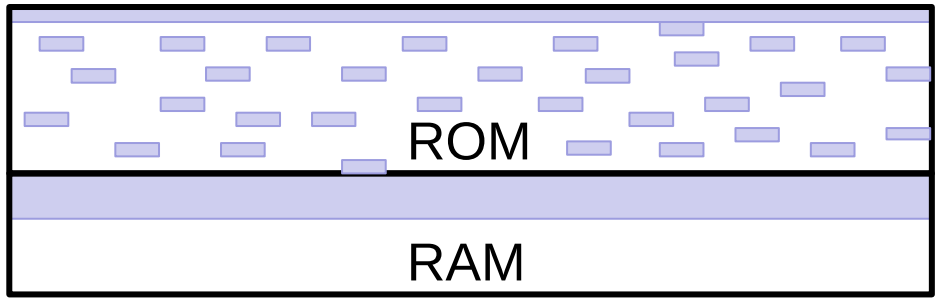
Instrumentierung – Tool-Chain



Speicherbedarf Target ohne Instrumentierung



Speicherbedarf Target mit Instrumentierung

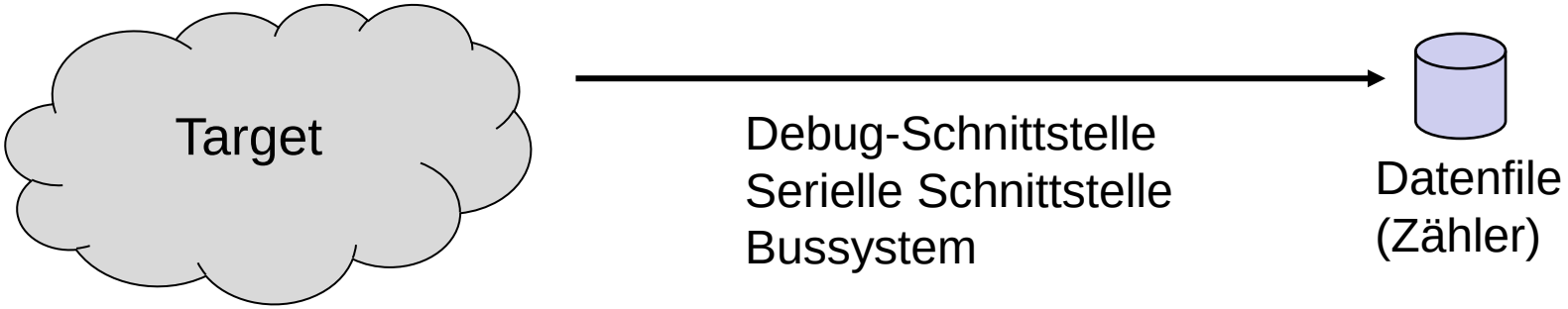


Kleine Targets – Begrenzte Ressourcen

- **RAM**
- **ROM**

} Ursache Speicherknappheit: 80 % RAM, 20 % ROM (prakt. Erfahrungen)

- **Meist kein Dateisystem** (Zähler müssen im RAM gehalten werden)



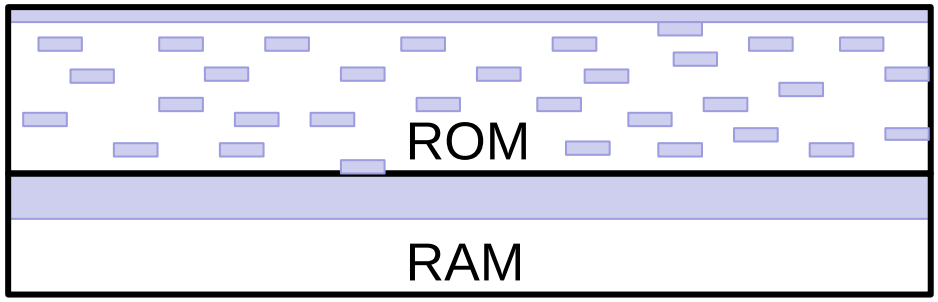
- Begrenzte **Anzahl an Schnittstellen** auf dem Target (Auslesen der Zähler)

  Zusätzliche Schnittstelle für Tests im HW-Design berücksichtigen (Design for Test)

Kleine Targets – Begrenzter Speicher (1)

Speicherbedarf Target
mit Instrumentierung

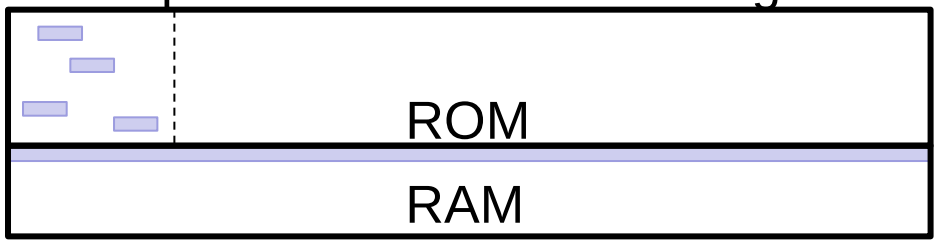
Falls Speicher
nicht ausreicht



Speicherknappheit
20% ROM
80% RAM

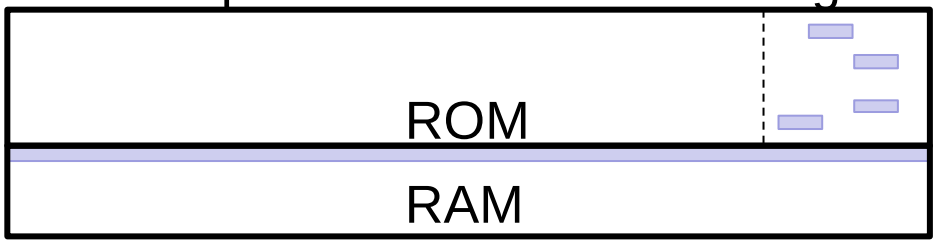
Lösungansatz: Partielle Instrumentierung
Reduktion RAM- und ROM-Bedarf

Speicherbedarf Target
mit partieller Instrumentierung



…

Speicherbedarf Target
mit partieller Instrumentierung



Testautomatisierung der Black- und White-Box-Tests sinnvoll/notwendig

Kleine Targets – Begrenzter Speicher (2)

Reduktion RAM-Bedarf

- **32-, 16- oder 8-Bit Zähler?**
  Einsparung RAM … aber höhere Wahrscheinlichkeit von Überläufen

- **Ein einzelnes Bit als Flag (Bit-Coverage):**
  Wird immer nur gesetzt, Einsparung von RAM, Information wie oft Codestelle durchlaufen wurde geht verloren (Information meist nicht notwendig)

Reduktion ROM-Bedarf

- Geringste geforderte Instrumentierung (Funktions-, Zweig- und Bedingungsebene) wählen

- Nutzung Unterstützung der Hardware bei Bit-Coverage:

-Keine Unterstützung-

```
MOV 0x200, %reg1
OR  2, %reg1
MOV %reg1, 0x200
```

-Unterstützung durch HW-

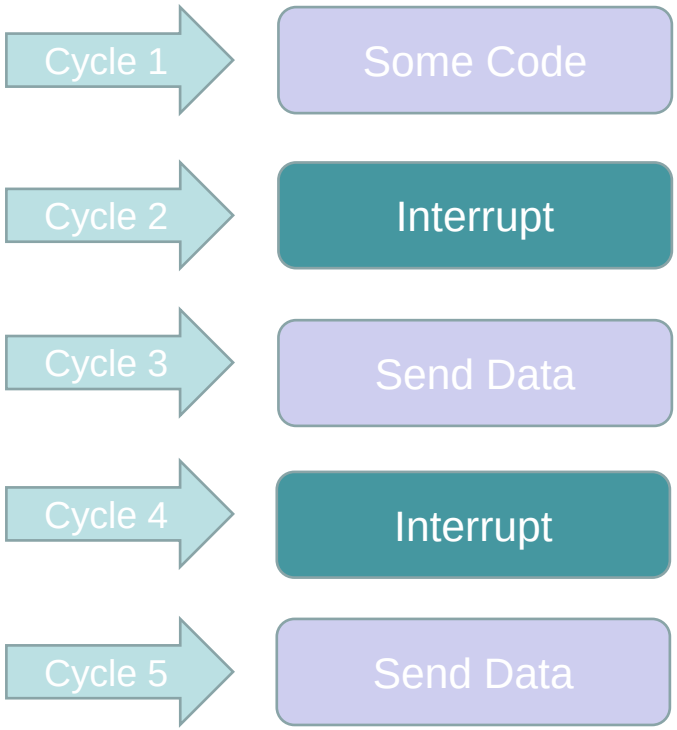
```
ORL 0x200, 2
```

C51

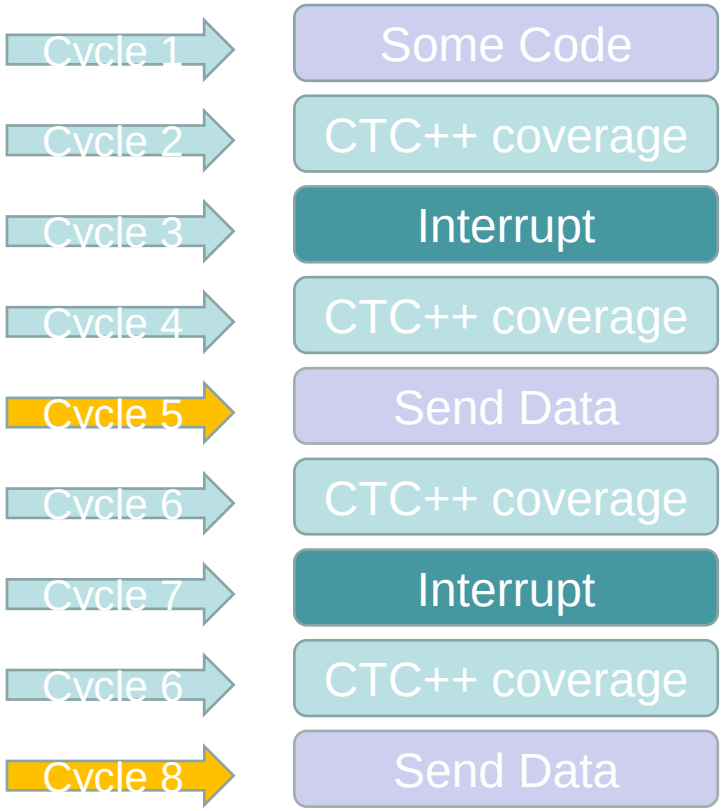
```
SETB 0x1602
```

Melexis

Kleine Targets – Begrenzte CPU Zeit



Uninstrumented Execution Profile



Instrumented Execution Profile

Beispiel– Z80 mit sdcc Compiler und Testwell CTC++


```
int goo( int a, int b, int c)
{
   int x;

   if (((a>0) || (b>0)) && (c>0))
   {
      x = 1;
   }
   else
   {
      x = 0;
   }

   return x;
}
```

ROM-Bedarf

Ohne Instrumentierung:	60 Byte
Funktionsüberdeckung:	67 Byte
Zweigüberdeckung:	118 Byte
Bedingungsüberdeckung:	285 Byte

Einfaches Beispiel mit geringem Code und großen Instrumentierungsoverhead (im Mittel 30% Overhead).

Zusätzlicher RAM-Bedarf ohne Bit-Coverage

Funktionsüberdeckung:	1 Integer
Zweigüberdeckung:	4 Integer
Bedingungsüberdeckung:	7 Integer

Integer:
32 Bit (unsigned long)
als default

Zusätzlicher RAM-Bedarf mit Bit-Coverage

Funktionsüberdeckung:	1 Bit
Zweigüberdeckung:	4 Bit
Bedingungsüberdeckung:	7 Bit

Zusammenfassung

Codecoverage wird zukünftig immer wichtiger (Normen und Testendekriterium)

Es gibt verschiedene Coveragestufen (unterschiedlicher Testaufwand pro Coveragestufe)

Ansätze wurden gezeigt, um die Herausforderungen (Speicherknappheit, kein Filesystem und begrenzte Anzahl von Schnittstellen) auf kleinen Targets zu meistern. Hierin unterscheiden sich die verschiedenen Coverage-Tools.

Empfehlung: Führen Sie im Vorfeld eine Evaluierung von Coverage-Tools auf ihrem Target durch.

Fragen

Roland Bär
baer@verifysoft.com

Andreas Behr
behr@verifysoft.com

Daniel Fischer
daniel.fischer@hs-offenburg.de

Oder besuchen Sie uns am Messestand!