

Verlässliche Systemsoftware

Codierung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware

Technische Universität Dortmund

<https://sys.cs.tu-dortmund.de>

KW48 2020



- Letztes Kapitel: **Replikation** $\leadsto$ Grobe Granularität
 - Zum Zweck¹ der **Fehlermaskierung** (vgl. IV/12)
 - Im Allgemeinen durch **Mehrheitsentscheid** ($f + 2$ Replikate)
 - Durch **einfache Replikation** ($f + 1$ Replikate) im Falle von **fail-silent**-Verhalten
 - Hardwarebasiert durch redundanter **Rechenknoten** (vgl. IV/23 ff)
 - Softwarebasiert mittels **Prozessen** (vgl. IV/31 ff)



Heute: **Codierung** $\leadsto$ Feine Granularität

- Zum Zweck¹ der **Fehlererkennung**
 - Implementierung von **fail-silent**-Verhalten
- Systematische Nutzung von **Informationsredundanz**
- Auf der Ebene **einzelner Instruktionen** und **Datenelemente**
- **Arithmetische Codierung** von Werten und Berechnungen



Maßgeschneiderte Anwendung von Redundanz $\leadsto$ **kombinierter Einsatz**

- Ergänzung der Stärken, Eliminierung der Schwächen

¹ Im Kontext dieser Veranstaltung, ohne Beschränkung der Allgemeinheit.

1 Grundlagen der Codierung

2 Arithmetische Codierung

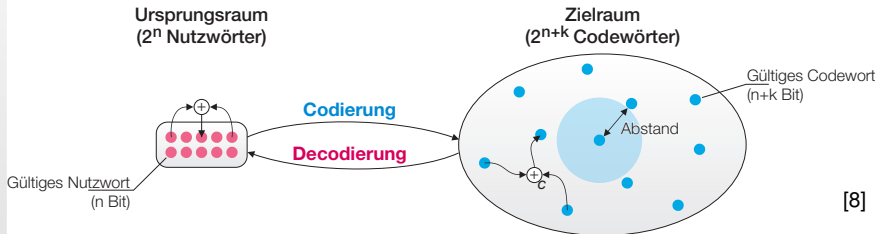
- AN-Codes
- ANB-Codes
- ANBD-Codes
- Arithmetische Codierung des Kontrollflusses
- Implementierungen

3 Heterogener Einsatz von Redundanz

4 Zusammenfassung

Allgemeines Grundprinzip der Codierung

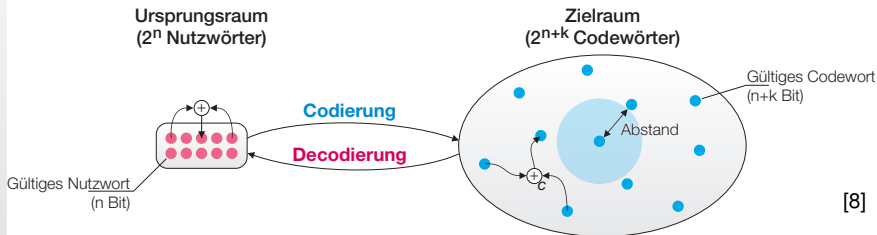
Koordinierter Einsatz von Informationsredundanz



- **Ausgangspunkt:** Darstellung der Nutzdaten mithilfe von n Bits

Allgemeines Grundprinzip der Codierung

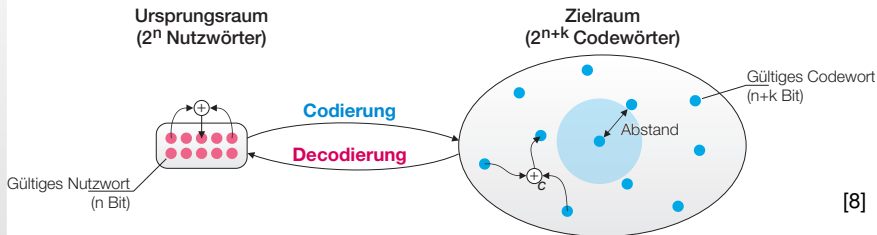
Koordinierter Einsatz von Informationsredundanz



■ Ausgangspunkt: Darstellung der Nutzdaten mithilfe von n Bits

☞ Codierung (engl. *error coding*) der Nutzdaten

- Hinzufügen von k Prüfbits $\mapsto$ Einbringen von Informationsredundanz
- Weiterhin 2^n gültige Codeworte bei nunmehr 2^{n+k} möglichen Worten
- $\rightarrow$ Fehler verlieren sich im ungenutzten Teil des Zielraums



■ **Ausgangspunkt:** Darstellung der Nutzdaten mithilfe von n Bits

👉 **Codierung** (engl. *error coding*) der Nutzdaten

- Hinzufügen von k Prüfbits $\mapsto$ Einbringen von Informationsredundanz
 - Weiterhin 2^n gültige Codeworte bei nunmehr 2^{n+k} möglichen Worten
- $\rightarrow$ Fehler verlieren sich im ungenutzten Teil des Zielraums



Es genügt **eine** Instanz für die Fehlererkennung $\neq$ Replikation



Schwere des Fehlers spielt entscheidende Rolle ($\neq$ Replikation)

⚠ **Schwere des Fehlers** spielt entscheidende Rolle ($\neq$ Replikation)

👉 **Restfehlerwahrscheinlichkeit** p_{sdc} , für **unerkannte Datenfehler** ist:

- Der Fehler überführt also eine gültige wieder in eine gültige Nachricht

$$p_{sdc} = \frac{\text{Anzahl gültiger Nachrichten}}{\text{Anzahl möglicher Worte}} \approx \frac{2^n}{2^{n+k}} = 2^{-k}$$

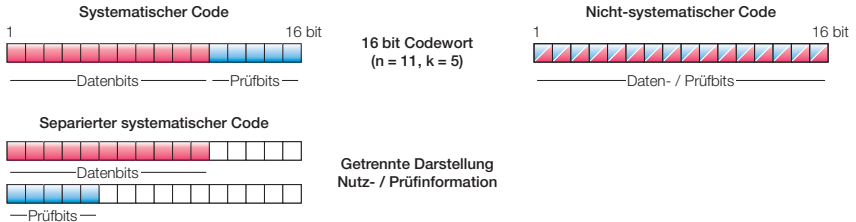
- Sofern man eine Gleichverteilung der Fehler zugrunde legt
→ Stärke der Absicherung hängt direkt an der Zahl k redundanter Bits

- Bezogen auf die Programmausführung bedeutet dies:

$$p_{sdc}(x) = \left(1 - \frac{1}{2^k}\right)^{m-x} \left(\frac{1}{2^k}\right)^x \binom{m}{x}$$

- Von insgesamt m **Instruktionen** (Codewörtern) sind also x **fehlerhaft**
→ Diese werden durch die Codierung **nicht erkannt**

Codierung: Darstellung der Codewörter



[8]



Für die Integration der Prüfbits gibt es verschiedene Möglichkeiten [5]



Systematischer vs. **nicht-systematischer** Code

- Speicherstellen der n Daten- und k Prüfbits sind trennbar vs. vermischt
- Zugriff auf die Nutzdaten ohne Decodierung ist möglich vs. nicht möglich



Separiertes Code: 2er-Tupel (stets systematisch)

- **Getrennte Berechnung** des funktionalen Anteils und der Prüfbits
- **Nicht-separierte Codes** berechnen beides mit **derselben Operation**



Systematische, nicht-separierte Codierung ist **attraktiv**

- Behandlung des funktionalen Anteils/der Prüfbits in derselben Operation
- Keine Decodierung beim Zugriff auf den funktionalen Anteil





Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

- Was kann hier alles schief gehen?



Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

- Was kann hier alles schief gehen?

☞ Transiente Fehler können **folgende Fehler** [2] hervorrufen:



Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

■ Was kann hier alles schief gehen?

☞ Transiente Fehler können **folgende Fehler** [2] hervorrufen:

- 1 **Operandenfehler** (a, b, c, result)
 - Der **Wert des Operanden** wird **verfälscht** oder ist **veraltet**
 - Der Operand selbst wird verfälscht $\leadsto$ **falsche(s) Speicherstelle/Register**



Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

■ Was kann hier alles schief gehen?

☞ Transiente Fehler können **folgende Fehler** [2] hervorrufen:

1 Operandenfehler (a, b, c, result)

- Der **Wert des Operanden** wird **verfälscht** oder ist **veraltet**
- Der Operand selbst wird verfälscht $\leadsto$ **falsche(s) Speicherstelle/Register**

2 Berechnungsfehler ($4 + 5 = 7$)

- Die Operation erzeugt ein **falsches Ergebnis**



Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

■ Was kann hier alles schief gehen?

☞ Transiente Fehler können **folgende Fehler** [2] hervorrufen:

1 Operandenfehler (a, b, c, result)

- Der **Wert des Operanden** wird **verfälscht** oder ist **veraltet**
- Der Operand selbst wird verfälscht $\leadsto$ **falsche(s) Speicherstelle/Register**

2 Berechnungsfehler ($4 + 5 = 7$)

- Die Operation erzeugt ein **falsches Ergebnis**

3 Operatorfehler ($\text{result} = a \times \rightarrow * b$)

- Der Programmzähler/die Instruktion wird verfälscht
- $\rightarrow$ Ausführung einer **falschen Instruktion**



Fehlermodell: Was kann alles schief gehen?

```
1 int sum(int a,int b,int c) {  
2     int result = a + b;  
3     result = result + c;  
4  
5     return result;  
6 }
```

■ Was kann hier alles schief gehen?

☞ Transiente Fehler können **folgende Fehler** [2] hervorrufen:

1 Operandenfehler (a, b, c, result)

- Der **Wert des Operanden** wird **verfälscht** oder ist **veraltet**
- Der Operand selbst wird verfälscht $\leadsto$ **falsche(s) Speicherstelle/Register**

2 Berechnungsfehler ($4 + 5 = 7$)

- Die Operation erzeugt ein **falsches Ergebnis**

3 Operatorfehler ($\text{result} = a \times \rightarrow * b$)

- Der Programmzähler/die Instruktion wird verfälscht
- $\rightarrow$ Ausführung einer **falschen Instruktion**



Datencodierung alleine bietet **keine ausreichende Fehlererfassung**



1 Grundlagen der Codierung

2 Arithmetische Codierung

- AN-Codes
- ANB-Codes
- ANBD-Codes
- Arithmetische Codierung des Kontrollflusses
- Implementierungen

3 Heterogener Einsatz von Redundanz

4 Zusammenfassung



Arithmetische Codierung: Erkennung von Berechnungsfehlern

- Codierung überführt den Wert v in einen codierten Wert v_c :

$$v_c = A \cdot v; \quad A > 1$$

- Codierte Werte sind also immer Vielfache von A
 - Ein unerkannter Fehler müsste abermals ein Vielfaches von A erzeugen
 - Absicherung gegen Fehler im Wertbereich





Arithmetische Codierung: Erkennung von **Berechnungsfehlern**

- **Codierung** überführt den Wert v in einen codierten Wert v_c :

$$v_c = A \cdot v; \quad A > 1$$

- Codierte Werte sind also immer Vielfache von A
 - Ein unerkannter Fehler müsste abermals ein Vielfaches von A erzeugen
 - Absicherung gegen Fehler im Wertbereich

- **Decodierung** durch **Modulo-Operation** und **Ganzzahldivision**

$$v_c \bmod A = 0 \quad v = v_c / A$$

- **Modulo-Operation** prüft die Korrektheit der Nachricht
- **Ganzzahldivision** extrahiert den funktionalen Teil von v_c





Arithmetische Codierung: Erkennung von **Berechnungsfehlern**

- **Codierung** überführt den Wert v in einen codierten Wert v_c :

$$v_c = A \cdot v; \quad A > 1$$

- Codierte Werte sind also immer Vielfache von A
 - Ein unerkannter Fehler müsste abermals ein Vielfaches von A erzeugen
 - Absicherung gegen Fehler im Wertbereich

- **Decodierung** durch **Modulo-Operation** und **Ganzzahldivision**

$$v_c \bmod A = 0 \quad v = v_c / A$$

- **Modulo-Operation** prüft die Korrektheit der Nachricht
- **Ganzzahldivision** extrahiert den funktionalen Teil von v_c



AN-Codierung ist **nicht-systematisch** und **nicht-separiert**





Die Codierung eines Programms erfolgt vor dessen Laufzeit

- Codierungsschlüssel A ist zur Laufzeit fest
 - Konstanten können während der Übersetzung codiert werden
 - Eingangsdaten werden beim Eintritt in das Programm explizit codiert
- Im Programm selbst wird nur mit codierten Werten gearbeitet

²Umsetzung ist knifflig! Siehe [6, S.64ff].



Die Codierung eines Programms erfolgt vor dessen Laufzeit

- Codierungsschlüssel A ist zur Laufzeit fest
- **Konstanten** können **während der Übersetzung** codiert werden
- **Eingangsdaten** werden beim **Eintritt in das Programm** explizit codiert
- Im Programm selbst wird **nur mit codierten Werten** gearbeitet



Für jede Rechenoperation $\circ$ ist ein codierter Operator $\circ_c$ nötig

- Dieser muss sowohl die Prüfbits als auch den funktionalen Teil v umfassen

²Umsetzung ist knifflig! Siehe [6, S.64ff].



Die Codierung eines Programms erfolgt vor dessen Laufzeit

- Codierungsschlüssel A ist zur Laufzeit fest
- Konstanten können während der Übersetzung codiert werden
- Eingangsdaten werden beim Eintritt in das Programm explizit codiert
- Im Programm selbst wird nur mit codierten Werten gearbeitet



Für jede Rechenoperation $\circ$ ist ein codierter Operator $\circ_c$ nötig

- Dieser muss sowohl die Prüfbits als auch den funktionalen Teil v umfassen

■ Codierte Operatoren für grundlegende Arithmetik

Operation	codierter Op.	Implementierung	Bedeutung
Addition	$z_c = x_c +_c y_c$	$Az = Ax + Ay$	$A(x + y)$
Subtraktion	$z_c = x_c -_c y_c$	$Az = Ax - Ay$	$A(x - y)$
Multiplikation	$z_c = x_c \cdot_c y_c$	$Az = (Ax \cdot Ay) / A$	$A(x \cdot y)$
Division ²	$z_c = \lfloor x_c /_c y_c \rfloor$	$Az = \lfloor (A \cdot Ax) / Ay \rfloor$	$A \lfloor x / y \rfloor$

²Umsetzung ist knifflig! Siehe [6, S.64ff].





Beachte: Die Operation erfolgt immer auf codierten Werten!

- Beispiel: Multiplikation $Az = (Ax \cdot Ay)/A$
 - Zuerst wird $Ax \cdot Ay$ bestimmt
 - Dann wird durch A dividiert
- Gründe: Würde man A sofort kürzen $\leadsto (Ax \cdot y)$ oder $(x \cdot Ay)$
 - Lügen wieder die „nackten, verwundbaren Werte“ x oder y offen
 - Die Operation **kennt** x und y **nicht**, nur die codierte Nachrichten Ax und Ay





Beachte: Die Operation erfolgt immer auf codierten Werten!

- Beispiel: Multiplikation $Az = (Ax \cdot Ay)/A$
 - Zuerst wird $Ax \cdot Ay$ bestimmt
 - Dann wird durch A dividiert
- Gründe: Würde man A sofort kürzen $\leadsto (Ax \cdot y)$ oder $(x \cdot Ay)$
 - Lügen wieder die „**nackten, verwundbaren Werte**“ x oder y offen
 - Die Operation **kennt** x und y **nicht**, nur die codierte Nachrichten Ax und Ay



Beachte: Multiplikation und Division benötigen **Korrekturen**

- Erfordern zusätzliche Multiplikation bzw. Division mit bzw. durch A
- Addition und Subtraktion kommen hingegen ohne Korrektur aus
- Korrekturen sind potentiell immer **teure Operationen**





Beachte: Die Operation erfolgt immer auf codierten Werten!

- Beispiel: Multiplikation $Az = (Ax \cdot Ay)/A$
 - Zuerst wird $Ax \cdot Ay$ bestimmt
 - Dann wird durch A dividiert
- Gründe: Würde man A sofort kürzen $\leadsto (Ax \cdot y)$ oder $(x \cdot Ay)$
 - Lügen wieder die „**nackten, verwundbaren Werte**“ x oder y offen
 - Die Operation **kennt** x und y **nicht**, nur die codierte Nachrichten Ax und Ay



Beachte: Multiplikation und Division benötigen **Korrekturen**

- Erfordern zusätzliche Multiplikation bzw. Division mit bzw. durch A
- Addition und Subtraktion kommen hingegen ohne Korrektur aus
- Korrekturen sind potentiell immer **teure Operationen**



Beachte: Die codierten Operatoren sind nur Implementierungsskizzen

- Sie sind nur aus mathematischer Sicht korrekt
- Sie beachten aber keine Feinheiten wie Über- oder Unterlauf



■ Operationen der booleschen Aussagenlogik

Operation	codierter Op.	Implementierung	Bedeutung
Oder	$z_c = x_c \parallel_c y_c$	$z_c = x_c +_c y_c -_c x_c \cdot_c y_c$	$A(x \parallel y)$
Und	$z_c = x_c \&_c y_c$	$z_c = x_c \cdot_c y_c$	$A(x \cdot y)$
Negation	$z_c = !_c x_c$	$z_c = 1_c -_c x_c$	$A(1 - x)$

→ Diese einfachen Operationen erfordern teils teure Multiplikation

■ Operationen der **booleschen Aussagenlogik**

Operation	codierter Op.	Implementierung	Bedeutung
Oder	$z_c = x_c \parallel_c y_c$	$z_c = x_c +_c y_c -_c x_c \cdot y_c$	$A(x \parallel y)$
Und	$z_c = x_c \&_c y_c$	$z_c = x_c \cdot_c y_c$	$A(x \cdot y)$
Negation	$z_c = !_c x_c$	$z_c = 1_c -_c x_c$	$A(1 - x)$

→ Diese einfachen Operationen erfordern teils teure Multiplikation



Verschiedene Operatoren können **nicht direkt codiert** werden:

- **Schiebeoperationen:** $x_c <<_c y_c$ und $x_c >>_c y_c$
- **Bitweise boolesche Operatoren:** $x_c |_c y_c$, $x_c \&_c y_c$ und $\sim_c x_c$
- **Fließkommaarithmetik:** erfordert **Softwareemulation**
 - Getrennte Behandlung von Vorzeichen, Exponent und Mantisse
 - Können jeweils auf Ganzzahlarithmetik abgebildet werden

→ Auch hier werden **teure Berechnungsverfahren** nötig

- Diese greifen auf die codierten Standardoperatoren zu



Restfehlerwahrscheinlichkeit: Wähle ein geeignetes A !

Die Binärdarstellung stellt besondere Anforderungen.



Bitkipper können gültige Codewörter erzeugen $\leadsto p_{sdc}$

- Die Wahrscheinlichkeit hängt vom Abstand der Codewörter ab
- Ist jedoch nie Null





Restfehlerwahrscheinlichkeit: Wähle ein geeignetes A !

Die Binärdarstellung stellt besondere Anforderungen.



Bitkipper können gültige Codewörter erzeugen $\leadsto p_{sdc}$

- Die Wahrscheinlichkeit hängt vom Abstand der Codewörter ab
- Ist jedoch nie Null

■ Der Codierungsschlüssel A bestimmt die **Robustheit**

- Aus mathematischer Sicht sinnvoll: **große Primzahlen**
- Codierte Datenströme sollen möglichst teilerfremd sein





Restfehlerwahrscheinlichkeit: Wähle ein geeignetes A !

Die Binärdarstellung stellt besondere Anforderungen.



Bitkipper können gültige Codewörter erzeugen $\leadsto p_{sdc}$

- Die Wahrscheinlichkeit hängt vom Abstand der Codewörter ab
- Ist jedoch nie Null

■ Der Codierungsschlüssel A bestimmt die **Robustheit**

- Aus mathematischer Sicht sinnvoll: **große Primzahlen**
- Codierte Datenströme sollen möglichst teilerfremd sein

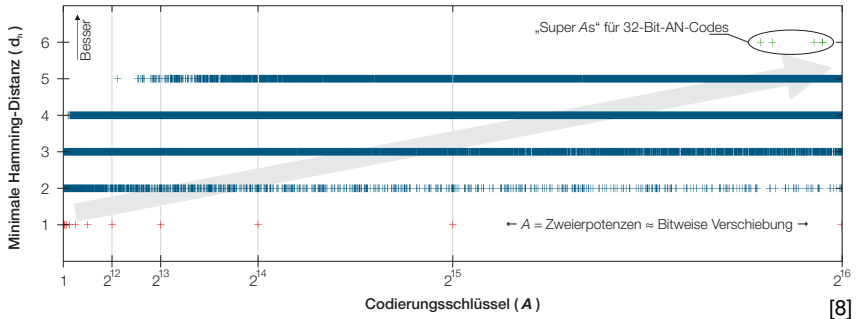
■ In der Praxis entscheidend: **robuste Bitmuster**

- Für binär-codierte Daten hängt dies von der **Hammingdistanz** d_h ab
 - Erfreuliche Eigenschaft: $d_h - 1$ Bitfehler werden sicher erkannt
- An wievielen Bitpositionen unterscheiden sich zwei Nachrichten



Wähle ein geeignetes A! (Forts.)

Experimentelle Bestimmung der Hamming-Distanz



■ Betrachte alle gültigen Codewörter $A \cdot v \rightsquigarrow$ min. Hamming-Distanz

- **Große Schwankungen** $\rightsquigarrow$ größer ist nicht automatisch besser
- Primzahlen sind gut, die Besten sind jedoch zusammengesetzte Zahlen
 - Für 32-Bit-AN-Codes mit 16-Bit-Schlüsseln
 - **Super As** mit $d_h = 6$: 58659, 59665, 63157, 63859 und 63877

- AN-Codes decken Fehler im Wertebereich vollständig ab

- AN-Codes decken Fehler **im Wertebereich vollständig** ab



Fehlererfassung ist jedoch immer noch **unvollständig**

- **Operandenfehler** $\leadsto$ Verwendung eines falschen Operanden
 - Falls z. B. die Adresse beim Laden einer Speicherstelle verfälscht wird
 - Die Operation läuft korrekt ab, auch das Ergebnis ist prinzipiell richtig
 - Es wird aber der **semantisch falsche Wert** berechnet
- **Operatorfehler** $\leadsto$ Verwendung des falschen Operators
 - Falls z. B. beim Laden der Operation ein Bit verfälscht wird
 - Auch hier läuft die Operation korrekt ab
 - Auch hier wird aber der **semantisch falsche Wert** berechnet



Erweiterung der Prüfbits

- Sie sollen mehr semantische Informationen umfassen
 - Welche Operanden gehen in die Operation ein?
 - Welcher Operator ist für die Berechnung vorgesehen?

→ **ANB-Codes**



- Erweiterung der AN-Codierung um **statische Signaturen**:

$$v_c = A \cdot v + B_v; \quad A > 1 \wedge B_v < A$$

- Die Signatur B_v ist spezifisch für die Variable v_c
 - Sie wird durch eine **statische Analyse** vorab bestimmt
 - Der Quelltext der zu schützenden Anwendung muss bekannt sein
- Fehlerüberprüfung und Decodierung

$$v_c \bmod A = B_v \quad v = (v_c - B_v) / A$$

- Erweiterung der AN-Codierung um **statische Signaturen**:

$$v_c = A \cdot v + B_v; \quad A > 1 \wedge B_v < A$$

- Die Signatur B_v ist spezifisch für die Variable v_c
 - Sie wird durch eine **statische Analyse** vorab bestimmt
 - Der Quelltext der zu schützenden Anwendung muss bekannt sein
- Fehlerüberprüfung und Decodierung

$$v_c \bmod A = B_v \quad v = (v_c - B_v) / A$$

- Addition: $z_c = x_c +_c y_c = A(x + y) + B_x + B_y = A(x + y) + B_z$
 - Die Signatur $B_z = B_x + B_y$ von z_c hängt von x_c und y_c ab
 - Signaturen für Eingangswerte werden zur Übersetzungszeit bestimmt
 - Signaturen für berechnete Werte werden daraus abgeleitet
 - Auch hier muss gelten: $B_z = B_x + B_y < A$

- Erweiterung der AN-Codierung um **statische Signaturen**:

$$v_c = A \cdot v + B_v; \quad A > 1 \wedge B_v < A$$

- Die Signatur B_v ist spezifisch für die Variable v_c
 - Sie wird durch eine **statische Analyse** vorab bestimmt
 - Der Quelltext der zu schützenden Anwendung muss bekannt sein
- Fehlerüberprüfung und Decodierung

$$v_c \bmod A = B_v \quad v = (v_c - B_v) / A$$

- Addition: $z_c = x_c +_c y_c = A(x + y) + B_x + B_y = A(x + y) + B_z$

- Die Signatur $B_z = B_x + B_y$ von z_c hängt von x_c und y_c ab
 - Signaturen für Eingangswerte werden zur Übersetzungszeit bestimmt
 - Signaturen für berechnete Werte werden daraus abgeleitet
- Auch hier muss gelten: $B_z = B_x + B_y < A$

- Die Signatur von Berechnungsergebnis ist abhängig von
 - Der Signatur der Operanden $\leadsto$ Eingabe für deren Bestimmung
 - Der durchgeführten Operation $\leadsto$ ihre Bestimmung selbst
 - Wie die AN-Codierung ist auch die ANB-Codierung nicht-separiert
 - Die Signatur B_z wird direkt bei der Addition $x_c +_c y_c$ bestimmt

Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$



Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$

■ Angenommen es würden folgende Fehler auftreten:

- Statt a_c wird x_c verwendet
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_x + B_b + B_c$



Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$

■ Angenommen es würden folgende Fehler auftreten:

- Statt a_c wird x_c verwendet
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_x + B_b + B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**



Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$

■ Angenommen es würden folgende Fehler auftreten:

- Statt a_c wird x_c verwendet
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_x + B_b + B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**
- Subtraktion statt einer Addition in Zeile 3
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_a + B_b - B_c$



Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$

■ Angenommen es würden folgende Fehler auftreten:

- Statt a_c wird x_c verwendet
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_x + B_b + B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**
- Subtraktion statt einer Addition in Zeile 3
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_a + B_b - B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**



Fehlererkennung durch ANB-Codierung

```
1 int sum(int a_c,int b_c,int c_c) {  
2     int result_c = a_c + b_c;  
3     result_c = result_c + c_c;  
4  
5     return result_c;  
6 }
```

■ Berechnungsergebnisse und entsprechende Signaturen

Zeile 2 $a_c + b_c = A(a + b) + B_a + B_b$

Zeile 3 $a_c + b_c + c_c = A(a + b + c) + B_a + B_b + B_c$

■ Angenommen es würden folgende Fehler auftreten:

- Statt a_c wird x_c verwendet
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_x + B_b + B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**
- Subtraktion statt einer Addition in Zeile 3
 - Die Signatur würde sich ändern: $B_{result} \neq B_a + B_b - B_c$
 - Eine Erkennung des Fehlers ist **gewährleistet**



Keine Fehlererfassung auf der **zeitlichen Achse**





The Vital Coded Processor (VCP, [2])

Bislang vollständigste Variante der arithmetischen Codierung



Forin erweitert den Ansatz um Zeitstempel $D \rightsquigarrow$ **ANBD-Codes**

- Ursprünglich: ein durch ANBD-Codierung geschützter Prozessor
 - Teilweise werden Elemente **direkt in Hardware** implementiert
 - **En- bzw. Decodieren** der ursprünglichen bzw. codierten Nachricht
 - **Überprüfung der Nachrichten** und entsprechende Ausgangssteuerung
 - Basierend auf dem Motorola 68000, später dem Motorola 68020
 - **Codierte Operationen** wurden **in Software** umgesetzt
- Einsatz in (**halb-)**automatischen **Zugführungssystemen**
 - Paris, Linie „RER A“, System „SACEM“
 - Lyon, Metrolinie „D“, System „MAGGALY“
 - Chicago, Flughafen, System „VAL“





Wird eine Variable **nicht aktualisiert**, wird dies bisher nicht erkannt

- Die Berechnung findet entsprechend mit veralteten Daten statt



Wird eine Variable **nicht aktualisiert**, wird dies bisher nicht erkannt

- Die Berechnung findet entsprechend mit veralteten Daten statt



Lösung: „Alter“ eines Datums wird durch einen **Zeitstempel D** gesichert

$$v_c = A \cdot v + B_v + D; \quad A > 1 \wedge B_v + D < A$$

- Dieser Zeitstempel überwacht die **Anzahl der Variablenaktualisierungen**
 - Der Zeitstempel muss **dynamisch zur Laufzeit** bestimmt werden
 - Für die Überprüfung des Codeworts muss der erwartete Wert bekannt sein
- Die Signatur B_v und A werden aber auch hier **statisch** bestimmt





Wird eine Variable **nicht aktualisiert**, wird dies bisher nicht erkannt

- Die Berechnung findet entsprechend mit veralteten Daten statt



Lösung: „Alter“ eines Datums wird durch einen **Zeitstempel D** gesichert

$$v_c = A \cdot v + B_v + D; \quad A > 1 \wedge B_v + D < A$$

- Dieser Zeitstempel überwacht die **Anzahl der Variablenaktualisierungen**
 - Der Zeitstempel muss **dynamisch zur Laufzeit** bestimmt werden
 - Für die Überprüfung des Codeworts muss der erwartete Wert bekannt sein
- Die Signatur B_v und A werden aber auch hier **statisch** bestimmt



Vollständige Abdeckung aller auf Folie 8 angenommen Fehler

- Operandenfehler, Operationsfehler und Operatorfehler

- **Keine direkte Codierung** der Division
 - Emulation durch wiederholte Subtraktion oder Rückfall zur AN-Codierung
 - Addition, Subtraktion und Multiplikation werden unterstützt
- **Mehr aufwendige Korrekturoperationen** sind erforderlich
 - Für die Multiplikation gilt beispielsweise

$$\begin{aligned}x_c \cdot_c y_c &\neq A \cdot x \cdot y + B_x \cdot B_y \\&= A^2 \cdot x \cdot y + A \cdot x \cdot B_y + A \cdot y \cdot B_x + B_x \cdot B_y\end{aligned}$$

- **Keine direkte Codierung** der Division
 - Emulation durch wiederholte Subtraktion oder Rückfall zur AN-Codierung
 - Addition, Subtraktion und Multiplikation werden unterstützt
- **Mehr aufwendige Korrekturoperationen** sind erforderlich
 - Für die Multiplikation gilt beispielsweise

$$\begin{aligned}x_c \cdot_c y_c &\neq A \cdot x \cdot y + B_x \cdot B_y \\&= A^2 \cdot x \cdot y + A \cdot x \cdot B_y + A \cdot y \cdot B_x + B_x \cdot B_y\end{aligned}$$



Was passiert eigentlich bei **Fehlern im Kontrollfluss**?

- Der falsche Grundblock im Kontrollflussgraphen wird angesprungen
 - Weil z. B. die Entscheidung eines bedingten Sprungs verfälscht wird
- Einige Instruktionen werden übersprungen
 - Weil z. B. der **Instruktionszähler** (engl. *program counter*) verfälscht wird

Direkte Codierung des Kontrollflusses nach Forin [2]

Requires: $B_x, B_y, B_{true}, B_{false} \leadsto$ Konstante Signaturen für Operanden und Zweige

State: x_c, y_c, B_{cond}

```
1 if (DECODE( $x_c$ )  $\geq$  DECODE( $y_c$ )) then  $B_{cond} \leftarrow B_{true}$  else  $B_{cond} \leftarrow B_{false}$ 
2
3 if (DECODE( $x_c$ )  $\geq$  DECODE( $y_c$ )) then
4    $y_c \leftarrow x_c - y_c$   $\leadsto$  Signatur:  $B_x - B_y$ 
5 else
6    $y_c \leftarrow x_c + y_c$   $\leadsto$  Signatur:  $B_x + B_y$ 
7    $y_c \leftarrow y_c - (B_x + B_y) + (B_x - B_y)$   $\leadsto$  Signaturanpassung:  $B_x - B_y$ 
8    $y_c \leftarrow y_c - B_{false} + B_{true}$   $\leadsto$  Verzweigung signieren
9 end if
10
11  $y_c \leftarrow y_c + B_{cond}$   $\leadsto$  Signaturanpassung, Sollwert:  $B_x - B_y + B_{true}$ 
```

 Idee: Kontrollflussabhängige Signaturanpassung

- Ziel ist der Sollwert in Zeile 11 (true-Fall + B_{true})
- Anpassung im else-Fall



Gemeinsamer Operanden (hier: y_c) und Berechnungen in beiden Zweigen (Grundblöcken) notwendig





Idee: Jeder Grundblock x bekommt eine explizite Signatur BB_x

- BB_x umfasst die Summe aller (regulären) Signaturen im Grundblock x

■ Überprüfung zur Laufzeit durch Funktionswächter (engl. *Watchdog*)

- Die Anwendung sendet die ermittelte Signatur BB_x an den Wächter
- Er besitzt ein Feld s der zu erwartenden Werte BB_i





Idee: Jeder Grundblock x bekommt eine explizite Signatur BB_x

- BB_x umfasst die Summe aller (regulären) Signaturen im Grundblock x

■ Überprüfung zur Laufzeit durch Funktionswächter (engl. *Watchdog*)

- Die Anwendung sendet die ermittelte Signatur BB_x an den Wächter
- Er besitzt ein Feld s der zu erwartenden Werte BB_i

■ Dynamische Berechnung von BB_x mittels Zählvariable acc

- Wert am Beginn des Grundblocks: $acc = s[i] - BB_x - x_{id}$
 - $s[x]$ enthält den erwarteten Wert nach dem Grundblock x
 - Die statisch bestimmte Signatur BB_x wird abgezogen
 - Ebenso eine eindeutige ID $x_{id} \leadsto$ bedingte Sprünge





Idee: Jeder Grundblock x bekommt eine explizite Signatur BB_x

- BB_x umfasst die Summe aller (regulären) Signaturen im Grundblock x

■ Überprüfung zur Laufzeit durch Funktionswächter (engl. *Watchdog*)

- Die Anwendung sendet die ermittelte Signatur BB_x an den Wächter
- Er besitzt ein Feld s der zu erwartenden Werte BB_i

■ Dynamische Berechnung von BB_x mittels Zählvariable acc

- Wert am Beginn des Grundblocks: $acc = s[i] - BB_x - x_{id}$
 - $s[x]$ enthält den erwarteten Wert nach dem Grundblock x
 - Die statisch bestimmte Signatur BB_x wird abgezogen
 - Ebenso eine eindeutige ID $x_{id} \leadsto$ bedingte Sprünge
- acc wird kontinuierlich um die jeweils bestimmte Signatur inkrementiert



Idee: Jeder Grundblock x bekommt eine explizite Signatur BB_x

- BB_x umfasst die Summe aller (regulären) Signaturen im Grundblock x

■ Überprüfung zur Laufzeit durch Funktionswächter (engl. *Watchdog*)

- Die Anwendung sendet die ermittelte Signatur BB_x an den Wächter
- Er besitzt ein Feld s der zu erwartenden Werte BB_i

■ Dynamische Berechnung von BB_x mittels Zählvariable acc

- Wert am Beginn des Grundblocks: $acc = s[i] - BB_x - x_{id}$
 - $s[x]$ enthält den erwarteten Wert nach dem Grundblock x
 - Die statisch bestimmte Signatur BB_x wird abgezogen
 - Ebenso eine eindeutige ID $x_{id} \leadsto$ bedingte Sprünge
- acc wird kontinuierlich um die jeweils bestimmte Signatur inkrementiert
- Für den nachfolgenden Grundblock wird acc neu initialisiert



Idee: Jeder Grundblock x bekommt eine explizite Signatur BB_x

- BB_x umfasst die Summe aller (regulären) Signaturen im Grundblock x

■ Überprüfung zur Laufzeit durch Funktionswächter (engl. *Watchdog*)

- Die Anwendung sendet die ermittelte Signatur BB_x an den Wächter
- Er besitzt ein Feld s der zu erwartenden Werte BB_i

■ Dynamische Berechnung von BB_x mittels Zählvariable acc

- Wert am Beginn des Grundblocks: $acc = s[i] - BB_x - x_{id}$
 - $s[x]$ enthält den erwarteten Wert nach dem Grundblock x
 - Die statisch bestimmte Signatur BB_x wird abgezogen
 - Ebenso eine eindeutige ID $x_{id} \leadsto$ bedingte Sprünge
- acc wird kontinuierlich um die jeweils bestimmte Signatur inkrementiert
- Für den nachfolgenden Grundblock wird acc neu initialisiert



Ansatz erfordert keine gemeinsamen Operanden jedoch einen vertrauenswürdigen (Hardware-) Funktionswächter für s





- Interpretiert binäre Maschinencodeabbilder eines Programms
 - Zielsystem ist der DLX-Prozessor
 - Ein RISC-Prozessor für akademische Anwendungsgebiete
 - Konstanten, Speicheradressen etc. werden zur Ladezeit codiert
 - Codierte Operationen sind in Software implementiert



Fehlerinjektion $\leadsto$ Fehlererkennungsrate ist sehr gut

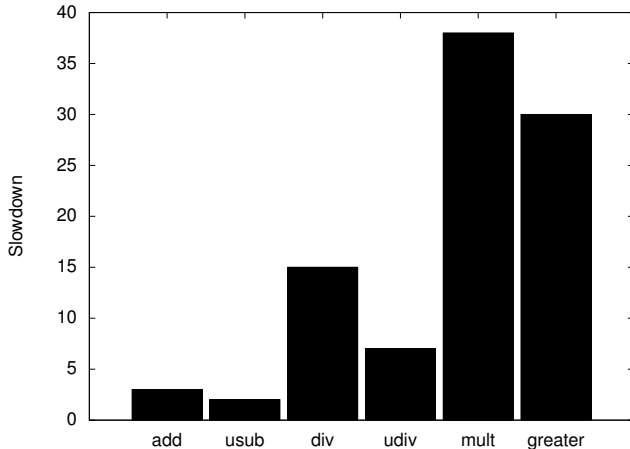
- Codierter Interpreter: keine fehlerhaften Ergebnisse
- Nicht-codierte Ausführung:
 - Interpretiert: 4% der Ergebnisse fehlerhaft
 - Native Ausführung: 9% der Ergebnisse fehlerhaft
 - Interpreter verdeckt bereits diverse Fehler





Sehr hohe Laufzeitkosten interpretierter codierter Operationen

- Im Vergleich zu interpretierten aber nicht-codierten Operationen
- Eine Multiplikation dauert 38-mal so lange ...



- Codierung wird **vor der Laufzeit durch einen Compiler** durchgeführt

- Nicht mehr zur Laufzeit durch einen Interpreter

☞ Hierfür muss aber der **Quelltext** vorhanden sein

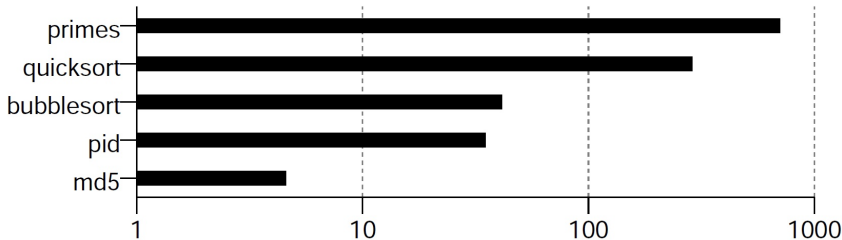
- Nur in **Binärform** vorliegende Bibliotheken stellen ein Problem dar!

→ Hier kommen **Hüllfunktionen** (engl. *wrapper*) zum Einsatz

- Diese extrahieren die eigentlichen Werte der codierten Variablen
- Die Berechnung selbst findet dann nicht-codiert also ungeschützt statt

☞ Allerdings sind die Geschwindigkeitszugewinne beträchtlich:

- Beschleunigung im Vergleich zum interpretierenden SEP

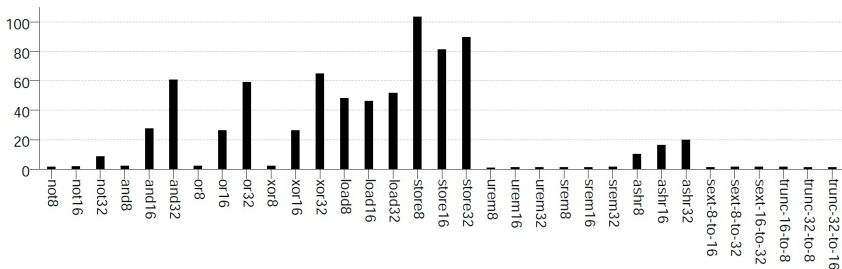




Vergleich mit nativ ausgeführten Operationen

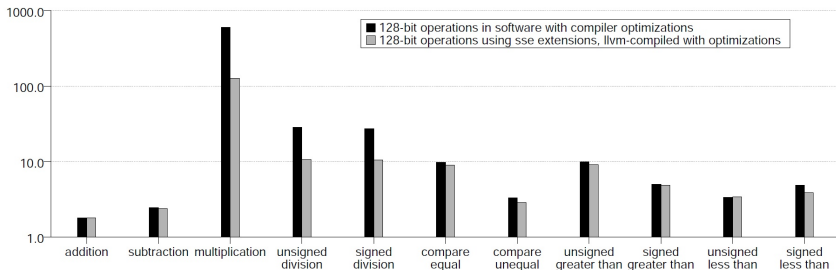
→ Bringt die **wahren Laufzeitkosten** zutage

■ Operationen, die nicht direkt codierbar sind:



- Das Speichern eines 8 Bit großen Wortes ist bis zu 100x langsamer
 - Diese Operation besteht aus diversen Einzelschritten
 - Laden, bitweises Und, Schiebeoperation, ...
 - All das muss in codierter Form ablaufen, all das ist teuer

Direkt codierbare arithmetische Operationen



- Auch hier sind Laufzeitkosten zum Teil beträchtlich
 - Addition und Subtraktion sind vergleichsweise günstig
 - Einfache Vergleichsoperationen sind aber relativ teuer
 - Multiplikation und Division benötigen teure 128-Bit-Operationen

1 Grundlagen der Codierung

2 Arithmetische Codierung

- AN-Codes
- ANB-Codes
- ANBD-Codes
- Arithmetische Codierung des Kontrollflusses
- Implementierungen

3 Heterogener Einsatz von Redundanz

4 Zusammenfassung



Schwächen der Codierung



Arithmetischen Codierung ist (derzeit) **unzureichend für die Härtung kompletter Programme**

³Für die Testverfahren notwendige Ressourcen (Rechenzeit, Kommunikation, ...) im Vergleich zur eigentlichen Systemfunktion.





Schwächen der Codierung



Arithmetischen Codierung ist (derzeit) **unzureichend für die Härtung kompletter Programme**



Sehr **hoher Ressourcenbedarf**

- Beispiel Laufzeitkosten von 500 – 1000 % vs. ≈ 300 % für Replikation
- Hohe Bandbreite³ für die Fehlerdiagnose

³Für die Testverfahren notwendige Ressourcen (Rechenzeit, Kommunikation, ...) im Vergleich zur eigentlichen Systemfunktion.



Schwächen der Codierung



Arithmetischen Codierung ist (derzeit) **unzureichend für die Härtung kompletter Programme**



Sehr hoher Ressourcenbedarf

- Beispiel Laufzeitkosten von 500 – 1000 % vs. ≈ 300 % für Replikation
- Hohe Bandbreite³ für die Fehlerdiagnose



Fehlerfortpflanzung schwer zu unterbinden

- Kontrollflussüberwachung in der Praxis unzuverlässig
 - Alternative: fehlerfreie Prüfinstanz (Perfektionskern)
 - Schutzwirkung bei fortgesetzter Verwendung fehlerhafter Werte unsicher
- Zusätzliche Bandbreite für Fehlerdiagnose $\leadsto$ Kosten

³Für die Testverfahren notwendige Ressourcen (Rechenzeit, Kommunikation, ...) im Vergleich zur eigentlichen Systemfunktion.



Schwächen der Codierung



Arithmetischen Codierung ist (derzeit) **unzureichend für die Härtung kompletter Programme**



Sehr hoher Ressourcenbedarf

- Beispiel Laufzeitkosten von 500 – 1000 % vs. ≈ 300 % für Replikation
- Hohe Bandbreite³ für die Fehlerdiagnose



Fehlerfortpflanzung schwer zu unterbinden

- Kontrollflussüberwachung in der Praxis unzuverlässig
 - Alternative: fehlerfreie Prüfinstanz (Perfektionskern)
 - Schutzwirkung bei fortgesetzter Verwendung fehlerhafter Werte unsicher
- Zusätzliche Bandbreite für Fehlerdiagnose $\leadsto$ Kosten



Restfehlerwahrscheinlichkeit (vgl. Folie 6)

- Schwere des Fehlers hat Einfluss auf die Erkennungsleistung



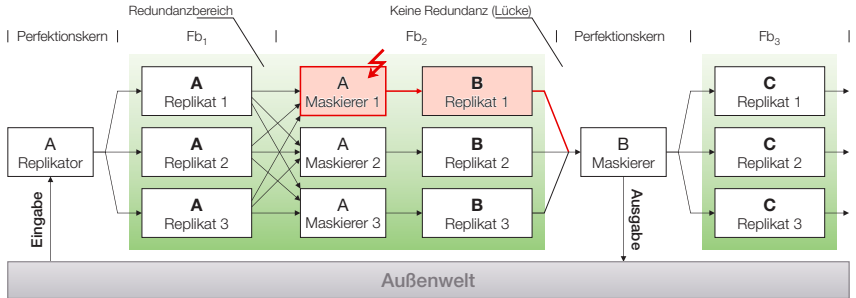
Konzeptbedingte Eigenschaft der Codierung

³Für die Testverfahren notwendige Ressourcen (Rechenzeit, Kommunikation, ...) im Vergleich zur eigentlichen Systemfunktion.



Schwächen der Replikation

Kritische Fehlerstellen in der strukturellen Redundanz



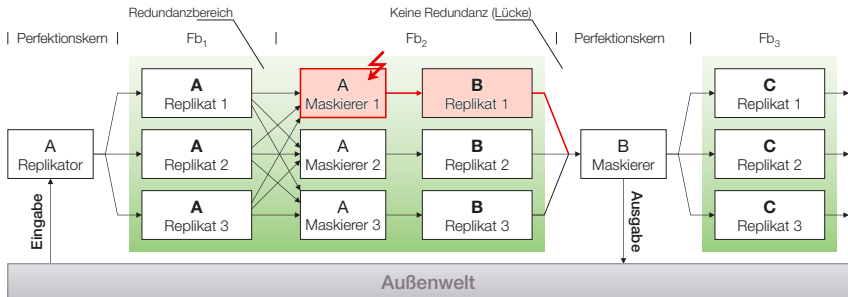
Vollständige Replikation ist typischerweise **unmöglich**

- Ergebnisse müssen (irgendwann) konsolidiert werden
 - Insbesondere problematisch bei softwarebasierter Replikation
- Unvollständigkeit der Redundanz (Lücken im **Redundanzbereich**)



Schwächen der Replikation

Kritische Fehlerstellen in der strukturellen Redundanz



Vollständige Replikation ist typischerweise unmöglich

- Ergebnisse müssen (irgendwann) konsolidiert werden
 - Insbesondere problematisch bei softwarebasierter Replikation
- Unvollständigkeit der Redundanz (Lücken im Redundanzbereich)

Kritische Fehlerstellen in der Infrastruktur (vgl. IV/21)

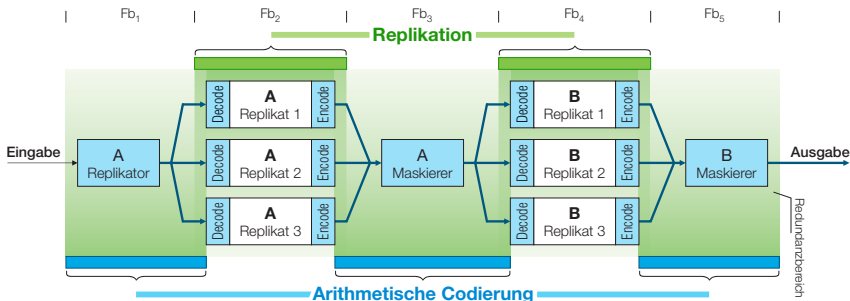
- Zeitliche und räumliche Isolation (Betriebssystem?)
- Eingangsreplikation & Mehrheitsentscheider





Combined Redundancy – CoRed [9]

Forschung @ I4



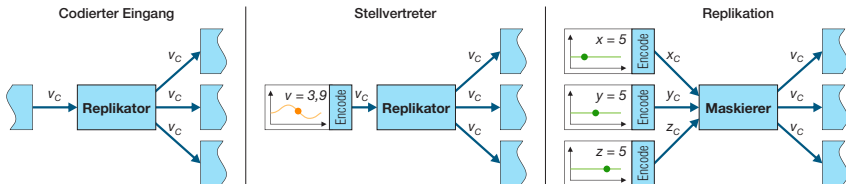
[8]



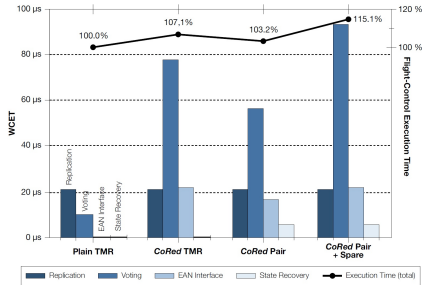
Maßgeschneiderter Einsatz verschiedener Redundanzarten

- Stärken kennen und Schwächen verdecken
- Genau diesen Weg beschreiten wir mit **Combined Redundancy (CoRed)**
 - Die eigentliche **Berechnung** wird durch Redundanz geschützt
 - Die **Replikationsinfrastruktur** wird **arithmetisch codiert**

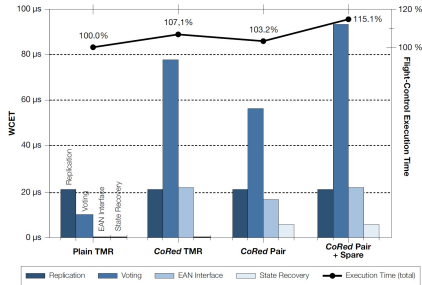




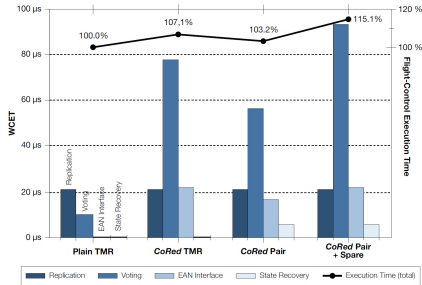
- Mehrheitsentscheider als codierter Operator $\leadsto$ **CoRed-Voter**
 - Akzeptiert codierte Varianten (x_C, y_C, z_C) und liefert codierten Gewinner (v_C)
 - Genaue Funktionsweise wird in der Übung besprochen
- **Codierte Eingangsreplikation**
 - Vorgehen wie gehabt (vgl. IV/19)
 - Schnellstmögliche Codierung der Eingaben
 - Akzeptanzmaskierer nutzt codierten Mehrheitsentscheider
- Idealerweise **codierende Sensoren** und **Aktoren**
 - Zu keinem Zeitpunkt ungeschützte Werte
 - Lückenlose Fehlerdiagnose



- Balkengrafik gibt **nur die Mehrkosten** der einzelnen Komponenten an
 - Also Mehrkosten für die replizierte Ausführung, Mehrheitsentscheid, ...
 - Der Aufwand für den Mehrheitsentscheid steigt durch Codierung enorm
 - Das sind die Datensätze „Plain TMR“ und „CoRed TMR“



- Balkengrafik gibt **nur die Mehrkosten** der einzelnen Komponenten an
 - Also Mehrkosten für die replizierte Ausführung, Mehrheitsentscheid, ...
 - Der Aufwand für den Mehrheitsentscheid steigt durch Codierung enorm
 - Das sind die Datensätze „Plain TMR“ und „CoRed TMR“
- Die Kurve bezieht sich auf die **gesamte Ausführungszeit**
 - „CoRed TMR“ benötigt hier also nur 7,1% mehr Zeit als „Plain TMR“
 - Würde man alles codieren, wäre man hier bei mehreren 100%



CoRed

Selektive Anwendung von arithmetischer Codierung

- Sehr gute Fehlertoleranz
- Bei vertretbaren Kosten

- Balkengrafik gibt **nur die Mehrkosten** der einzelnen Komponenten an
 - Also Mehrkosten für die replizierte Ausführung, Mehrheitsentscheid, ...
 - Der Aufwand für den Mehrheitsentscheid steigt durch Codierung enorm
 - Das sind die Datensätze „Plain TMR“ und „CoRed TMR“
- Die Kurve bezieht sich auf die **gesamte Ausführungszeit**
 - „CoRed TMR“ benötigt hier also nur 7,1% mehr Zeit als „Plain TMR“
 - Würde man alles codieren, wäre man hier bei mehreren 100%

1 Grundlagen der Codierung

2 Arithmetische Codierung

- AN-Codes
- ANB-Codes
- ANBD-Codes
- Arithmetische Codierung des Kontrollflusses
- Implementierungen

3 Heterogener Einsatz von Redundanz

4 Zusammenfassung

Fehlererkennung Möglichst ohne redundante Ausführung

- Erkennung von Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehlern
→ Einsatz räumlicher Redundanz durch Prüfbits

Arithmetisch Codierung

- nicht-systematisch und nicht-separiert

AN-Codierung $\leadsto$ Fehler im Wertebereich

- Codierung: Multiplikation mit einem konstanten Faktor A
- Codierte Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division
- Aussagenlogik, Schiebeoperatoren, Fließkommaarithmetik

ANBD-Codierung Erweitert die AN-Codierung

- Um statische Signaturen und dynamische Zeitstempel
- Codierung des Kontrollflusses $\leadsto$ Signaturen für Grundblöcke

CoRed-Ansatz $\leadsto$ selektive Anwendung der ANBD-Codierung

- Durchgehende arithmetische Codierung wäre zu teuer

- [1] Fetzer, C. ; Schiffel, U. ; Süßkraut, M. :
AN-Encoding Compiler: Building Safety-Critical Systems with Commodity Hardware.
In: Buth, B. (Hrsg.) ; Rabe, G. (Hrsg.) ; Seyfarth, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 28th International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP '09)*.
Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, 2009. –
ISBN 978–3–642–04467–0, S. 283–296

- [2] Forin, P. :
Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems.
In: *Proceedings of the IFAC IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation (CCCT '89)*, 1989, S. 79–84

- [3] Hamming, R. W.:
Error detecting and error correcting codes.
In: *Bell System technical journal* 29 (1950), Nr. 2, S. 147–160

- [4] Peterson, W. W. ; Weldon, E. J.:
Error-correcting codes.
2.
Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1972. –
572 S. –
ISBN 978–0–2621–6039–1

- [5] Rao, T. R. N.:
Error Coding for Arithmetic Processors.
1.
Orlando, FL, USA : Academic Press, 1974. –
218 S. –
ISBN 978–0–1258–0750–0
- [6] Schiffel, U. :
Hardware Error Detection Using AN-Codes, Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik,
Diss., 2011
- [7] Schiffel, U. ; Schmitt, A. ; Süßkraut, M. ; Fetzer, C. :
ANB- and ANBDMem-encoding: detecting hardware errors in software.
In: Schoitsch, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 29th International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP '10)*.
Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, 2010. –
ISBN 978–3–642–15650–2, S. 169–182
- [8] Ulbrich, P. :
Ganzheitliche Fehlertoleranz in eingebetteten Softwaresystemen,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2014

- [9] Ulbrich, P. ; Hoffmann, M. ; Kapitza, R. ; Lohmann, D. ; Schröder-Preikschat, W. ; Schmid, R. :
Eliminating Single Points of Failure in Software-Based Redundancy.
In: *Proceedings of the 9th European Dependable Computing Conference (EDCC '12)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Mai 2012. –
ISBN 978–1–4673–0938–7, S. 49–60
- [10] Wappler, U. ; Fetzer, C. :
Software Encoded Processing: Building Dependable Systems with Commodity Hardware.
In: Saglietti, F. (Hrsg.) ; Oster, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 26th International Conference on
Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP '07)*.
Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, 2007. –
ISBN 978–3–540–75100–7, S. 356–369