Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

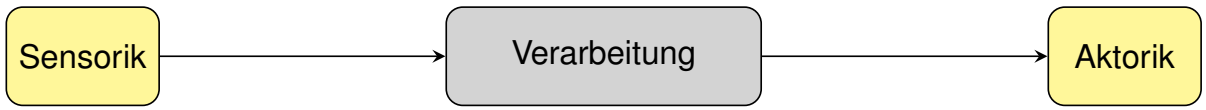
Codierung

Phillip Raffeck, Tim Rheinfels, Simon Schuster, Peter Wägemann

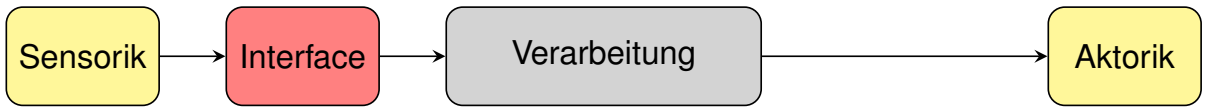
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
https://sys.cs.fau.de

Wintersemester 2022

Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)

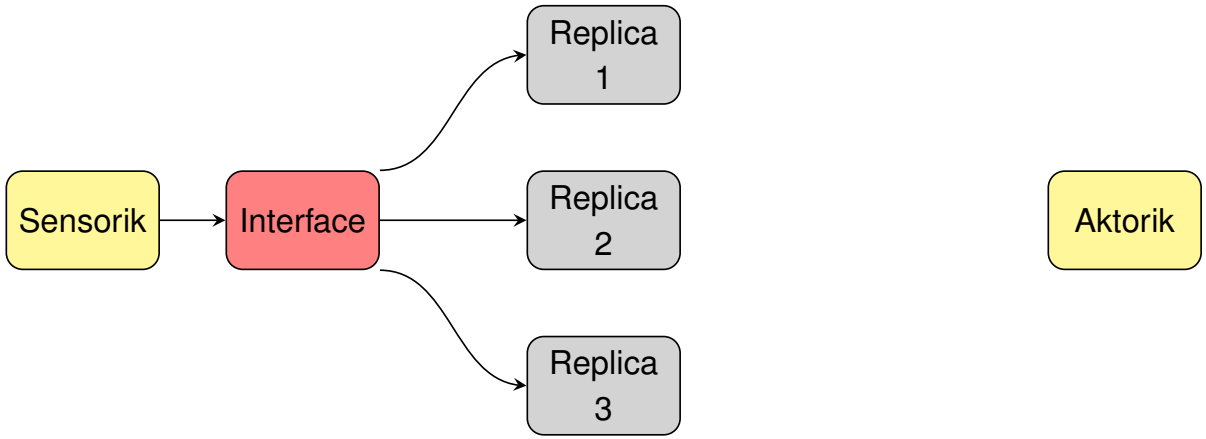


Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



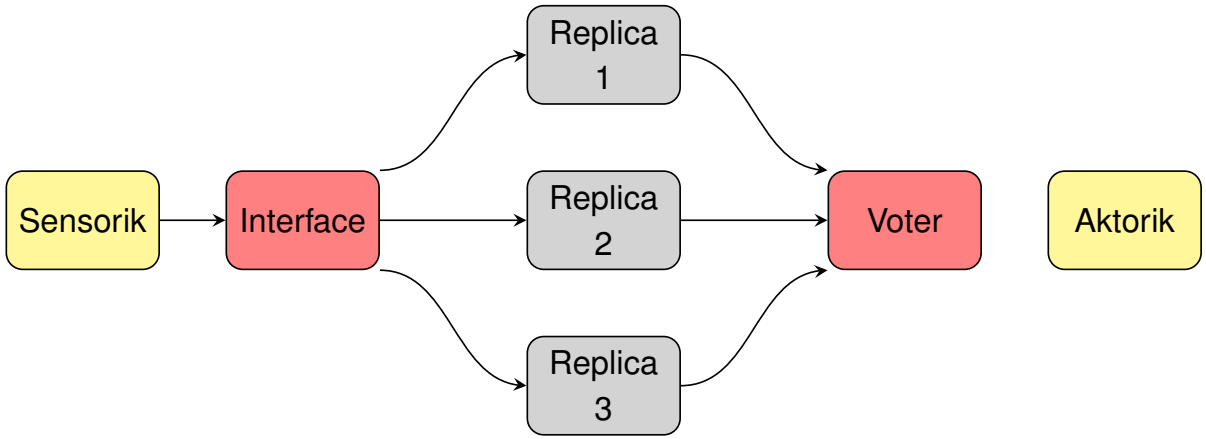
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)

Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



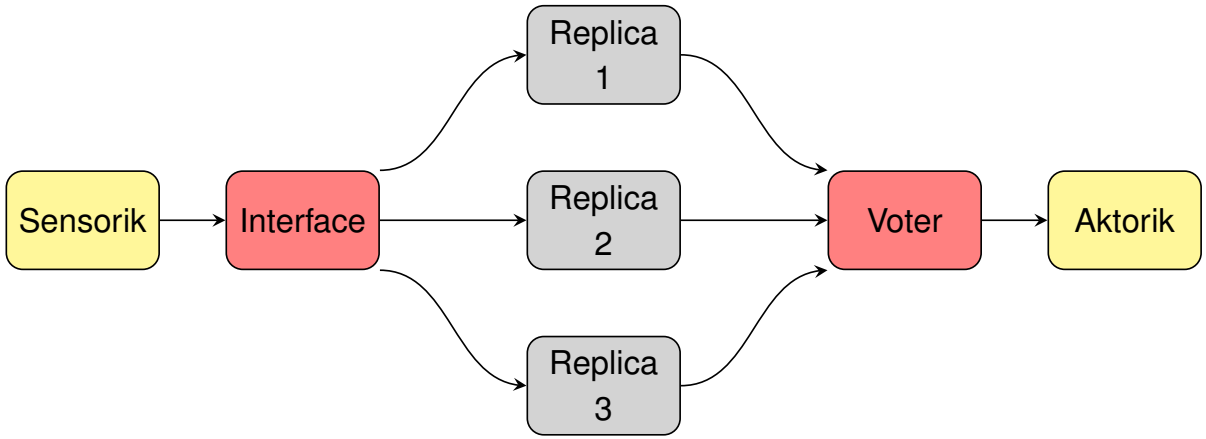
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate

Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



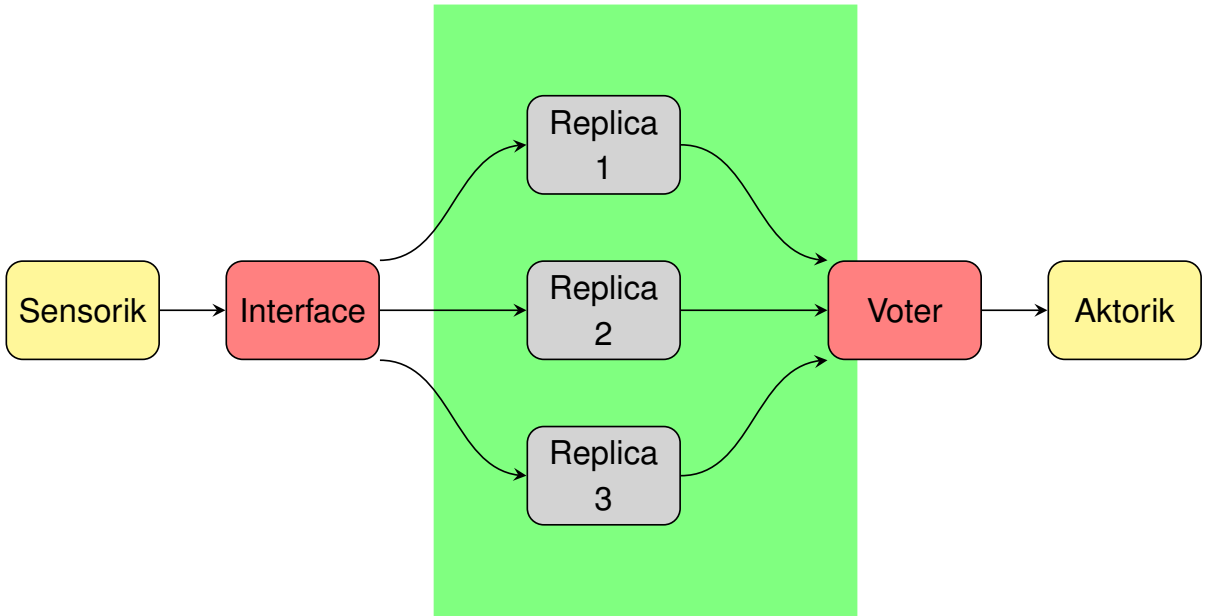
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate
- Mehrheitsentscheider (Voter) wählt Ergebnis

Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate
- Mehrheitsentscheider (Voter) wählt Ergebnis
- Ergebnis wird an Aktuator versendet

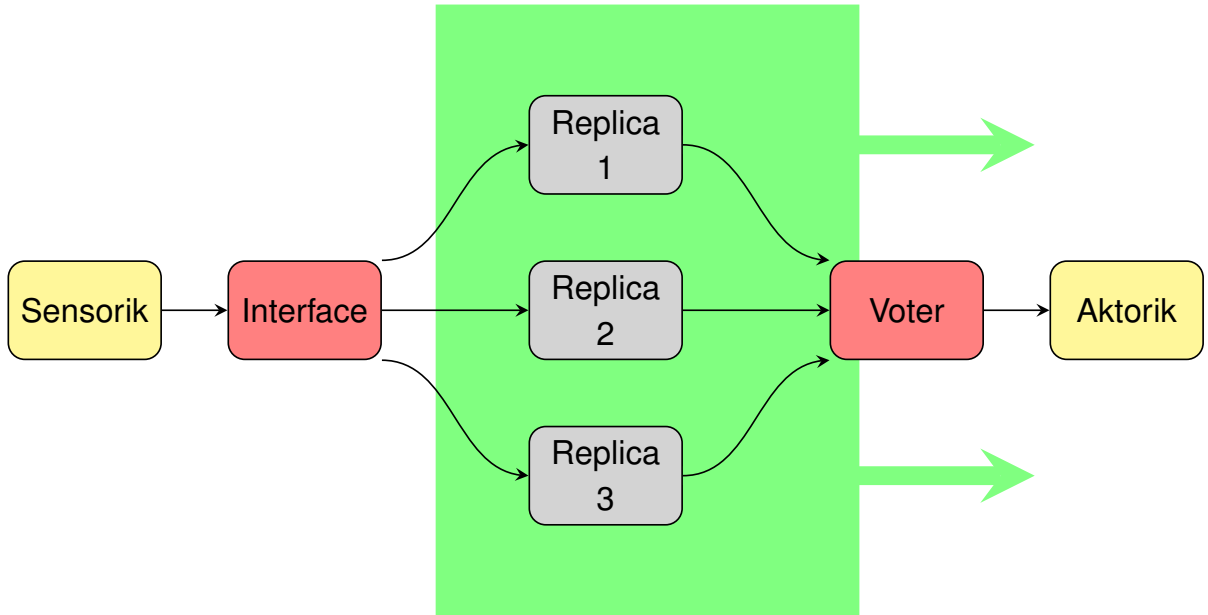
Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



Redundanzbereich

Ausschließlich Replikatausführung

Klassische “Triple Modular Redundancy” (TMR)



Redundanzbereich

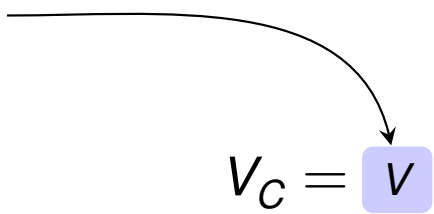
Ausschließlich Replikatausführung

- Erweiterung der Ausgangsseite mit Informationsredundanz
- Mehrheitsentscheid über codierte Prüfsumme

Erweiterte arithmetische Codierung

nach Forin 1989: “Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems” [1]

- Arithmetisch codierter Wert V_C
- Ausgangswert

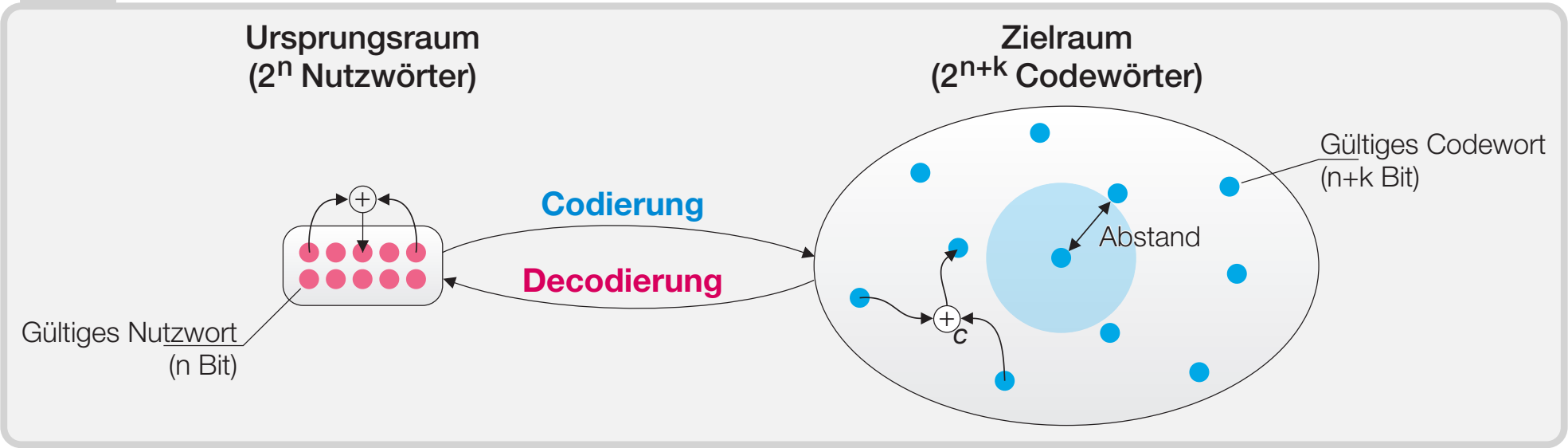


Erweiterte arithmetische Codierung

nach Forin 1989: “Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems” [1]

- Arithmetisch codierter Wert V_C
- Ausgangswert

$$V_C = V * A$$



Erweiterte arithmetische Codierung

nach Forin 1989: “Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems” [1]

- Arithmetisch codierter Wert V_C
- Ausgangswert
- Schlüssel

$$V_C = V * A$$

Bitfehlererkennung
(Restfehlerwahrscheinlichkeit
$P = 1/A$)

Erweiterte arithmetische Codierung

nach Forin 1989: “Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems” [1]

- Arithmetisch codierter Wert V_C
- Ausgangswert
- Schlüssel
- Variablenspezifische Signatur

$$V_C = V * A + B_V$$

Adressierungsfehlererkennung

Erweiterte arithmetische Codierung

nach Forin 1989: “Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems” [1]

- Arithmetisch codierter Wert V_C
- Ausgangswert
- Schlüssel
- Variablenspezifische Signatur
- Zeitstempel

$$V_C = V * A + B_V + D$$

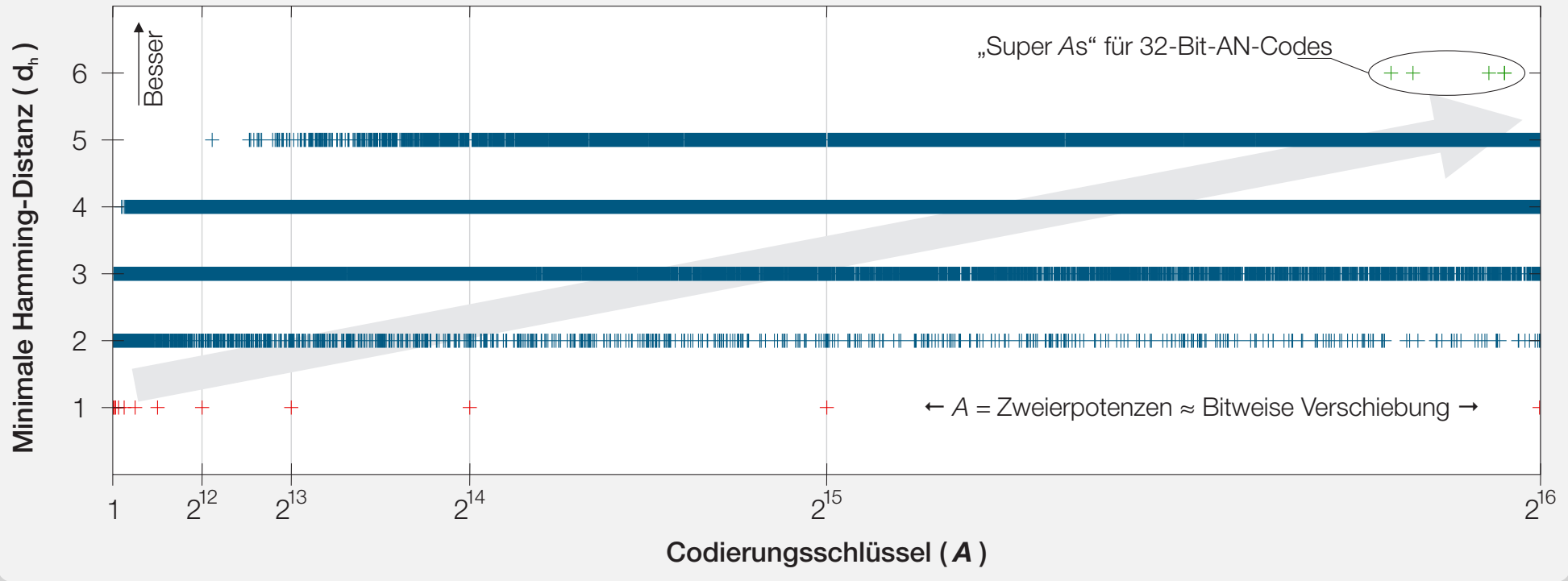
Erkennung veralteter Daten

Wertebereichseinschränkungen

- Schlüssel A sollte so groß wie möglich sein:
  - $\rightsquigarrow$ Möglichst geringe Restfehlerwahrscheinlichkeit ($P = 1/A$)
- Wertebereich des dynamischen Zeitstempels
  - $D = \{x | x \in \mathbb{N}_0 \wedge x \leq D_{max}\}$
  - Zeitstempel darf überlaufen: $D_{max} + 1 = 0$
- Für jede Signatur $B_* \in \mathbb{N}$ muss dann gelten
  - $B_* + D_{max} < A$
  - Die minimale Distanz zwischen jeweils zwei Signaturen im System muss größer D_{max} sein: $\forall i, j : |B_i - B_j| > D_{max}$
  - Sämtliche Distanzen zwischen jeweils zwei Signaturen müssen unterschiedlich sein: $\forall i : \forall j, k : |B_i - B_j| = |B_k - B_j| \Rightarrow i = k$

Wertebereichseinschränkungen

- Schlüssel A sollte so groß wie möglich sein:
  - ⇝ Möglichst geringe Restfehlerwahrscheinlichkeit ($P = 1/A$)
- Wertebereich des dynamischen Zeitstempels

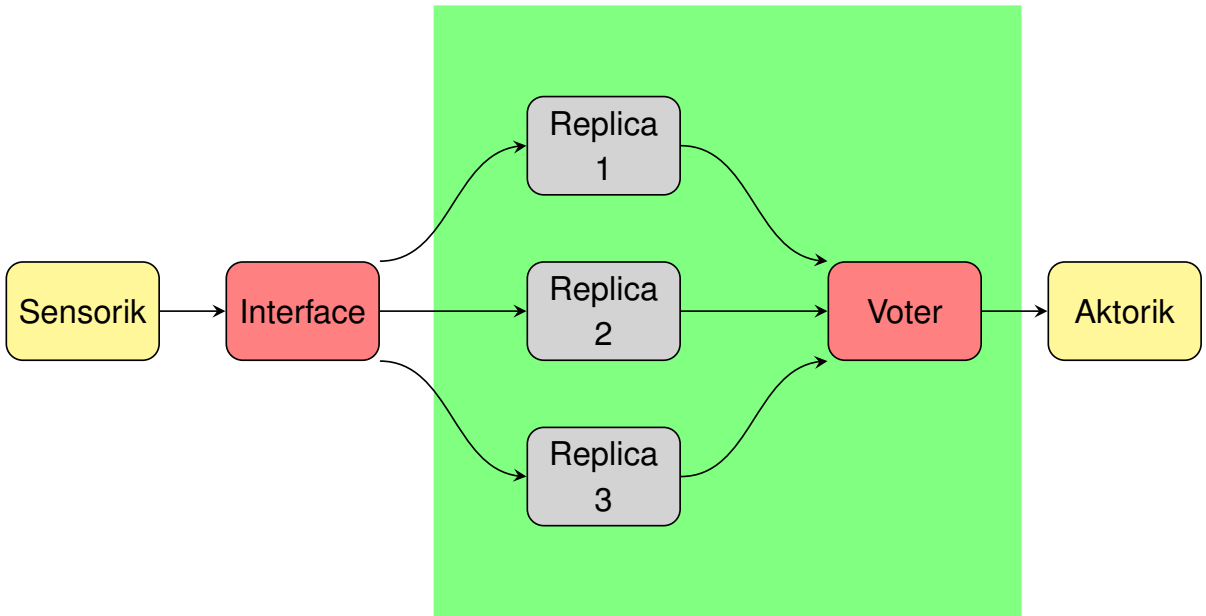


Quelle: Schiffel, U.: Hardware Error Detection Using AN-Codes, Diss., 2011

Wertebereichseinschränkungen

- Schlüssel A sollte so groß wie möglich sein:
  - $\rightsquigarrow$ Möglichst geringe Restfehlerwahrscheinlichkeit ($P = 1/A$)
- Wertebereich des dynamischen Zeitstempels
  - $D = \{x | x \in \mathbb{N}_0 \wedge x \leq D_{max}\}$
  - Zeitstempel darf überlaufen: $D_{max} + 1 = 0$
- Für jede Signatur $B_* \in \mathbb{N}$ muss dann gelten
  - $B_* + D_{max} < A$
  - Die minimale Distanz zwischen jeweils zwei Signaturen im System muss größer D_{max} sein: $\forall i, j : |B_i - B_j| > D_{max}$
  - Sämtliche Distanzen zwischen jeweils zwei Signaturen müssen unterschiedlich sein: $\forall i : \forall j, k : |B_i - B_j| = |B_k - B_j| \Rightarrow i = k$

Erweiterung I – codierte Ausgangswerte



- Replikate liefern arithmetisch codierte Ergebnisse
- Mehrheitsentscheid auf codierten Prüfsummen
- Übertragung codierter Ergebnisse

EAN Vergleichsoperator

Vereinfachung für diese Übungsaufgabe

- Kein Zeitstempel

- Voting basiert auf codierter Vergleichsoperation:

$\rightsquigarrow X_C = Y_C \Rightarrow X * A + B_X = Y * A + B_Y$

- Im fehlerfreien Fall gilt:

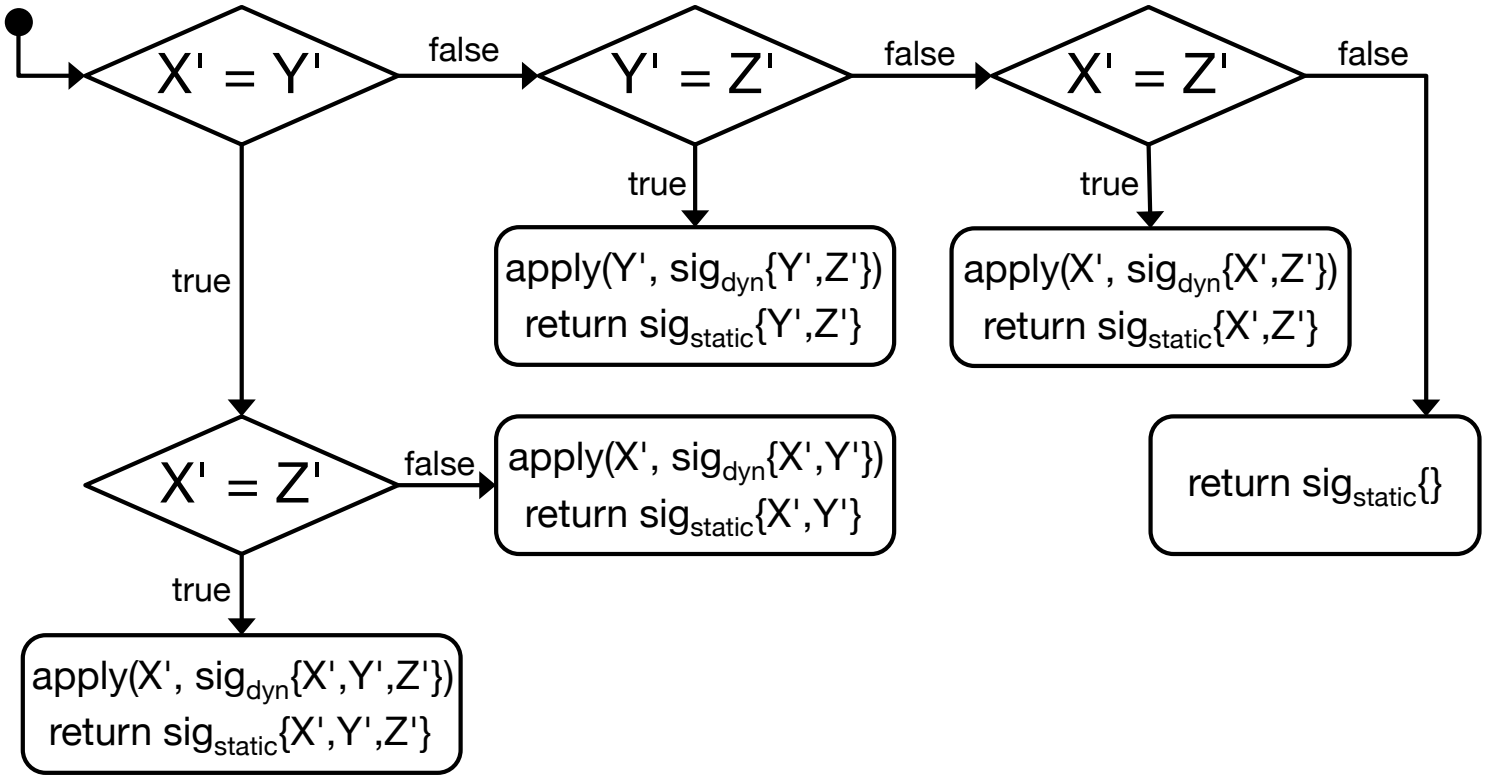
$X = Y$, $A = A$ aber $B_X \neq B_Y$!

- *Rohwerte* sind identisch
- Schlüssel ist per Definition identisch
- Signaturen sind unterschiedlich (aber konstant!)

Bestimmung der Gleichheit durch Differenzbildung:

$\rightsquigarrow X_C - Y_C = B_X - B_Y = const.$

Codierter Mehrheitsentscheid



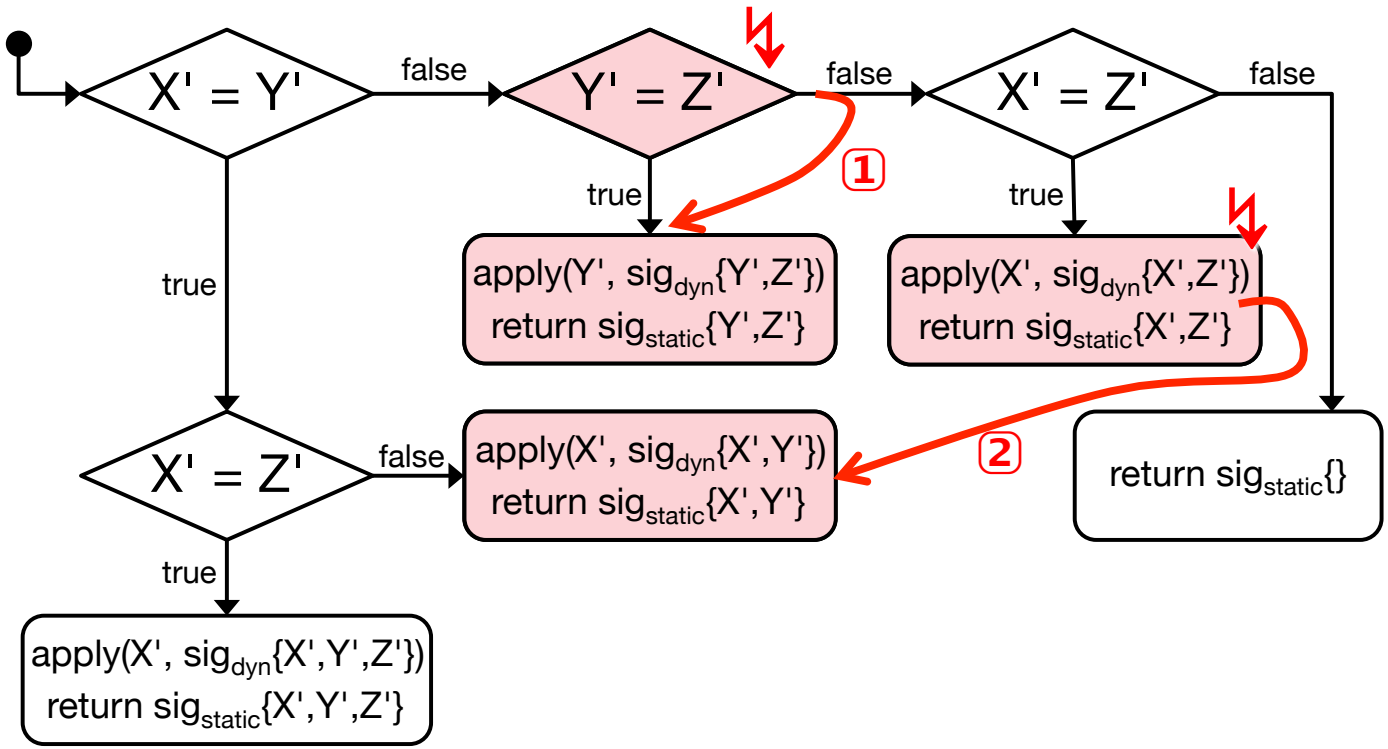
- Bestimmung von dynamischer und statischer Signatur:
  - → $sig_{dyn}(X', Y') : X' = Y' \Rightarrow X' - Y'$
  - → $sig_{static}(X', Y') : X' = Y' \Rightarrow B_X - B_Y$
- Für die Signaturen muss gelten: $B_X > B_Y > B_Z$

Codierter Mehrheitsentscheid (Forts.)

1. Vergleichsoperation wird durchgeführt (z. B. $X' = Y' \wedge X' = Z'$)
   - Berechnung von sig_{dyn}
   - Vergleich mit sig_{static}
2. Verzweigungsentscheidung wird nachberechnet:
   - Wiederholte (redundante) Berechnung von sig_{dyn}
   - Erneuter Vergleich: $sig_{dyn} = sig_{static}$
   - Addiere sig_{dyn} (*apply*) zum gewählten Ergebnis
3. Konstante Signatur des durchlaufenen Zweiges identifiziert Gewinner (Rückgabewert: sig_{static})
   - Aktor wählt entsprechendes Replikatergebnis
   - Führt inverse Operation zu *apply* durch

Im Voter wurde die *dynamisch berechnete Signatur der Verzweigungsentscheidung* hinzu addiert. Im Aktor wird mit der entsprechenden *konstanten Signatur zurückgerechnet*.

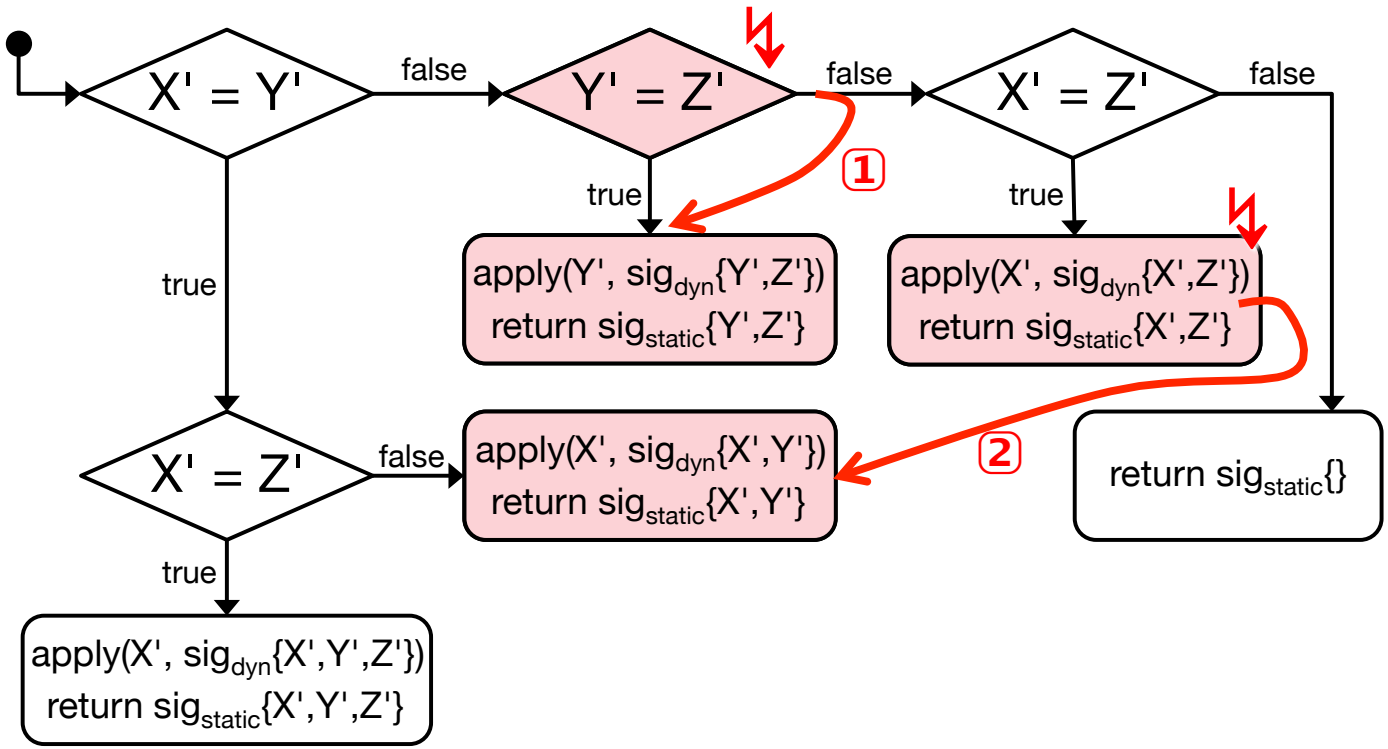
Codierter Mehrheitsentscheid - Fehlerfall



1. Falsche Verzweigungsentscheidung: $(Y' \neq Z')$

- Y' wird als korrekt angenommen, sig_{dyn} wird berechnet
- allerdings ist sig_{dyn} tatsächlich $\neq sig_{static}$
- Fehler wird vor dem *apply* erkannt

Codierter Mehrheitsentscheid - Fehlerfall



2. Falscher (plötzlicher) Sprung

- X' wird als korrekt erkannt, sig_{dyn} wird erneut berechnet
- Ein fehlerhafter Sprung zu einem anderen Block führt zu einem inkonsistenten Rückgabewert $sig_{static}\{X', Z'\}$
- $sig_{dyn}\{X', Y'\} \neq sig_{static}\{X', Z'\}$ wird beim Dekodieren erkannt

Ausgangslage

- Wähle $A = 601$
- Initiale Ergebniskodierung in den Replikaten:

	X	Y	Z
Wert	7	5	7
B	37	23	5

Ausgangslage

- Wähle $A = 601$
- Initiale Ergebniskodierung in den Replikaten:

	X	Y	Z
Wert	7	5	7
B	37	23	5
Kodiert	$X' = A * 7 + 37$ $= 4244$	$Y' = A * 5 + 23$ $= 3028$	$Z' = A * 7 + 5$ $= 4212$

Ausgangslage

- Wähle $A = 601$
- Initiale Ergebniskodierung in den Replikaten:

	X	Y	Z
Wert	7	5	7
B	37	23	5
Kodiert	$X' = A * 7 + 37 = 4244$	$Y' = A * 5 + 23 = 3028$	$Z' = A * 7 + 5 = 4212$

- Berechnung der statischen Signaturen **vorab, statisch**:

$$sig_{static}\{X', Y', Z'\} = (B_X - B_Y) + (B_X - B_Z) = 46$$
$$sig_{static}\{X', Y'\} = (B_X - B_Y) = 14$$
$$sig_{static}\{Y', Z'\} = (B_Y - B_Z) = 18$$
$$sig_{static}\{X', Z'\} = (B_X - B_Z) = 32$$

Regulärer Durchlauf

- Das eigentliche Voting geschieht dann zur Laufzeit:

1. $X' = Y'$?

$$X' - Y' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{X', Y'\right\} \Leftrightarrow 4244 - 3028 = 1216 \stackrel{?}{=} 14 \Leftrightarrow \textit{false}$$

2. $Y' = Z'$?

$$Y' - Z' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{Y', Z'\right\} \Leftrightarrow 3028 - 4212 = -1184 \stackrel{?}{=} 18 \Leftrightarrow \textit{false}$$

3. $X' = Z'$?

$$X' - Z' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{X', Z'\right\} \Leftrightarrow 4244 - 4212 = 32 \stackrel{?}{=} 32 \Leftrightarrow \textit{true}$$

4. Berechnung der dynamischen Signaturen zur Laufzeit:

$$sig_{dyn}\left\{X', Z'\right\} = (X' - Z') = (4244 - 4212) = 32$$

Regulärer Durchlauf (II)

5. $sig_{dyn}\left\{X', Z'\right\} \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{X, Z\right\} \Leftrightarrow 32 \stackrel{?}{=} 32 \Leftrightarrow \mathit{true}$
6. $X' = apply\left(X', sig_{dyn}\left\{X', Z'\right\}\right) = 4276$
7. $B_E \leftarrow sig_{static}\left\{X', Z'\right\} = 32$
8. $return\left(32\right)$
9. Nachschlagen der zugrundeliegenden Variable mittels $B_{dyn} = 32$ (erste Variable der Konsensmenge), basierend auf den vorberechneten statischen Werten:

$$\left(result_{variable}, result_{extrasignature}\right) \leftarrow \left(X', B_X\right)$$

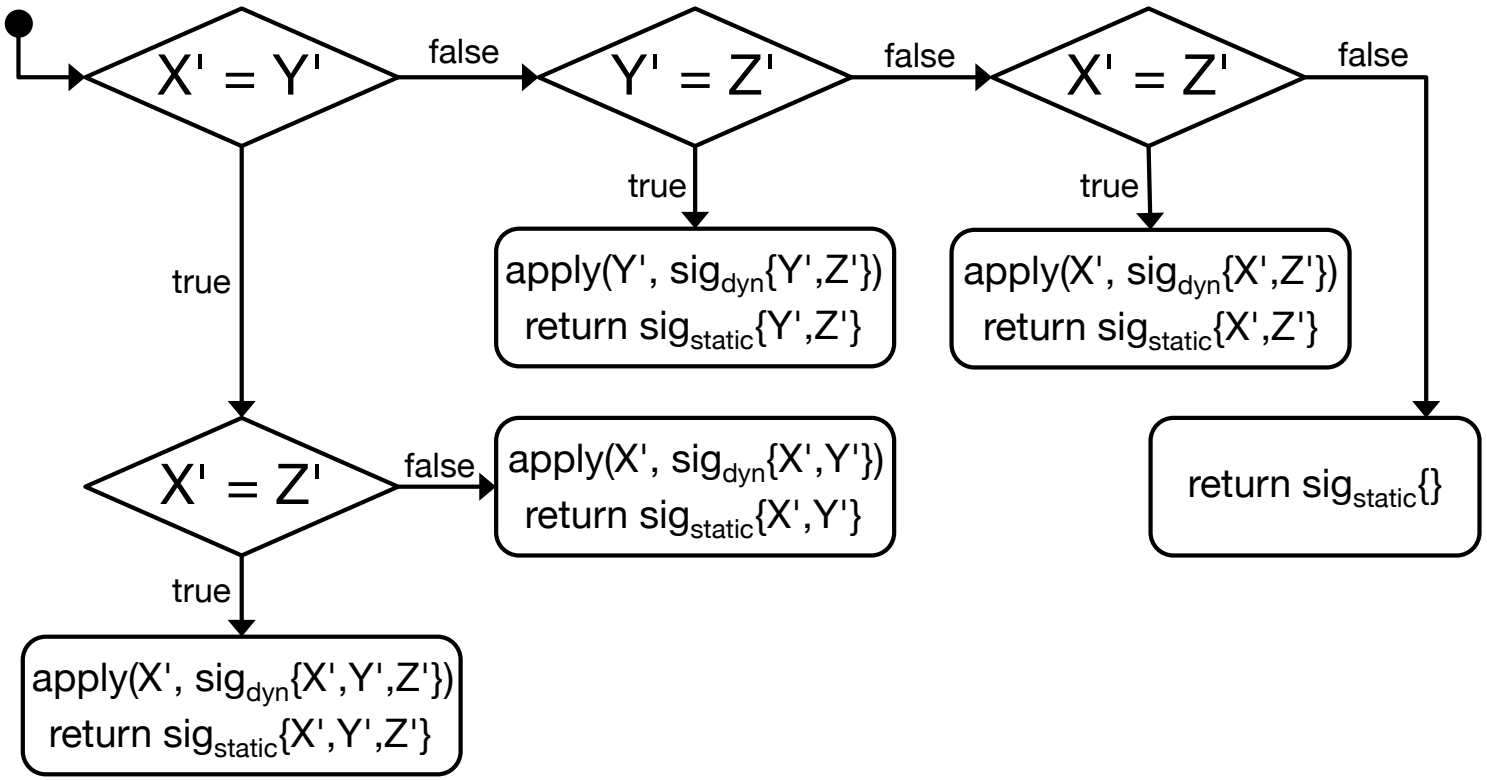
10. $inv\_apply\left(result_{variable}, B_{dyn}\right) = inv\_apply\left(4276, 32\right) = 4276 - 32 = 4244$

Regulärer Durchlauf (III)

11. Signaturverifikation:

$$check(4244, A, B_X): \frac{4244 - B_X}{A} = 7 \text{ Rest: } 0$$

12. Ergebnis erfolgreich dekodiert: 7



Es hat somit eine erfolgreiche Einigung auf die Konsensmenge $\{X', Z'\}$ stattgefunden.

Ausgangslage (unverändert)

- Wähle $A = 601$
- Initiale Ergebniskodierung in den Replikaten:

	X	Y	Z
Wert	7	5	7
B	37	23	5
Kodiert	$X' = A * 7 + 37$ $= 4244$	$Y' = A * 5 + 23$ $= 3028$	$Z' = A * 7 + 5$ $= 4212$

- Berechnung der statischen Signaturen **vorab, statisch**:

$$sig_{static}\left\{X', Y', Z'\right\} = (B_X - B_Y) + (B_X - B_Z) = 46$$
$$sig_{static}\left\{X', Y'\right\} = (B_X - B_Y) = 14$$
$$sig_{static}\left\{Y', Z'\right\} = (B_Y - B_Z) = 18$$
$$sig_{static}\left\{X', Z'\right\} = (B_X - B_Z) = 32$$

Fehlerszenario ①

1. $X' = Y'$?

$$X' - Y' \stackrel{?}{=} sig_{static}\{X', Y'\} \Leftrightarrow 4244 - 3028 = 1216 \stackrel{?}{=} 14 \Leftrightarrow \textit{false}$$

2. $Y' = Z'$?

$$Y' - Z' \stackrel{?}{=} sig_{static}\{Y', Z'\} \Leftrightarrow 3028 - 4212 = -1184 \stackrel{?}{=} 18 \Leftrightarrow \textit{false}$$

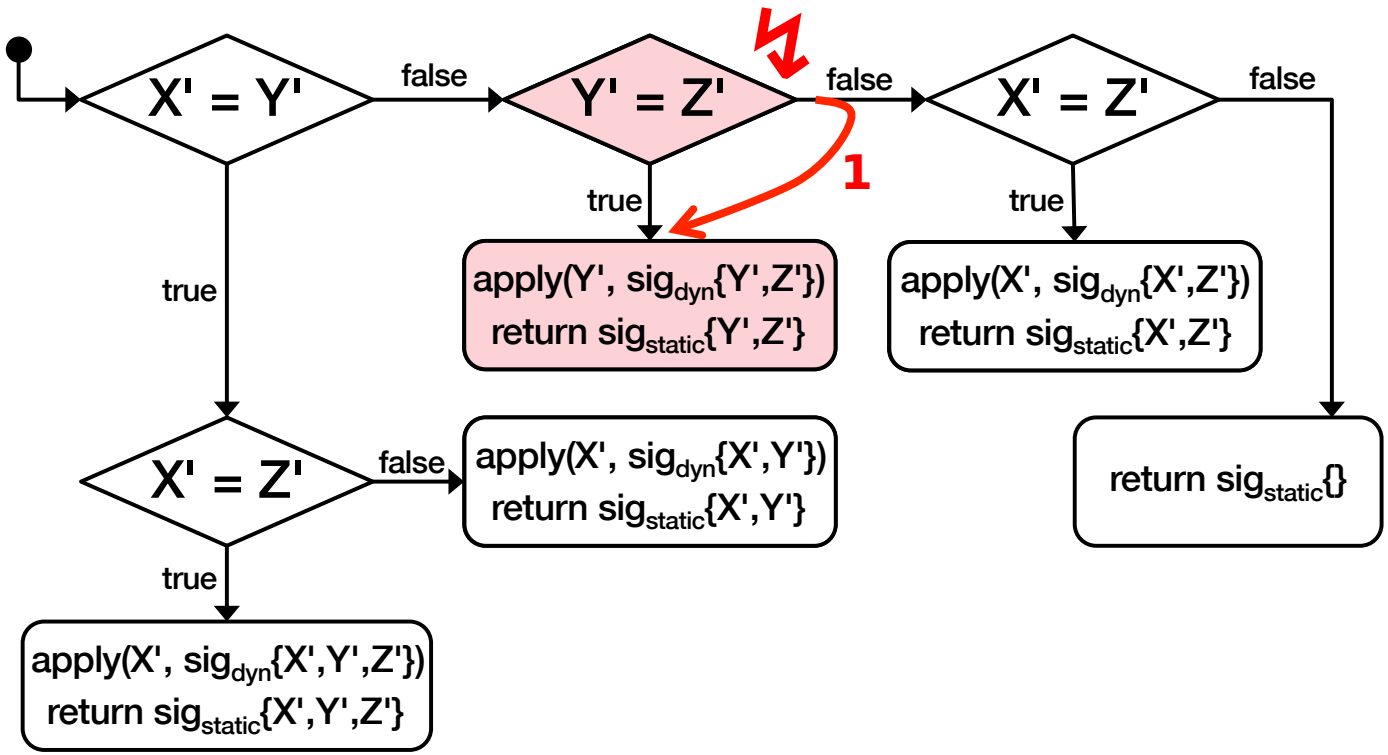
3. Hier tritt nun der Operatorfehler ein, die falsche Verzweigung ① wird aus gewählt
4. Berechnung der dynamischen Signaturen zur Laufzeit:

$$sig_{dyn}\{Y', Z'\} = (Y' - Z') = (3028 - 4212) = -1184$$

5. $sig_{dyn}\{Y', Z'\} \stackrel{?}{=} sig_{static}\{Y, Z\} \Leftrightarrow -1184 \stackrel{?}{=} 18 \Leftrightarrow \textit{false}$

Fehlerszenario ① (II)

6. Fehler erfolgreich detektiert: Vergleich zwischen sig_{dyn} und sig_{static} für Konsensmenge $\{Y', Z'\}$ fehlgeschlagen



Ausgangslage (unverändert)

- Wähle $A = 601$
- Initiale Ergebniskodierung in den Replikaten:

	X	Y	Z
Wert	7	5	7
B	37	23	5
Kodiert	$X' = A * 7 + 37$ $= 4244$	$Y' = A * 5 + 23$ $= 3028$	$Z' = A * 7 + 5$ $= 4212$

- Berechnung der statischen Signaturen **vorab, statisch**:

$$sig_{static}\{X', Y', Z'\} = (B_X - B_Y) + (B_X - B_Z) = 46$$
$$sig_{static}\{X', Y'\} = (B_X - B_Y) = 14$$
$$sig_{static}\{Y', Z'\} = (B_Y - B_Z) = 18$$
$$sig_{static}\{X', Z'\} = (B_X - B_Z) = 32$$

Fehlerszenario ②

1. $X' = Y'$?

$$X' - Y' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{X', Y'\right\} \Leftrightarrow 4244 - 3028 = 1216 \stackrel{?}{=} 14 \Leftrightarrow \textit{false}$$

2. $Y' = Z'$?

$$Y' - Z' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{Y', Z'\right\} \Leftrightarrow 3028 - 4212 = -1184 \stackrel{?}{=} 18 \Leftrightarrow \textit{false}$$

3. $X' = Z'$?

$$X' - Z' \stackrel{?}{=} sig_{static}\left\{X', Z'\right\} \Leftrightarrow 4244 - 4212 = 32 \stackrel{?}{=} 32 \Leftrightarrow \textit{true}$$

4. Berechnung der dynamischen Signaturen zur Laufzeit:

$$sig_{dyn}\left\{X', Z'\right\} = (X' - Z') = (4244 - 4212) = 32$$

Fehlerszenario ②

5. $sig_{dyn}\{X', Z'\} \stackrel{?}{=} sig_{static}\{X, Z\} \Leftrightarrow 32 \stackrel{?}{=} 32 \Leftrightarrow \textit{true}$
6. $X' = apply\left(X', sig_{dyn}\{X', Z'\}\right) = 4276$
7. Hier tritt nun der Kontrollflussfehler ② ein
8. $B_E \leftarrow sig_{static}\{X', Y'\} = 14$
9. $return\,(14)$
10. Nachschlagen der zugrundeliegenden Variable mittels $B_{dyn} = 14$ (erste Variable der Konsensmenge), basierend auf den vorberechneten statischen Werten:

$$\left(result_{variable}, result_{extrasignature}\right) \leftarrow (X', B_X)$$

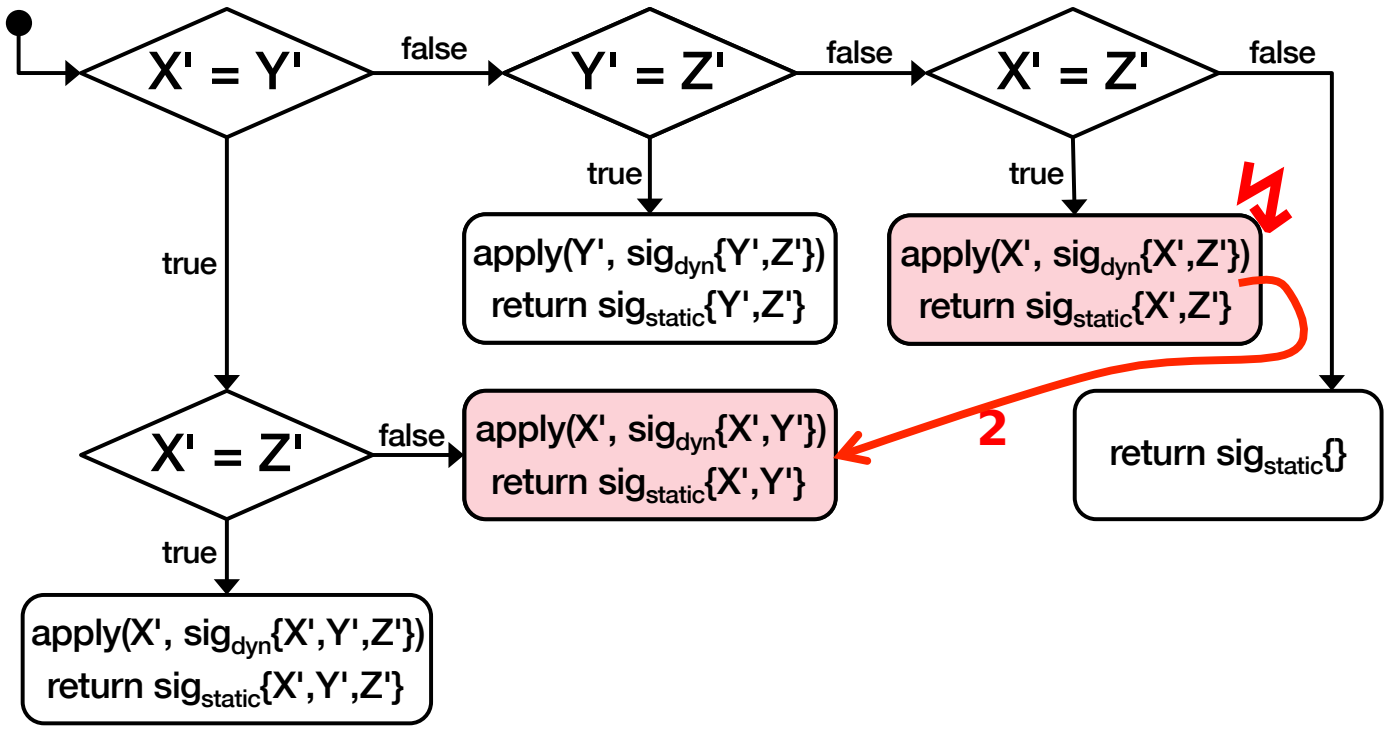
11. $inv\_apply\left(result_{variable}, B_{dyn}\right) = inv\_apply\,(4276, 14) = 4276 - 14 = 4262$

Fehlerszenario ② (II)

12. Signaturverifikation:

$$check(4262, A, B_X): \frac{4262 - B_X}{A} = 7 \text{ Rest: } 18$$

13. Fehler erfolgreich detektiert: Dekodieren schlägt fehl



Aufgabenstellung

Aufgabe

- Absichern des Voters per EAN mittels CoRed-Ansatz
- Berechnungen mit codierten Werten
  - Berücksichtigung der (statischen) Signaturen

  ⇝ Eigene Operationen mit konstanten Signaturwerten notwendig

  ⇝ bspw. eigenes `equals` anstatt ==

- Jedes Replikat hat genau einen Ausgabewert (integer ↦ enc_t): eine codierte Prüfsumme des Ergebnisses

  ⇝ Festlegung für jeden der drei Ausgabewerte (X', Y', Z') jeweils *unterschiedliche* aber *konstante* Signatur (SIG_X, SIG_Y, SIG_Z)
- Nutzung des nächstgrößeren Datentyps X für den ursprünglichen Wert X'

  ⇝ Wahl einer Zahl A mit möglichst großem Hamming-Abstand unter *Vermeidung* möglicher *Überläufe bei der Codierung*

  ⇝ Handhabbarkeit: **nicht** Super-As

Literatur I

Forin.
Vital coded microprocessor principles and application for various transit systems.
IFA-GCCT, pages 79–84, 1989.