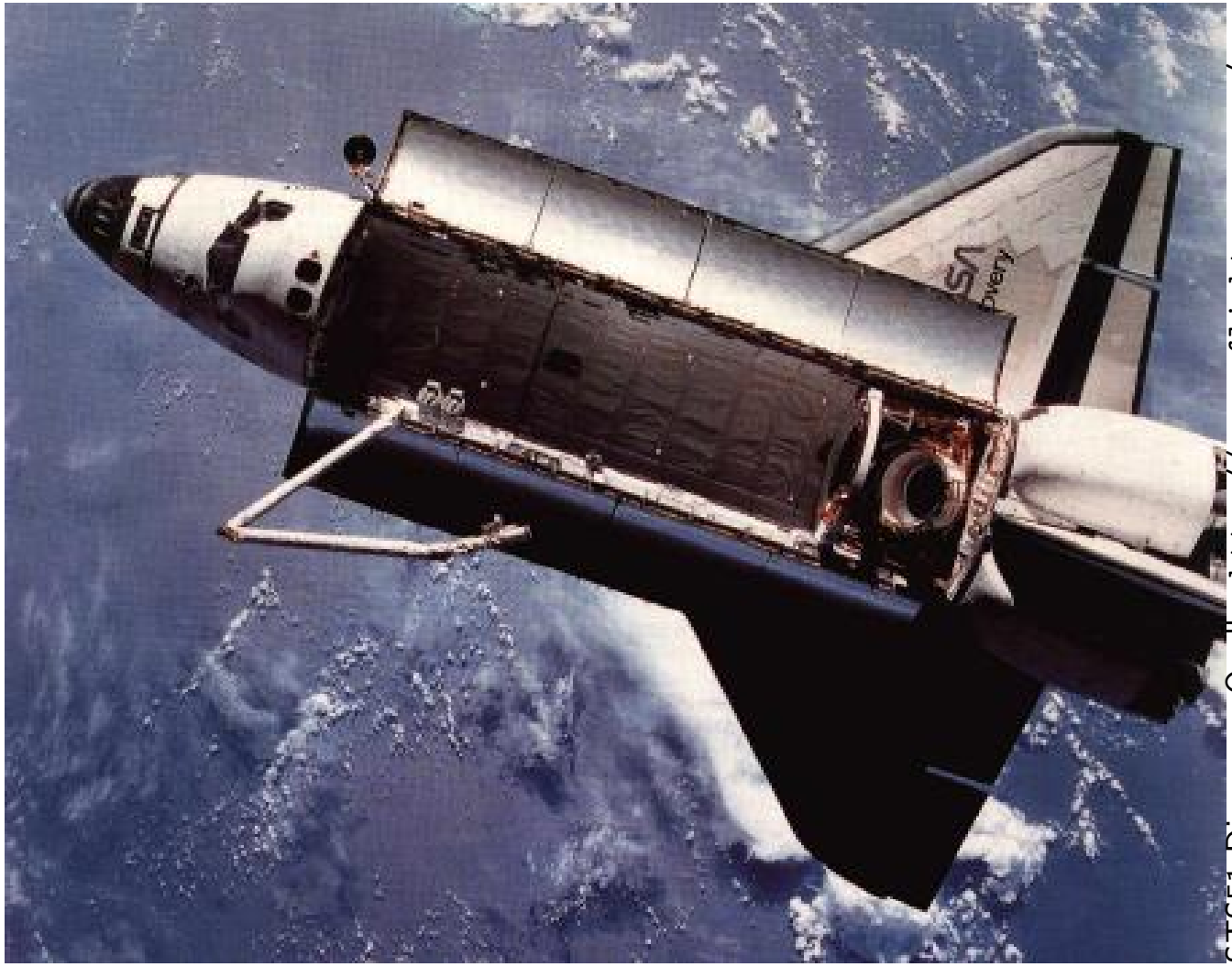
Grundlagen fehlertoleranter Systeme

Felix Gärtner

TU Darmstadt

felix@informatik.tu-darmstadt.de

Beispiel: Space Shuttle



STS51 Discovery, Quelle: http://spaceflight.nasa.gov/

Weitere Methoden

- *triple modular redundancy* (TMR)
- *checkpointing/recovery*
- *error detecting/error correcting codes*
- *recovery blocks*
- Replikation und *atomic broadcast*
- . . .

Ausgangspunkt meiner Dissertation

Was sind die grundlegenden Mechanismen, die in Fehlertoleranzverfahren eine Rolle spielen?

Ausgangspunkt meiner Dissertation

Was sind die grundlegenden Mechanismen, die in Fehlertoleranzverfahren eine Rolle spielen?

Erste Antwort:

Redundanz!

Ausgangspunkt meiner Dissertation

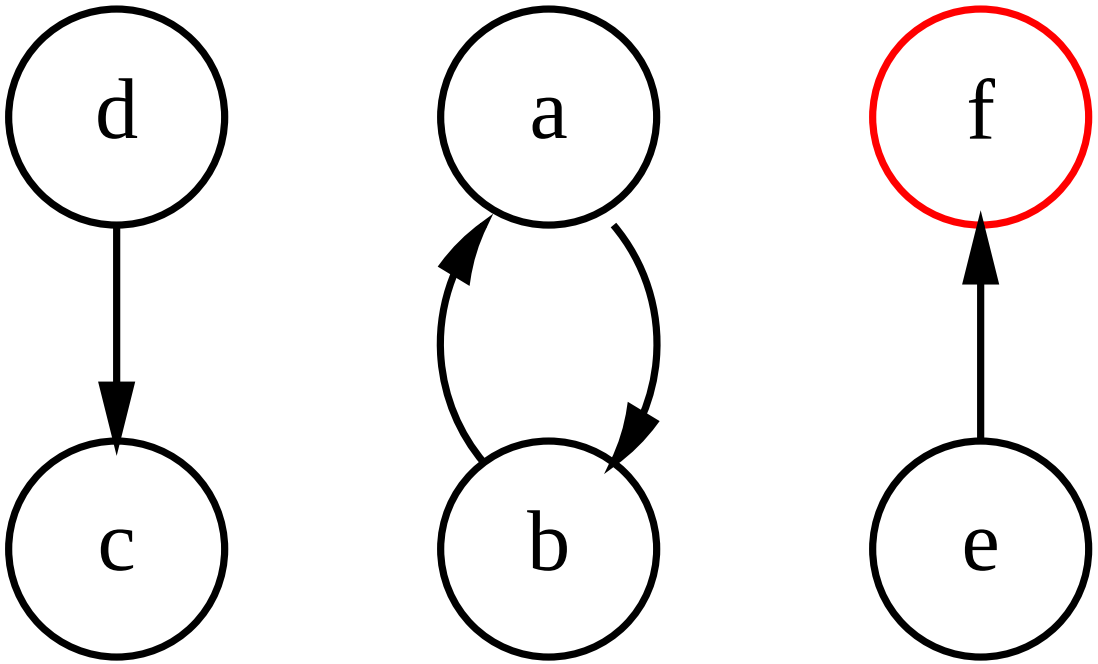
Was sind die grundlegenden Mechanismen, die in Fehlertoleranzverfahren eine Rolle spielen?

Erste Antwort:

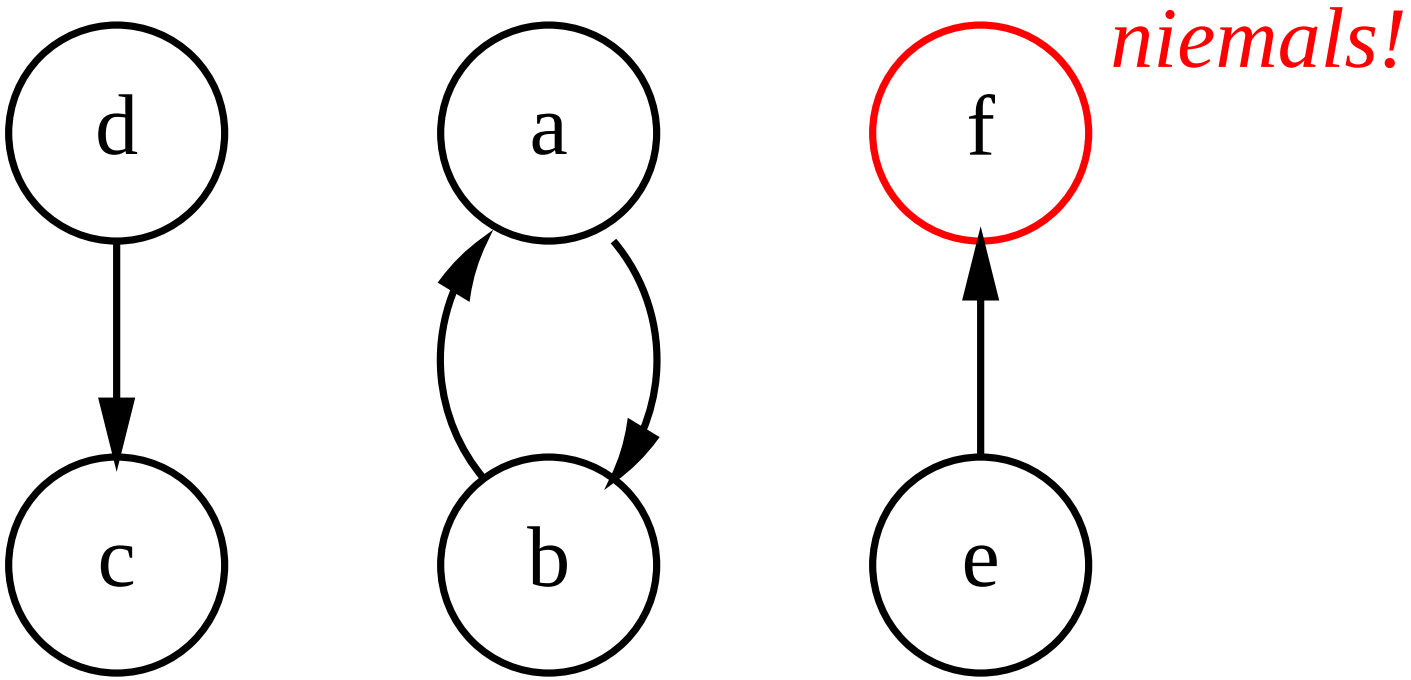
Redundanz!

Aber wie und warum?

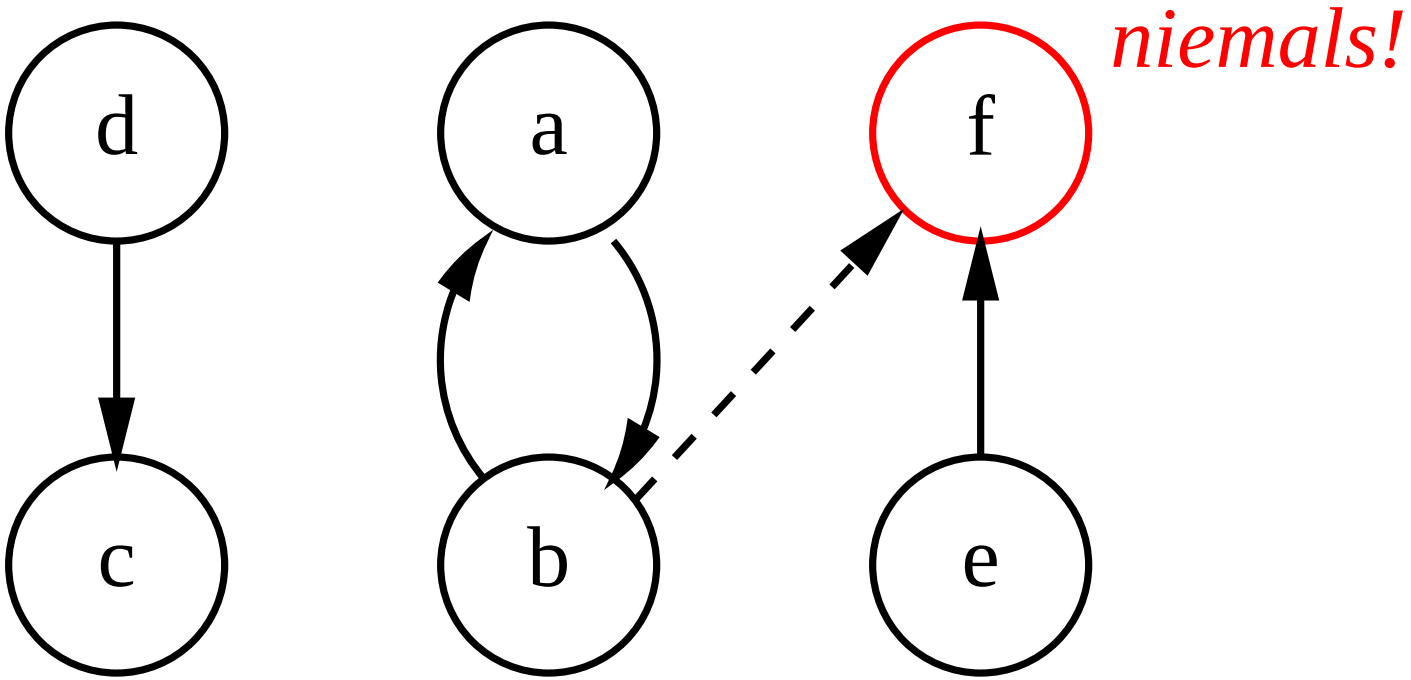
Modellierung als Automaten



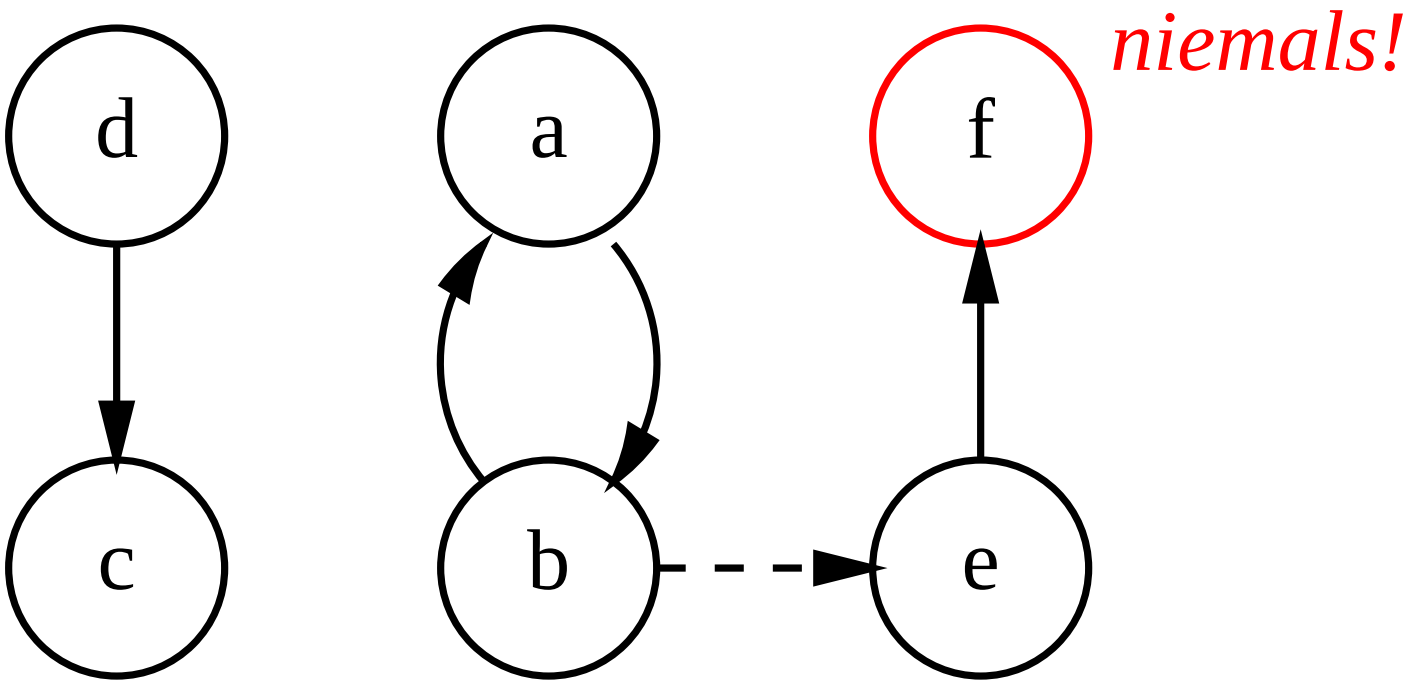
Modellierung als Automaten



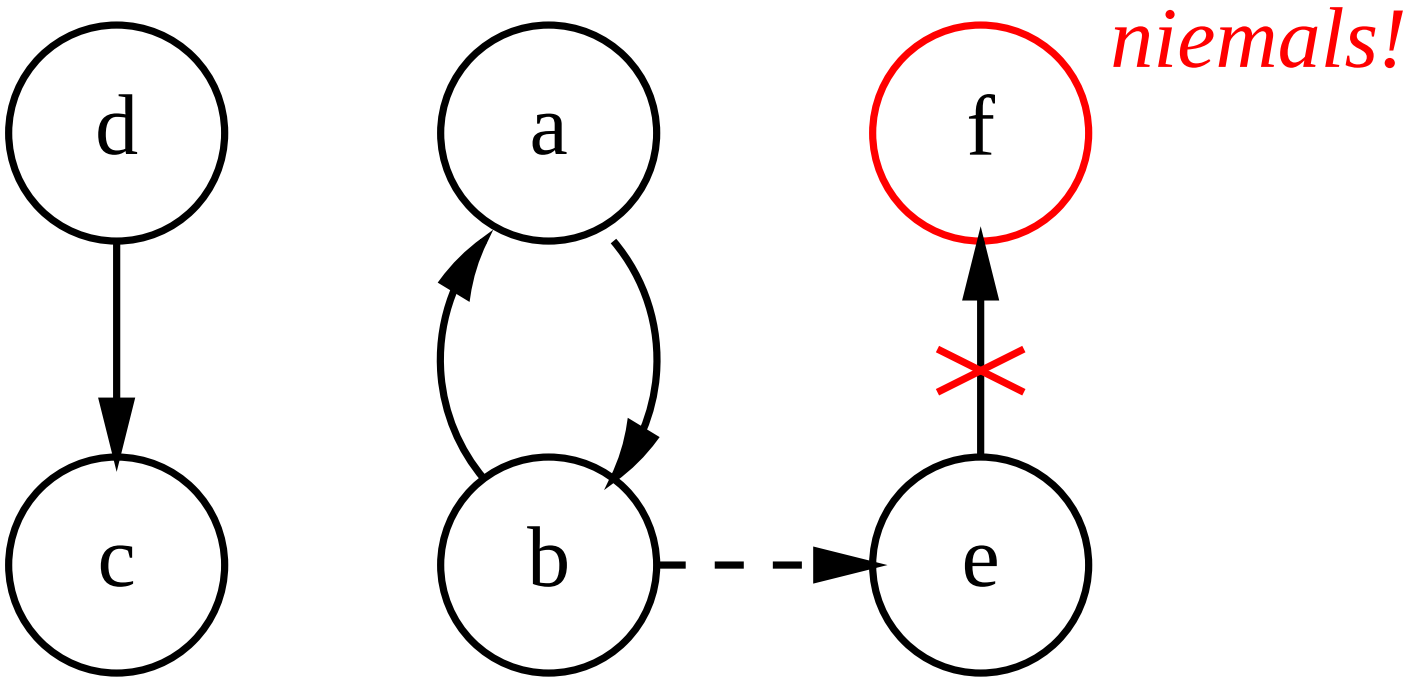
Modellierung als Automaten



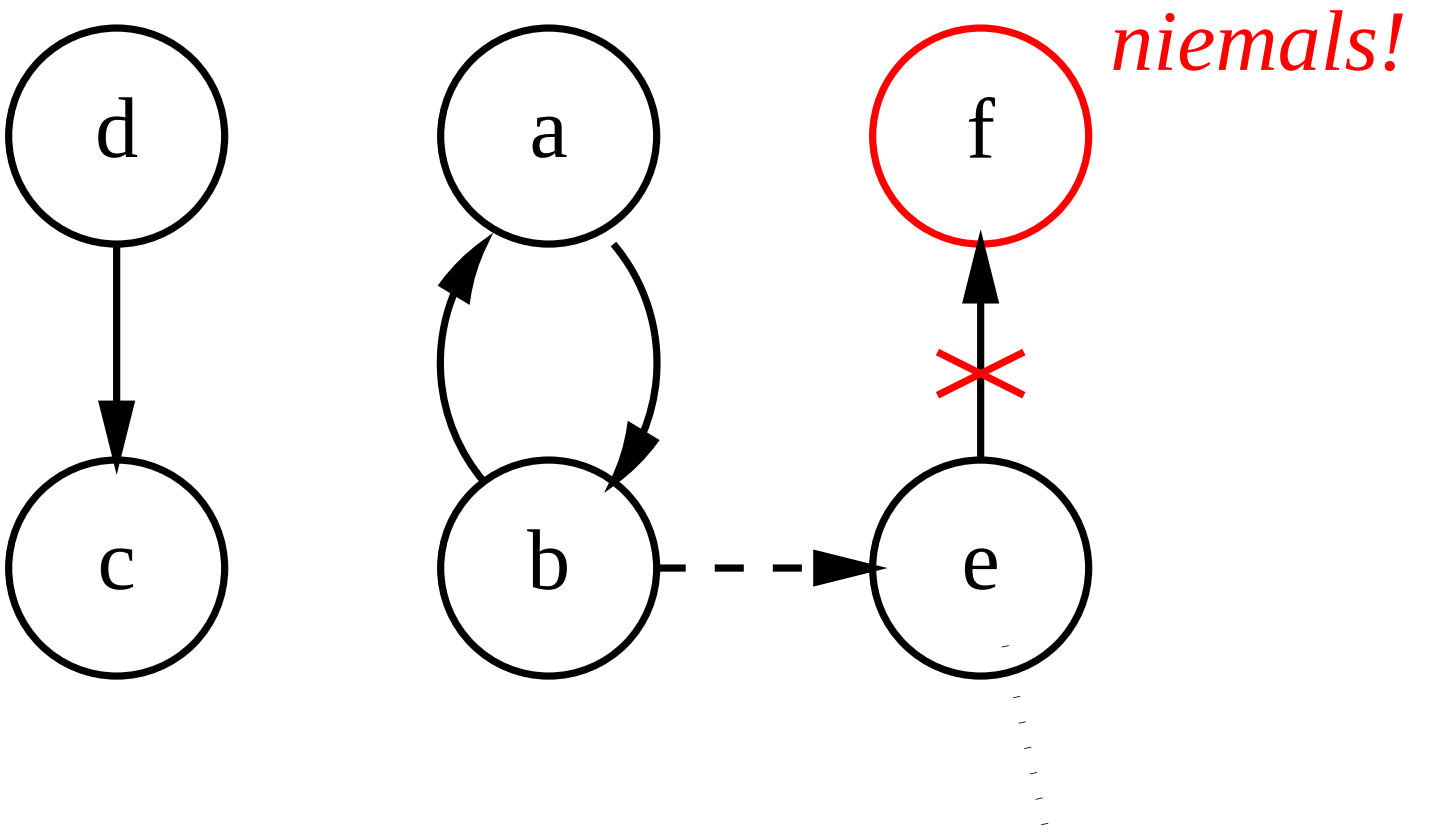
Modellierung als Automaten



Modellierung als Automaten



Modellierung als Automaten



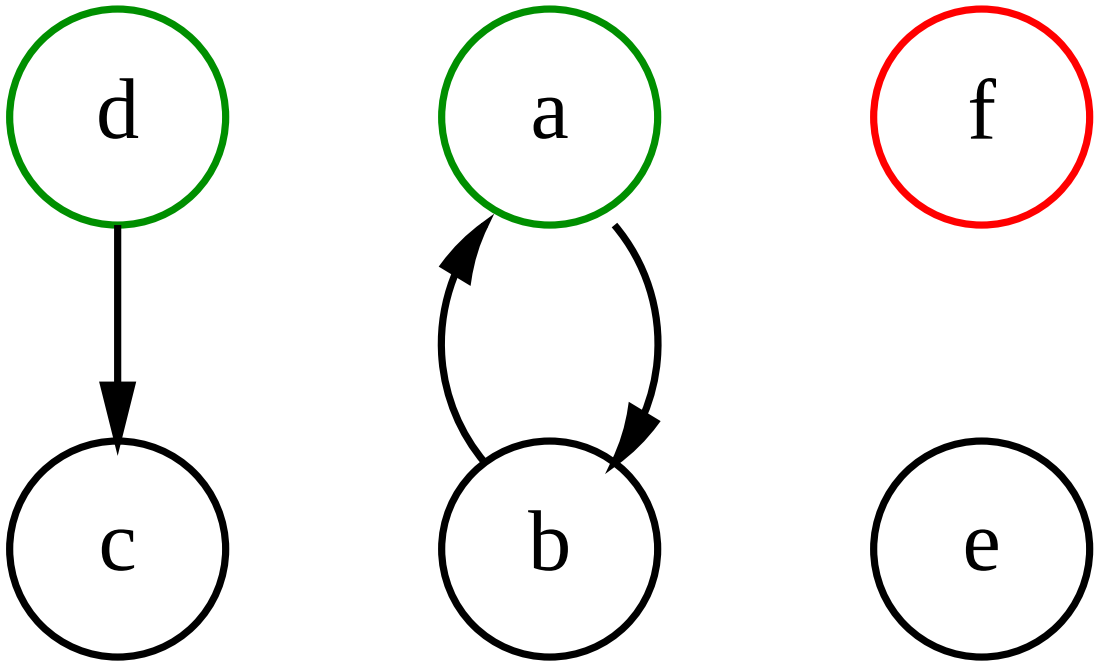
Speicherredundanz

Speicherredundanz

redundante Zustände = Speicherredundanz
Zustände, die nicht erreicht werden,
wenn keine Fehler auftreten.

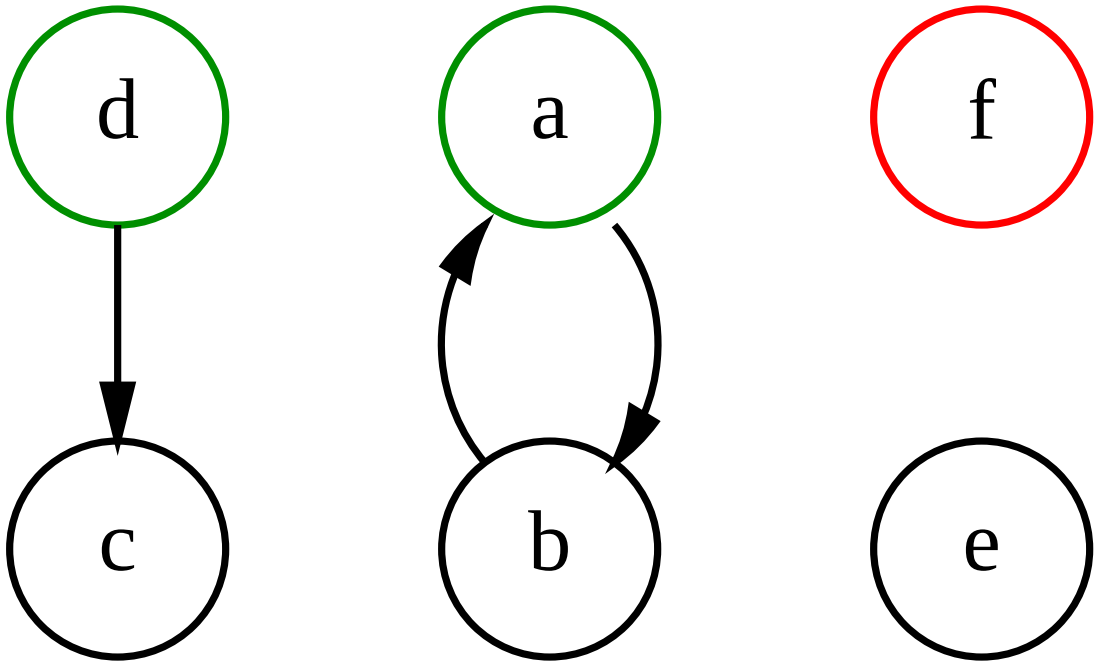
- Bekannt aus der Kodierungstheorie [3].
- "Puffer" zur Fehlererkennung.

Problem: Lebendigkeit



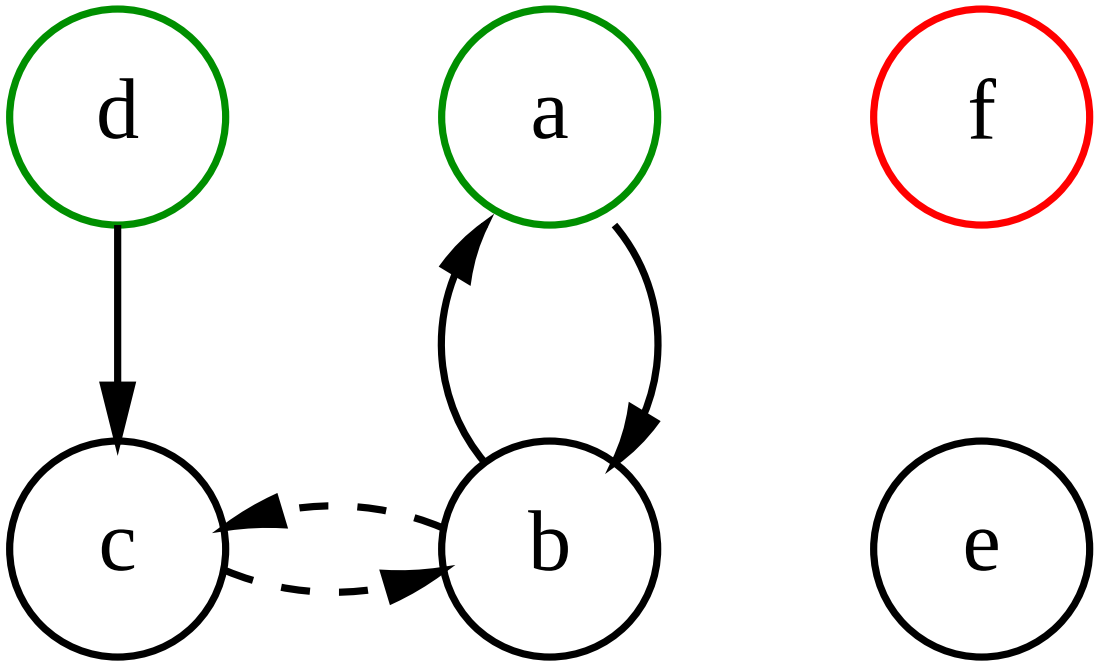
Problem: Lebendigkeit

immer wieder!



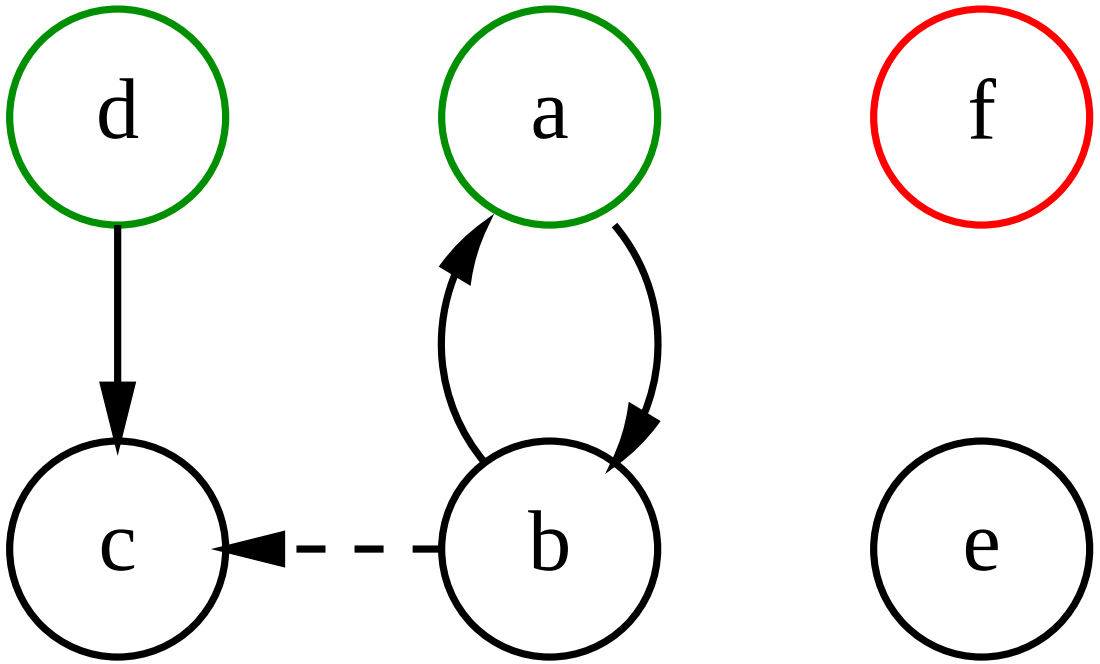
Problem: Lebendigkeit

immer wieder!



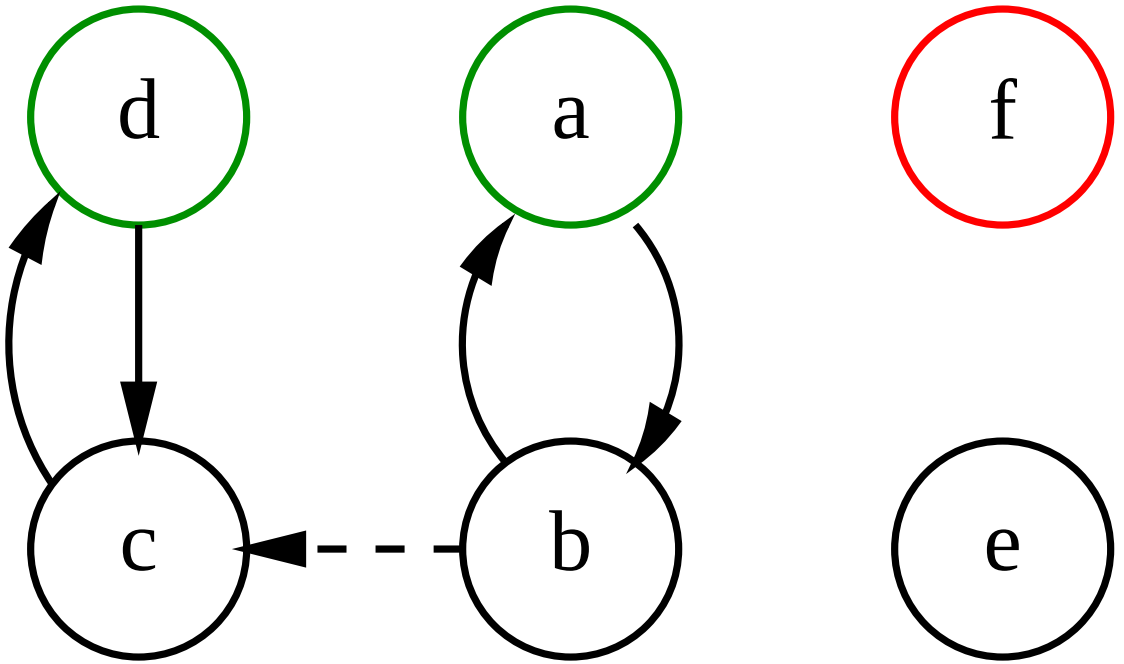
Problem: Lebendigkeit

immer wieder!



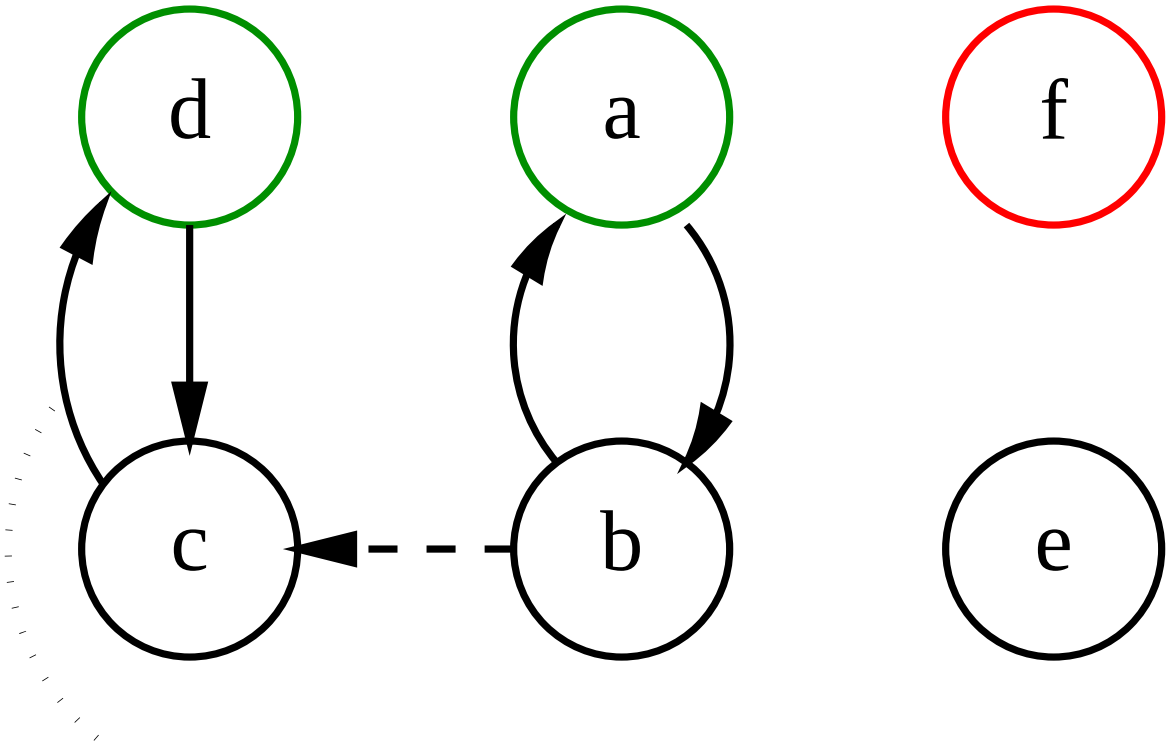
Problem: Lebendigkeit

immer wieder!



Problem: Lebendigkeit

immer wieder!



Zeitredundanz

Zeitredundanz

redundante Transitionen = Zeitredundanz

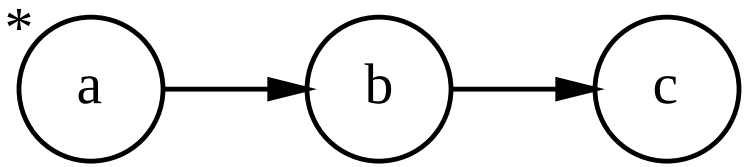
Transitionen, die nie ausgeführt werden, wenn keine Fehler auftreten.

- Ergebnis ist neu!
- Inhalt der Dissertation (unter anderem): Untersuchung der genauen Voraussetzungen, unter denen Speicher- und Zeitredundanz notwendig sind.

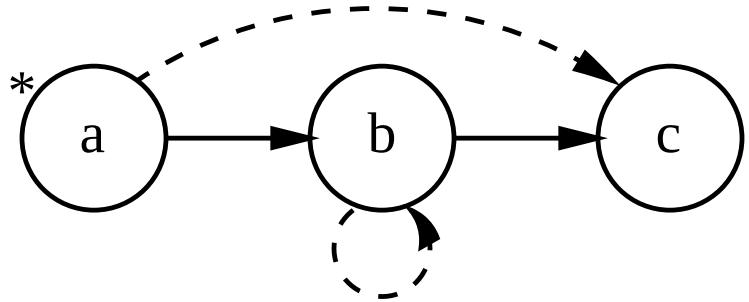
skip

Definition: Fehlermodell

- Fehlermodell = Transformation F von Automaten, die Zustandsübergänge einbaut.



Σ



$F(\Sigma)$

Eigenschaften

- Automaten sind Generatoren von *Abläufen*.
- Ablauf $=$ Folge $s_1, s_2, \ldots$ von Zuständen.
- Eigenschaft $=$ Menge $\{\sigma_1, \sigma_2, \ldots\}$ von Abläufen.
- Ein Automat besitzt Eigenschaft E wenn alle seine Abläufe in E liegen.

Sicherheit und Lebendigkeit

- Sicherheitseigenschaft (*safety*): Eigenschaft, die immer im Endlichen verletzt wird.
- Beispiel: wechselseitiger Ausschluß.
- Lebendigkeitseigenschaft (*liveness*): Eigenschaft, die nur im Unendlichen verletzt werden kann.
- Beispiel: Aushungerungsfreiheit.
- Sicherheit und Lebendigkeit sind fundamental [1].

Fehlertolerante Versionen

- Designprozeß:
  - Man hat ein System Σ_1, welches Sicherheitseigenschaft S verletzt, wenn Fehler aus F auftreten.
  - Möchte Σ_1 gerne in Σ_2 umwandeln, so daß Σ_2 S erfüllt, auch wenn Fehler aus F auftreten.
  - Σ_2 soll aber im fehlerfreien Fall dasselbe Verhalten haben wie Σ_1.

Σ_2 ist die *fehlertolerante Version* von Σ_1.

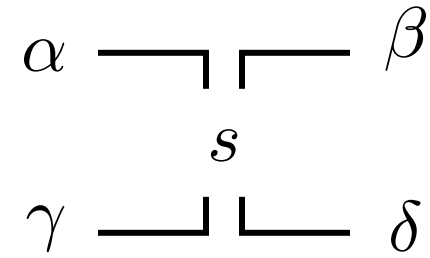
Fehlertoleranz und Sicherheit

- "Nie x" ist eine Sicherheitseigenschaft.
- Wann kann man fehlertolerante Versionen bezüglich einem Fehlermodell F und einer Sicherheitseigenschaft S bauen?
- Unmöglich, falls S direkt mittels Transitionen aus F verletzt werden kann.
- Oft möglich durch Löschen redundanter Transitionen.
- Resultierendes System Σ_2 hat Speicherredundanz.

Sicherheit und Speicherredundanz

- Speicherredundanz notwendig, um fehlertolerant bezüglich einer Sicherheitseigenschaft zu werden.
- Voraussetzung: F muß in Σ_1 und Σ_2 dieselben Fehler einbauen.
- Annahme: Sicherheitseigenschaft ist *fusionsabgeschlossen*.

Fusionsabgeschlossenheit



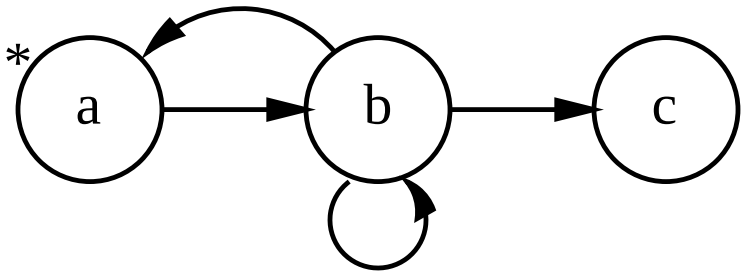
- Sicherheit allgemein: Ausschluß einer Menge endlicher Präfixe.
- Fusionsabgeschlossene Sicherheit: Ausschluß einer Menge von Transitionen.
- "Man kann an der Transition erkennen, ob sie ausgeführt werden darf oder nicht."

Fehlertoleranz und Lebendigkeit

- "Immer wieder x" ist eine Lebendigkeitseigenschaft.
- Was muß man tun, um fehlertolerante Versionen bezüglich einer Lebendigkeitseigenschaft zu konstruieren?

Lebendigkeitsannahmen

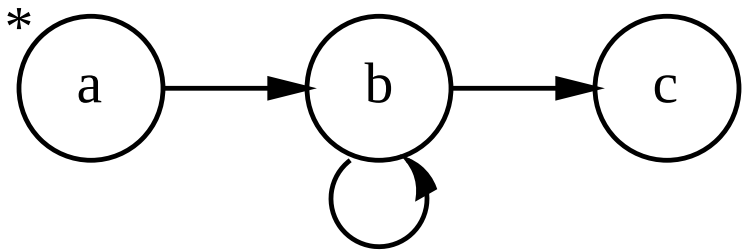
- Automat $\Sigma = (C, I, T, A)$



- Maximalität
- Schwache Fairness

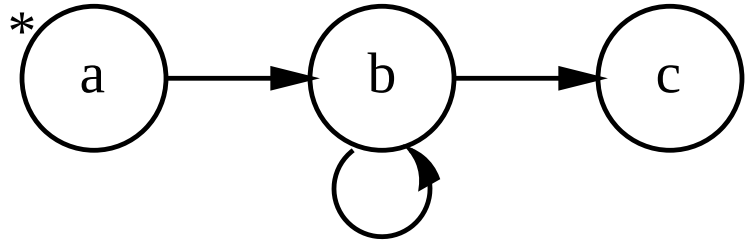
Fehlermodelle und Lebendigkeit

- Fehlermodelle können auch die Lebendigkeitsannahme abschwächen.
- Beispiel: Abschwächung von schwacher Fairness zu Maximalität.



Σ

A = schwache Fairness



$F(\Sigma)$

A = Maximalität

Fehlertoleranz und Lebendigkeit

- Wann kann man fehlertolerante Versionen bezüglich einem Fehlermodell F und einer Lebendigkeitseigenschaft L bauen?
- Unmöglich, falls aus direktem Programmfluß ein *livelock* ausschließlich in F-Transitionen passieren kann.
- Oft möglich durch Hinzufügung von redundanten Transitionen.
- Resultierendes System Σ_2 hat Zeitredundanz.

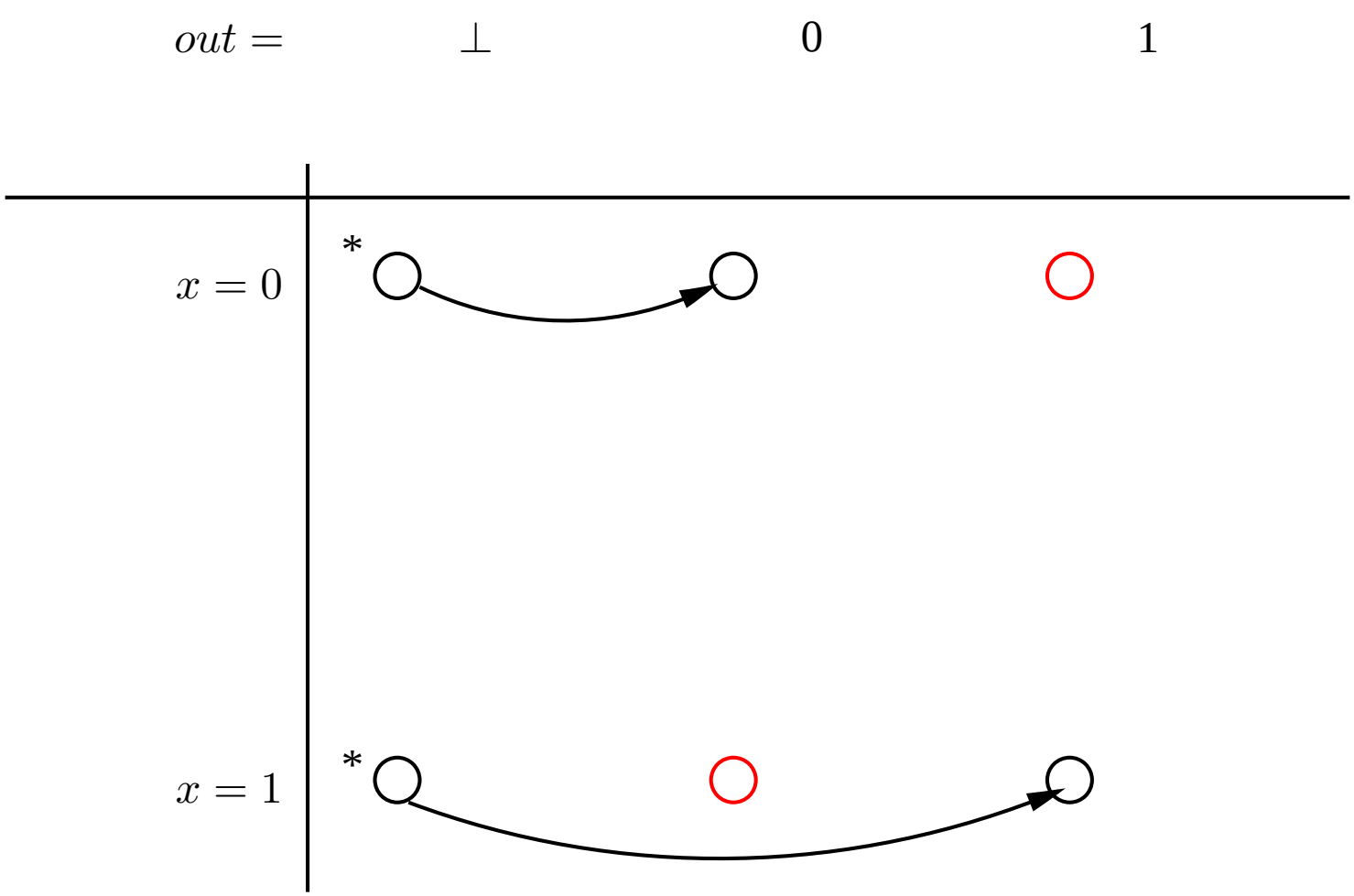
Lebendigkeit und Zeitredundanz

- Zeitredundanz notwendig, um fehlertolerant bezüglich einer Lebendigkeitsspezifikation zu werden.
- Voraussetzung: F schwächt bei beiden Programmen die Lebendigkeitsannahme in derselben Art ab.

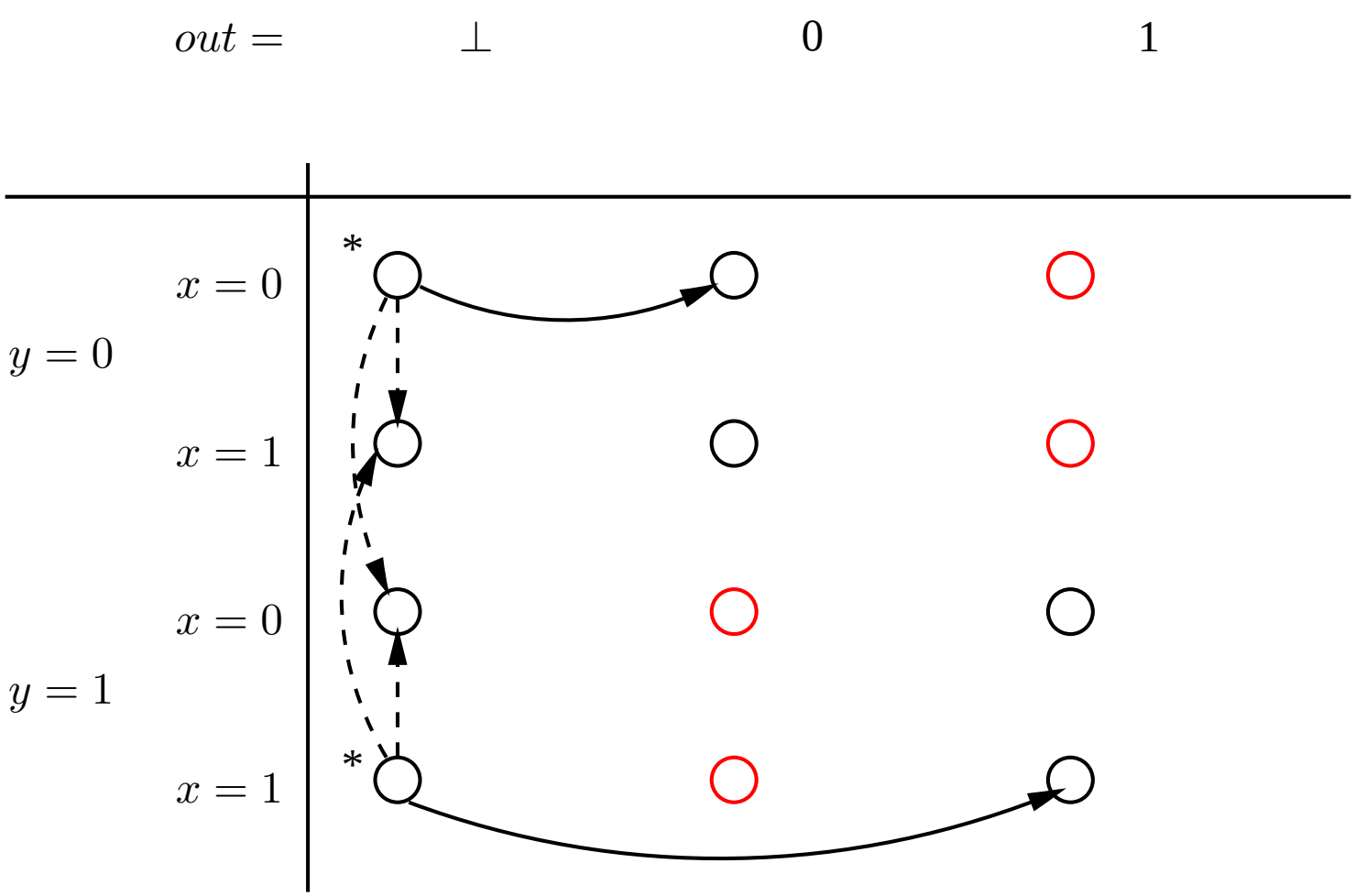
Beispiel: TMR

- Komponente x berechnet einen Wert aus $\{0, 1\}$.
- Spezifikation: Nur korrekter Wert soll auf Ausgang out geschrieben werden (Sicherheit) und schließlich soll out von $\perp$ auf 0 oder 1 wechseln (Lebendigkeit).
- Zusätzliche Komponenten y und z stehen zur Verfügung.
- Fehlermodell: maximal eine Komponente berechner fehlerhaften Wert.

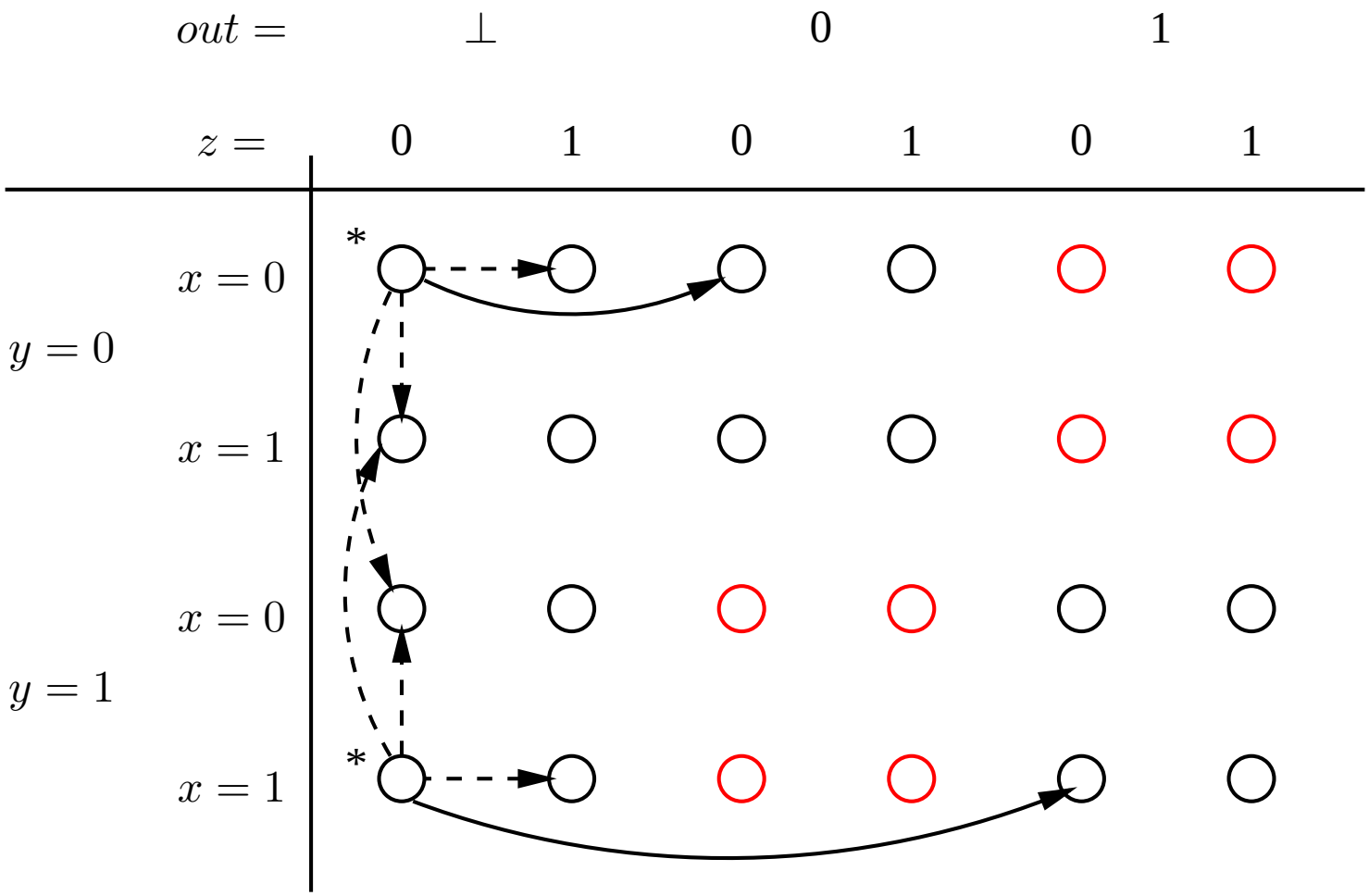
Speicher- und Zeitredundanz in TMR



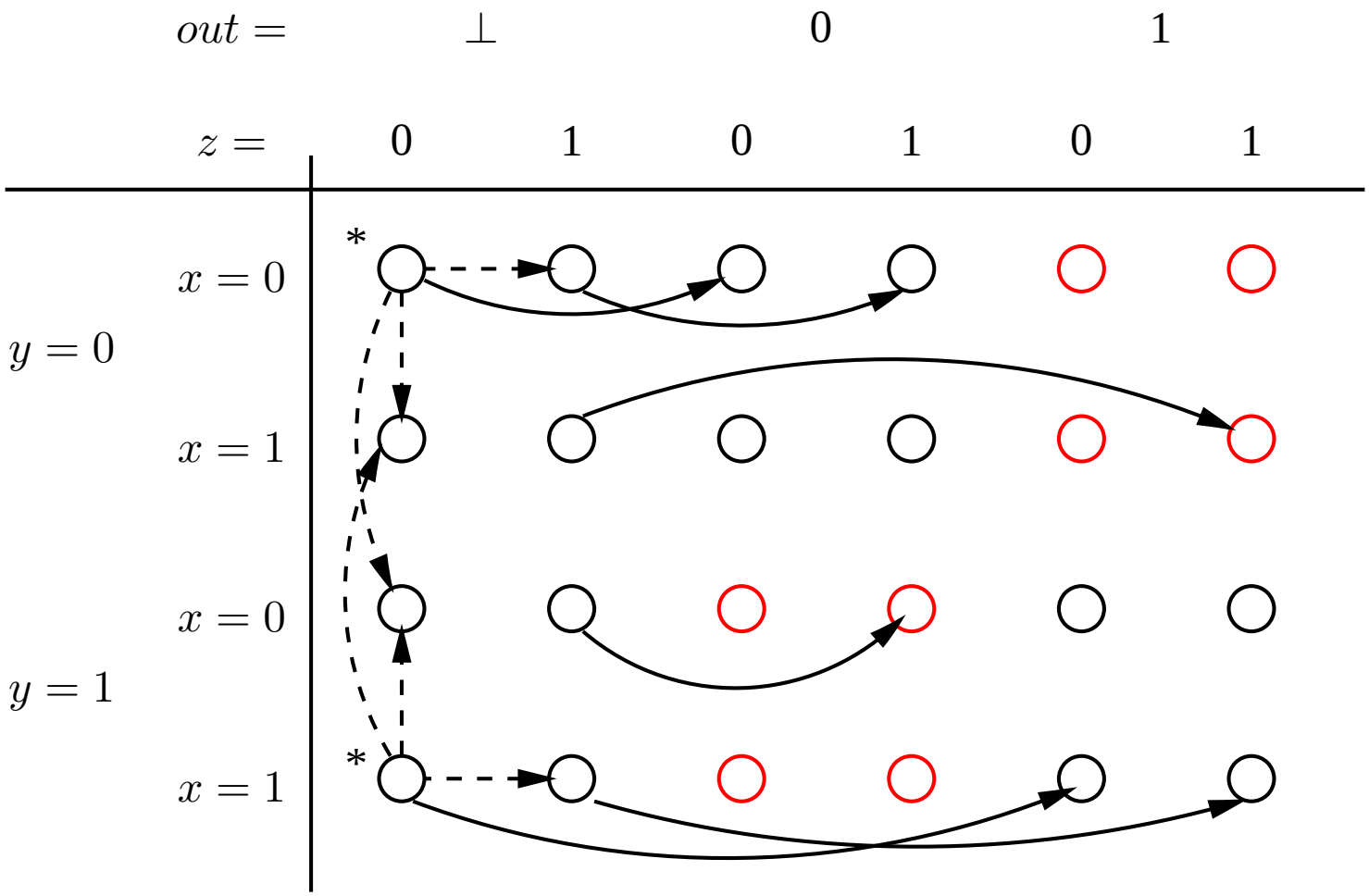
Speicher- und Zeitredundanz in TMR



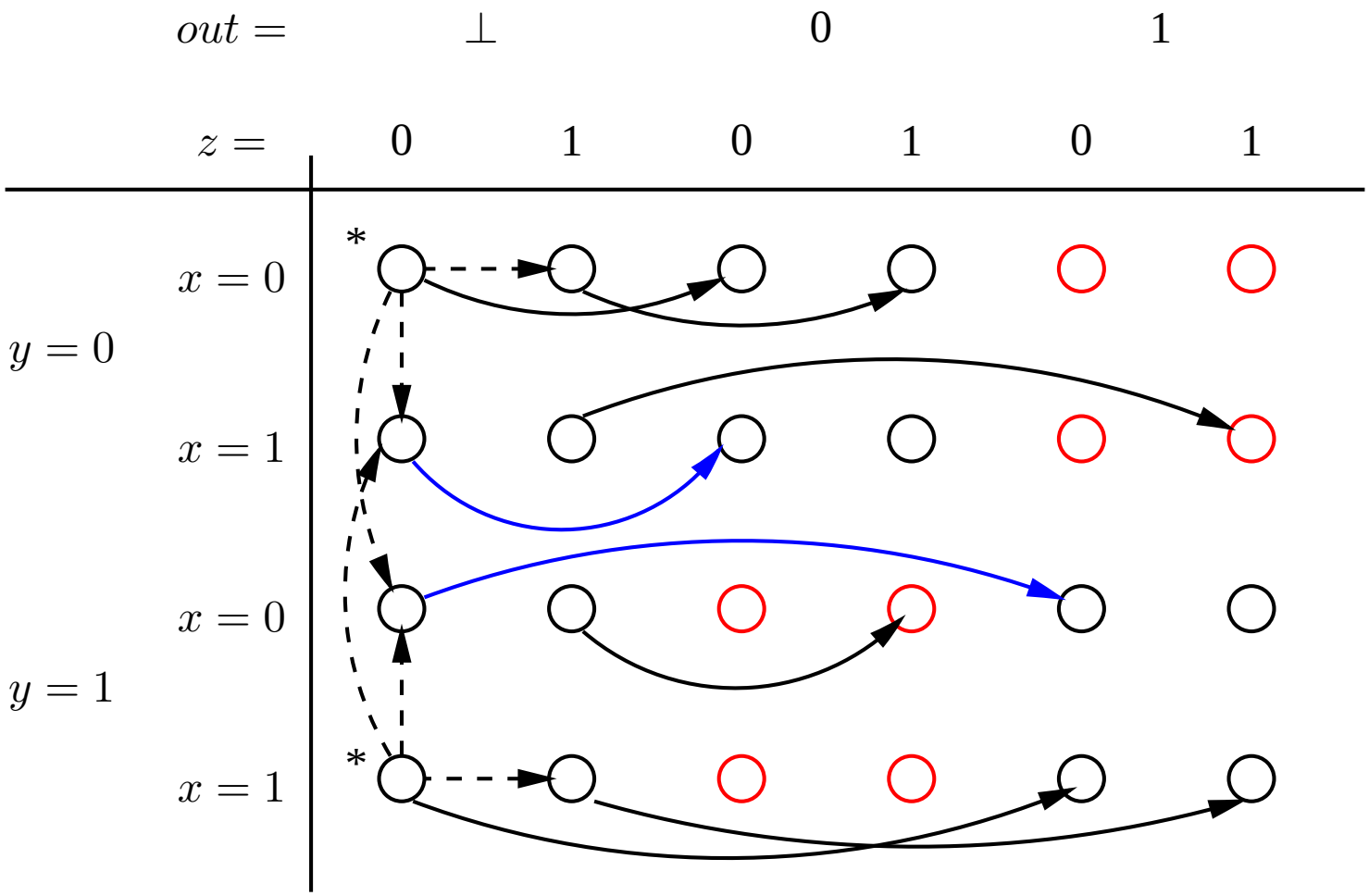
Speicher- und Zeitredundanz in TMR



Speicher- und Zeitredundanz in TMR



Speicher- und Zeitredundanz in TMR



Zusammenfassung

back

F-tolerant bzgl.	notwendig
Sicherheit	Speicherredundanz
Lebendigkeit	Zeitredundanz + Speicherredundanz

- Speicherredundanz bekannt aus der Kodierungstheorie.
- Relation zu *safety* neu!
- Zeitredundanz ist ein neuer Begriff!
- Relation zu *liveness* neu!

Nutzen

- "Keine Fehlertoleranz ohne Redundanz" nachweisbar.
- Redundanz messbar (Zählen von redundanten Zuständen/Transitionen).
- Systeme bezüglich Redundanz vergleichbar:
  - TMR ist redundanzoptimal bzgl. Sicherheit und Lebendigkeit.
  - TMR ist nicht redundanzoptimal bzgl. Sicherheit.
- Methodologische Basis für effiziente Fehlertoleranzverfahren.

Danksagungen

- Diese Folien wurden hergestellt unter Verwendung von pdfLaTeX und Klaus Guntermanns PPower4.

Literatur

[1] Bowen Alpern and Fred B. Schneider. Defining liveness. *Information Processing Letters*, 21:181–185, 1985.

[2] Felix C. Gärtner and Hagen Völzer. Redundancy in space in fault-tolerant systems. Technical Report TUD-BS-2000-06, Department of Computer Science, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany, July 2000.

[3] T. R. N. Rao and E. Fujiwara. *Error-control coding for computer systems*. Prentice-Hall, 1989.