
Grundlagen zuverlässiger fehlertoleranter Systeme



Sicherheit von Flugzeugtechnik und Autotechnik (USA)

	Flugtechnik	Autotechnik
Einheiten	10 k	100 Mio
Betriebsstunden/Jahr	55 Mio	30000 Mio
Kosten/Einheit	65 Mio	20 k
Unfälle/Jahr	170	21 Mio
Todesfälle/Jahr	350	42 k
Todesfälle/10⁶ Betr.Std.	6,4	0,71
Bediener-Training	hoch	niedrig
Redundante Komponenten	alle flug-kritischen Systeme	Bremsen

Zuverlässigkeitsanforderungen für sicherheitskritische Systeme der Flugzeugtechnik: 10^{-9} Fehler/h für eine Missionszeit von 10 h.

Kann man die Ansätze der Flugzeugtechnik übernehmen?

Zu teuer.

Unterschiedliche Betriebsbedingung.

Schwer durchzusetzende Wartungsintervalle.

Schlecht ausgebildete Benutzer.



Anforderungen an die Autoelektronik

Anfangszuverlässigkeit:	(0 km / 0 h) Fehler: $< 500 \cdot 10^{-9}$ im 1. Jahr Fehler: $< 1000 \cdot 10^{-9}$
System-Lebenszeit:	3500 h (ca. 5Jahre bei 2h/Tag)
Garantie:	≥ 1 Jahr, Ersatzteile ≥ 10 Jahre
Umgebungsbedingungen:	- 40 bis +85 °C
Vibration:	10 Hz bis 1 kHz, zufällig 5g, Sinus 2-5g
Shock:	30 g
Versorgungsspannung:	8-16 V Motorstart mit 6 V (-40 bis +85 °C), 18 V für 2h, 24 V für 1 min umgekehrte Polarität 13,5 V für 1 min

Streßtest für Autoelektronik

- **Funktionstest:** 8, 13.5, 16 V bei -40, 25, 85 °C
- **Hitzetest:** 85 \pm 2 °C für 16h bei 16 V und 6000 upm
- **Kältetest:** - 40 \pm 3 °C für 2h
- **Lagerung:** 85 \pm 2 °C für 504h
- **Temperaturschock:** - 40 bis 85 °C Übergang in 30 sek. 25 mal
- **Temperaturänderung:** - 40 bis 85 °C , 3 \pm 0.6 °C /min für 2 Zyklen



Definitionen:

Verlässlichkeit (Dependability): "Doing the right thing at the right time!"

Die **Verlässlichkeit (Dependability)** eines Systems ist die **Qualität einer vom System erbrachten Funktion (Service)**, in die begründbar und berechtigterweise **Vertrauen (reliance)** gesetzt werden kann.

Die **Funktion (Service)** ist das an der Schnittstelle zu anderen Systemen, die mit dem betrachteten System interagieren, beobachtbare Systemverhalten. Die **Qualität** bezieht sich auf die **Übereinstimmung der erbrachten mit der spezifizierten Systemfunktion**.

Fragestellungen:

- **Fehler:** Welche Klassen von Fehlern werden berücksichtigt?
- **Attribute:** Welche Aspekte der Verlässlichkeit werden besonders hervorgehoben?
- **Maße:** Wie läßt sich die Verlässlichkeit quantitativ erfassen?

Laprie, J.-C. : Dependability: A unifying concept for reliable, safe, secure computing.
In IFIP Congress, volume 1, (1992)pages 585-593.



Aspekte der Verlässlichkeit

Überlebensfähigkeit (Reliability) bedeutet Zuverlässigkeit in Hinblick auf ununterbrochenes korrektes Systemverhalten. Es ist als die Wahrscheinlichkeit definiert, daß ein zu Beginn fehlerfreies System bis zu einem bestimmten Zeitpunkt fehlerfrei bleibt.

Verfügbarkeit (Availability) bedeutet Zuverlässigkeit in Hinblick auf die momentane Bereitschaft eines Systems zur Erbringung eines Service. Verfügbarkeit wird als quantitatives Maß definiert, das die Ausfalldauer zu der Dauer korrekten Systemverhaltens in Beziehung setzt, d.h. die Wahrscheinlichkeit, das System zu einem beliebigen Zeitpunkt fehlerfrei anzutreffen.

Prozeßsicherheit (Safety) bedeutet Zuverlässigkeit in Hinblick auf das Verhindern katastrophaler Auswirkungen eines Systemverhaltens auf seine Umgebung, wobei mit Umgebung meist die physikalische, reale Umgebung gemeint ist, wie z.B. industrielle Prozeßsteuerungsanlagen, Kraftwerke, Verkehrslenkungssysteme, u.s.w.

Informationssicherheit (Security) bedeutet Zuverlässigkeit in Hinblick auf die Erhaltung der Vertraulichkeit (Confidentiality) und Integrität (Integrity) von Information in einem Computersystem.

**der Ansatz in der
Flugzeugindustrie**

**der Ansatz in der
Autoindustrie**

**der Ansatz in der
industriellen
Automatisierung**



Wie häufig fallen Komponenten aus?

λ : Ausfälle/ 10^6 Betriebsstunden (~115 Jahre)

Militärischer Microprozessor	0,022	(Daten von 1987)
Automotiver Microprozessor	0,12	
Elektromotor	2,17	
Bleibatterie	16,9	
Ölpumpe	37,3	

zum Vergleich:

einzelner menschlicher Operateur: $100/10^6$ Aktionen

Mensch in der Krisenbewältigung: $300000/10^6$ Aktionen

10^{-9} Ausfälle/h in der Flugtechnik
 $\sim 10^{-9}$ Ausfälle/h in der Autotechnik



Basiszuverlässigkeit unzureichend



Mechanismen zur Verlässlichkeit

Fehlervermeidung Fehlertoleranz

Alle Mechanismen der Fehlertoleranz beruhen auf Redundanz

- Informationsredundanz
- Komponentenredundanz
- Zeitredundanz

Die Wahl der Redundanzmethode ist davon abhängig, welche Fehlerklasse berücksichtigt wird!



Mechanismen der Fehlertoleranz

(Explizite) Fehlerbehandlung

Fehlermaskierung

Dynamische Redundanz

Statische Redundanz

Fehlererkennung

**Schadensermittlung
und Begrenzung**

Rekonfiguration

Recovery

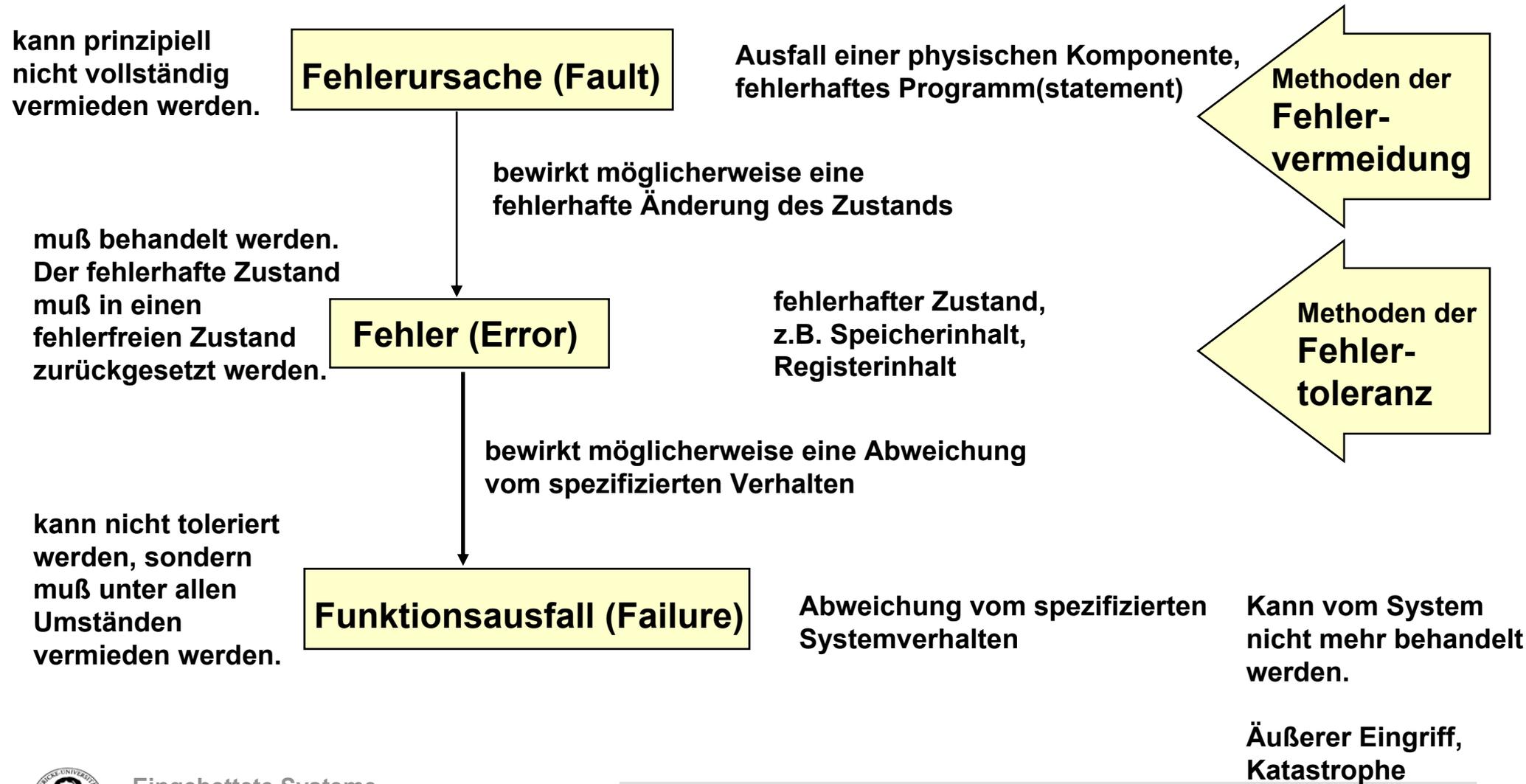
**Fehler-
behandlung**

Fehlerkorrigierende Codes

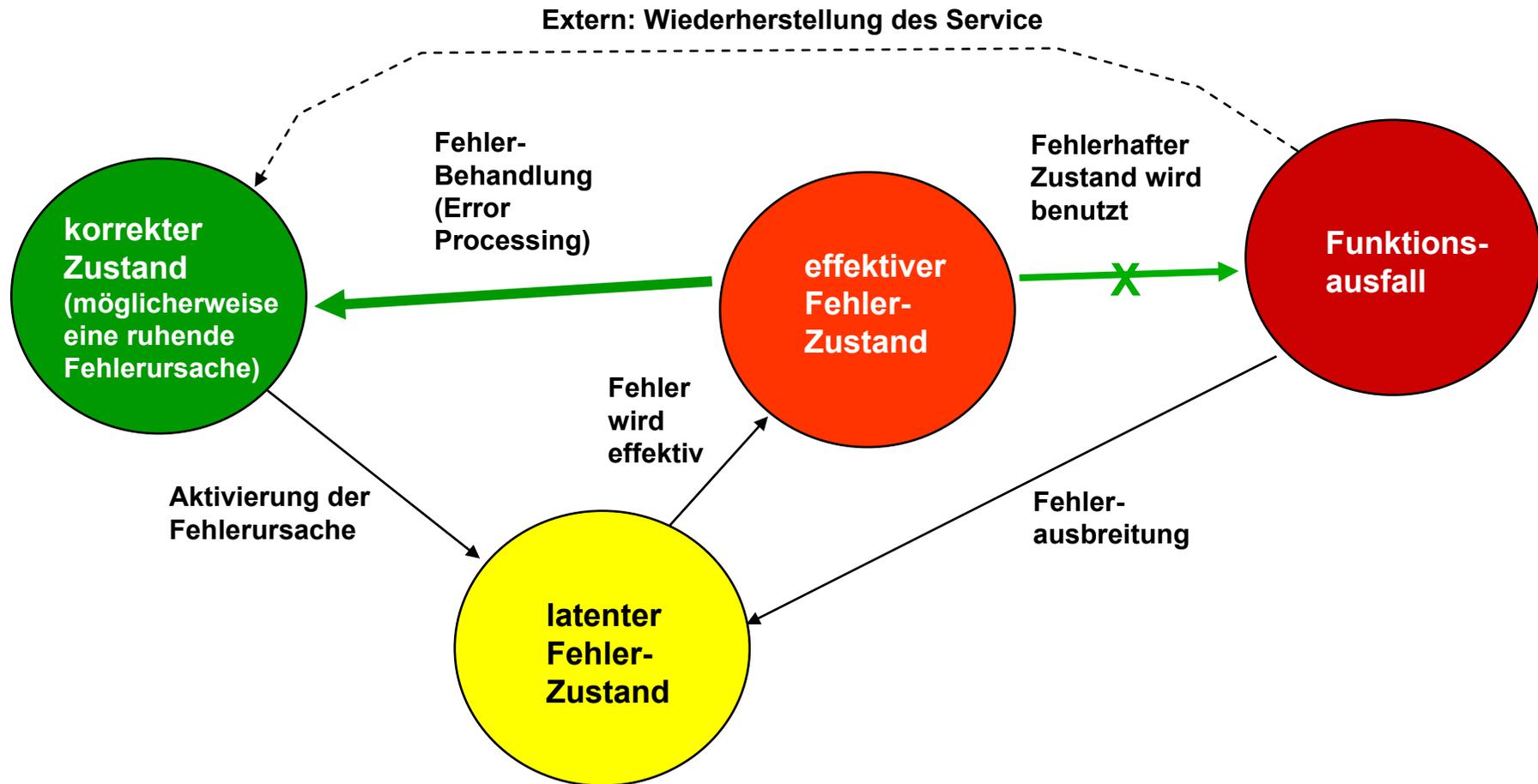
n-aus-m - Mehrheitsentscheidung



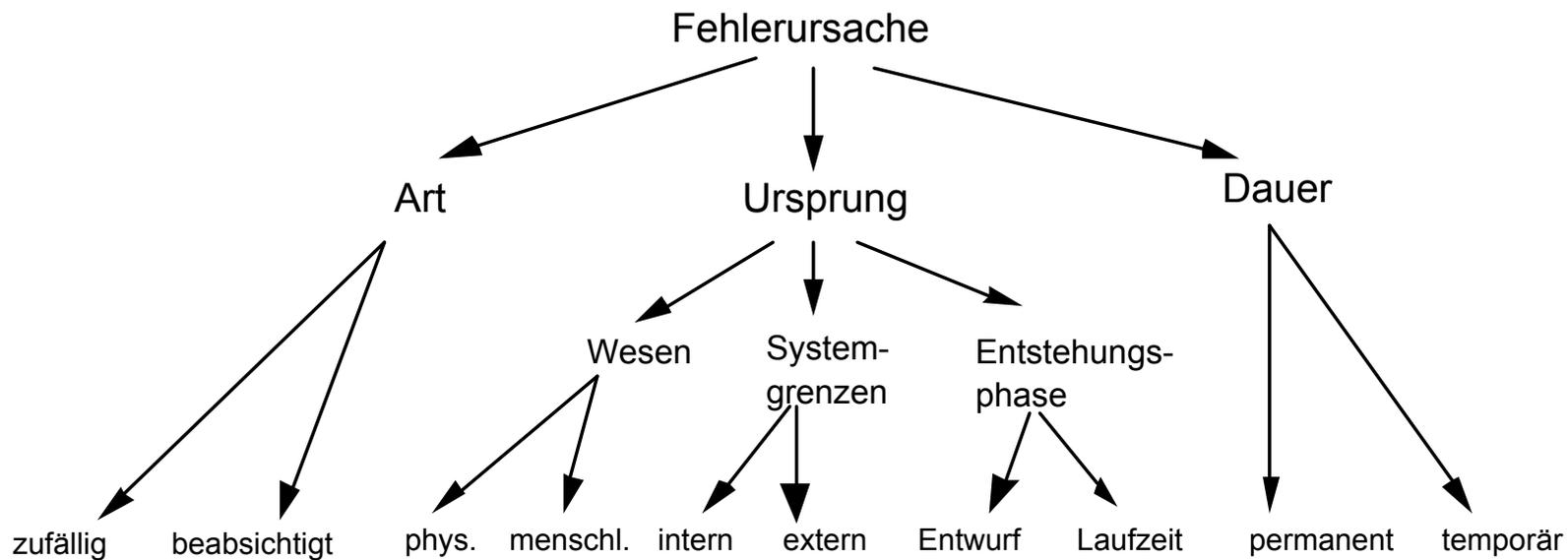
Fehlerklassifizierung



Zustandsdiagramm der Fehlerursache-Fehler-Funktionsausfall -Kette



Fehlerklassifizierung nach der Fehlerursache



Beispiel: Physische Fehlerursachen

Ursprung des Fehlers: physikalisches Ereignis								
Art		System- grenzen		Entstehungs- phase		Dauer		Bezeichnung
•			•			•		permanentener phys. Fehler
•			•			•	•	intermittierender Fehler
•				•		•	•	transienter Fehler

Typische permanente Fehler: Stuck-at- {0,1}, Stuck-together.

Typische intermittierende Fehler: Muster-abhängige Fehler, Temperatur- und Zeitfehler.

Typische transisente Fehler: α, β, γ -Teilchen, temperaturabhängige Fehler.



Beispiel: Unbeabsichtigte menschliche Fehlerursachen

Ursprung des Fehlers: menschliches Fehlverhalten								
Art		Systemgrenzen		Entstehungsphase		Dauer		Bezeichnung
zufällig	beabsichtigt	intern	extern	Entwurf	Laufzeit	permanent	temporär	
•		•		•		•		Entwurfsfehler
•			•		•		•	Bedienungsfehler

Beispiel: Beabsichtigte menschliche Fehlerursachen

Ursprung des Fehlers: menschliches Fehlverhalten								
Art		Systemgrenzen		Entstehungsphase		Dauer		Bezeichnung
		intern	extern	Entwurf	Laufzeit	permanent	temporär	
zufällig	beabsichtigt		•		•	•		Intrusion
	•		•		•		•	
	•	•			•	•		Virus
	•	•		•		•		Trojanisches Pferd
	•	•		•		•		maliziose Logik

Problem der Informationssicherheit !



Möglichkeiten der Fehlererkennung

Diagnostische Tests: Überprüfen einzelne Komponenten des Systems, indem sie aus der Struktur der Komponenten Eingabewerte ableiten, die bestimmte Fehler in eine Komponente aktivieren und zum Ausgang propagieren.

Code Tests: Basieren auf fehlererkennenden Codes.

Timing Tests: Überprüfen der bekannten Zeitbedingungen.

Replikations-Tests: Mehrfache Ausführung einer Berechnung und Vergleich der Ergebnisse.

Reversive-Tests: Umkehrung der Berechnung. Aus den Ergebnissen werden die Eingaben abgeleitet verglichen.

Plausibilitäts-Tests: überprüfen Ergebnisse auf ihre Plausibilität hinsichtlich der beabsichtigten Nutzung.

Strukturelle Tests: Überprüfen die Struktur von Datenstrukturen.



Testen permanenter Hardwarefehler

Was testen? Chips auf einem Board, chipinterne Komponenten.

Wie testen?

Generelle Probleme: Komplexe Schaltungen erfordern ausführliche Tests. Große Mengen von Testdaten, Probleme mit sequentiellen Schaltungen, Auswertung schwierig.

Probleme auf Board-Ebene: Isolation von Chips vom Rest der elektronischen Schaltungen, Anlegen von Testmustern an die Pins der Testkandidaten.

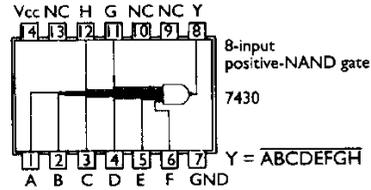
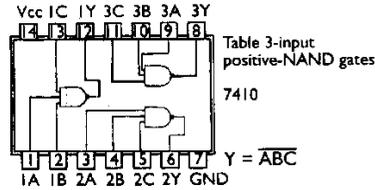
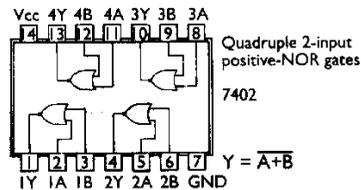
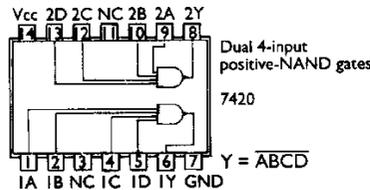
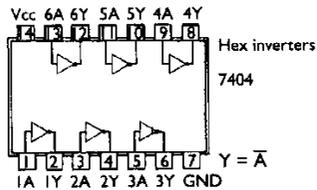
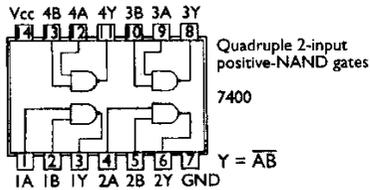
Probleme auf Chip-Ebene: Isolation von Komponenten, Anlegen von Testmustern an die internen Strukturen, eklatant schlechtes Verhältnis von verfügbaren Pins zu Anzahl der internen Komponenten.

Problem verschärft sich durch "System-on-a-Chip" Technik.



Problem: Komplexe interne Struktur, wenige externe Verbindungen (PINS)

1980



2002



3 Pins/Gatter

> 0,0001 Pins/Gatter

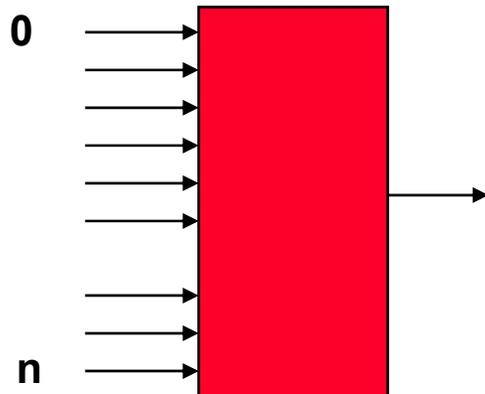
Kontrollierbarkeit: Wie kann man einen bestimmten Zustand herbeiführen, (Controllability) damit der Fehler aktiviert wird?

Beobachtbarkeit: Wie kann man einen Fehler zum Ausgang propagieren? (Observability)



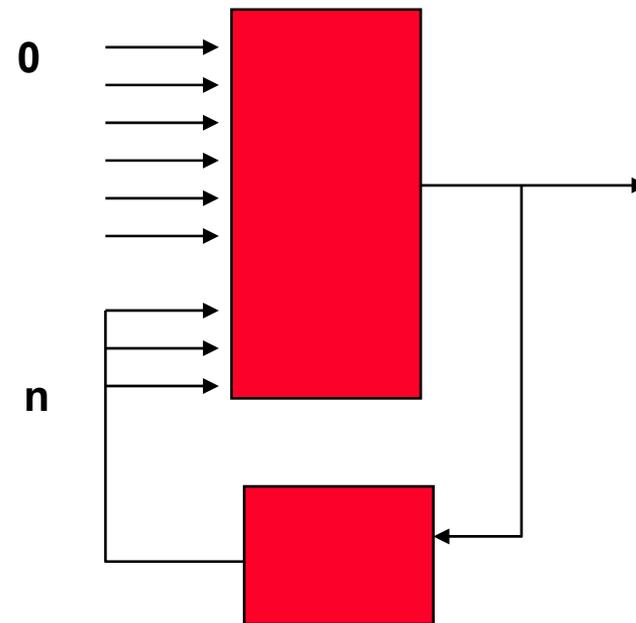
Problem des ausführlichen Testens

**Kombinatorische
Schaltung**



2^n Testmuster

**Sequentielle
Schaltung**

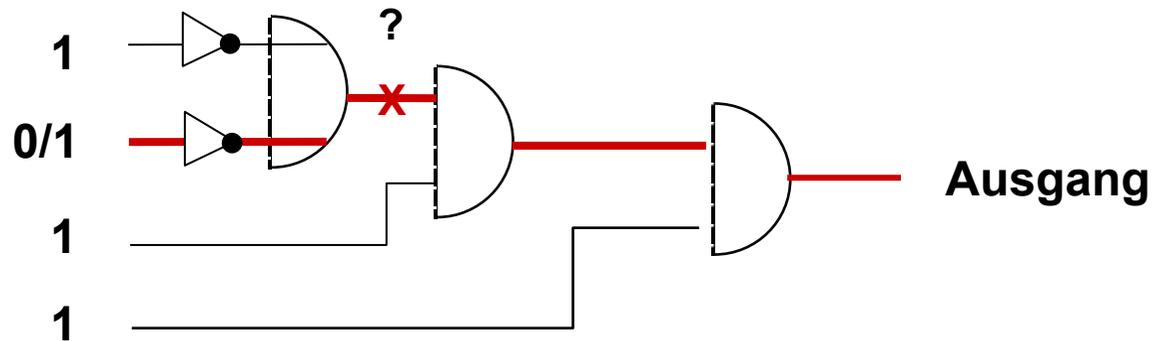


m Zustände

2^{n+m} Testmuster



Aktivierung eines Fehlers



Pfadsensitivierung:

Anlegen eines Musters, das es erlaubt, einen bestimmten Fehler zu aktivieren und auf einem Pfad zum Ausgang zu propagieren.

Verfahren zur Testunterstützung

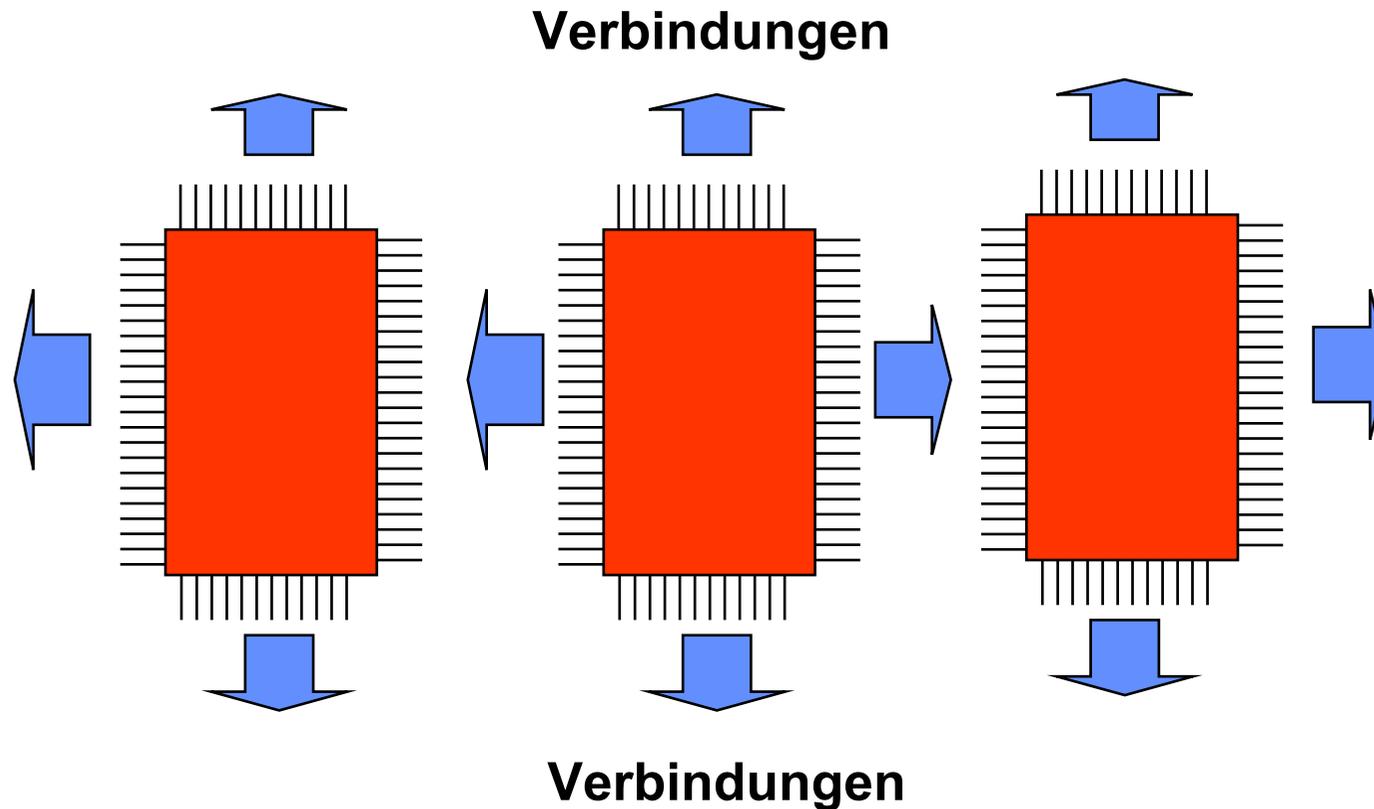
Boundary Scan: Isolation von Chips auf dem Board, Heranführen beliebiger Testmuster an den Chip, Auslesen der Ergebnisse

Scan Path Design: Heranführen beliebiger Testmuster an interne Komponenten auf dem Chip, Auslesen der Ergebnisse



Boundary Scan: Der JTAG Standard

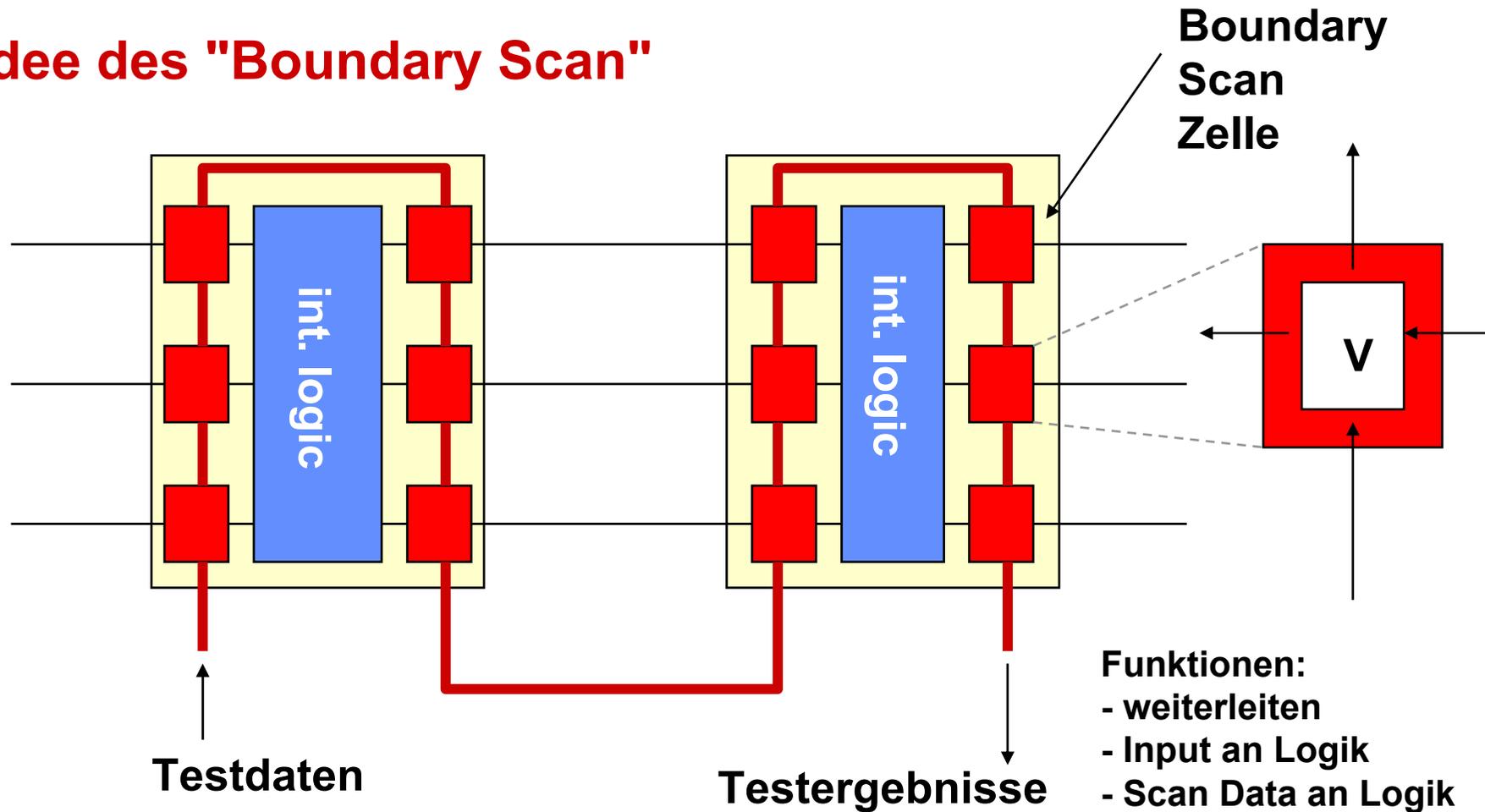
(IEEE 1149)



Wie isoliert man einen Chip für den Test?
Wie bringt man Testmuster an die Eingänge?

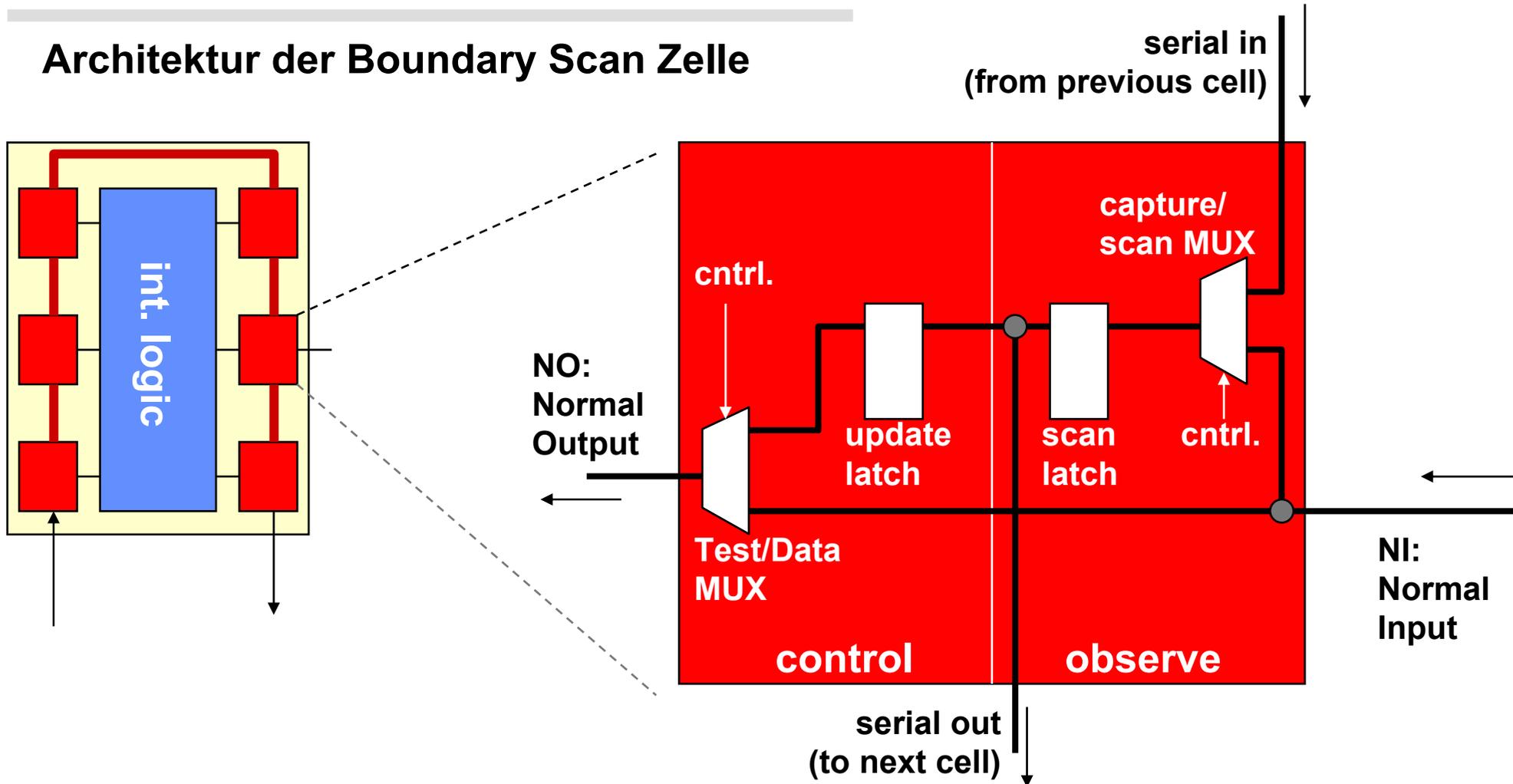
Der JTAG Standard (IEEE 1149)

Die Idee des "Boundary Scan"

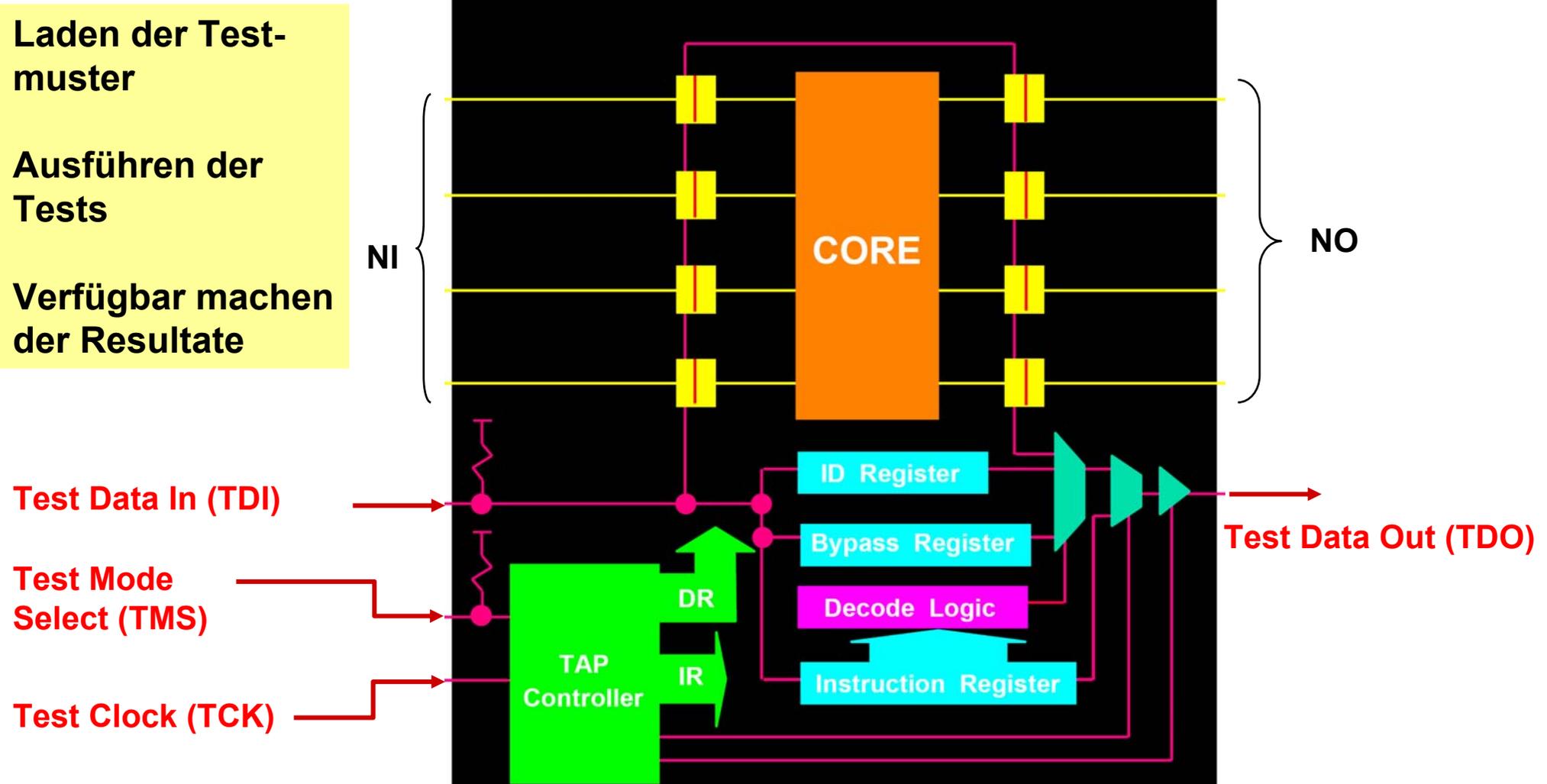


Der JTAG Standard (IEEE 1149)

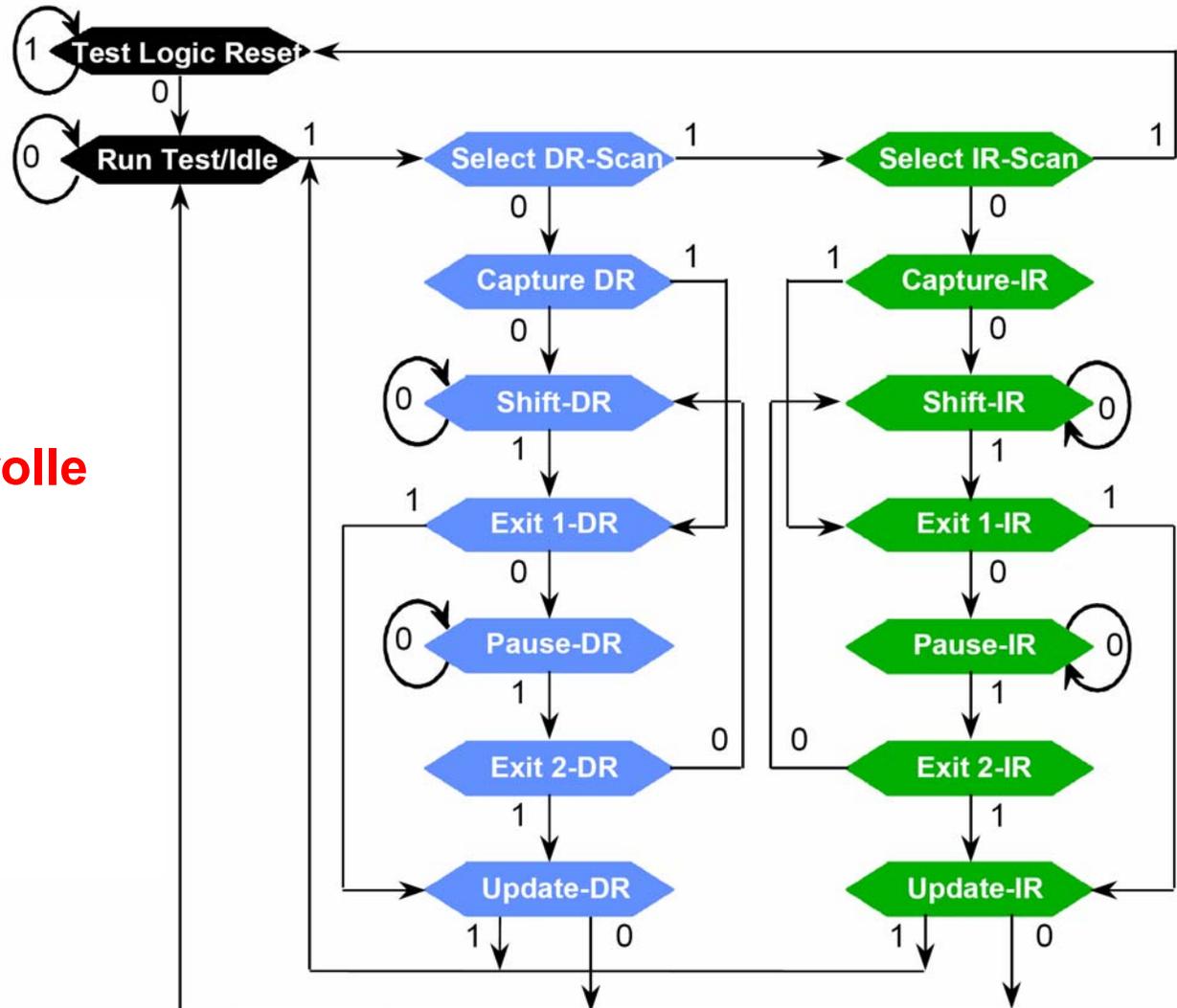
Architektur der Boundary Scan Zelle



Die Architektur der JTAG Kontrolleinheit



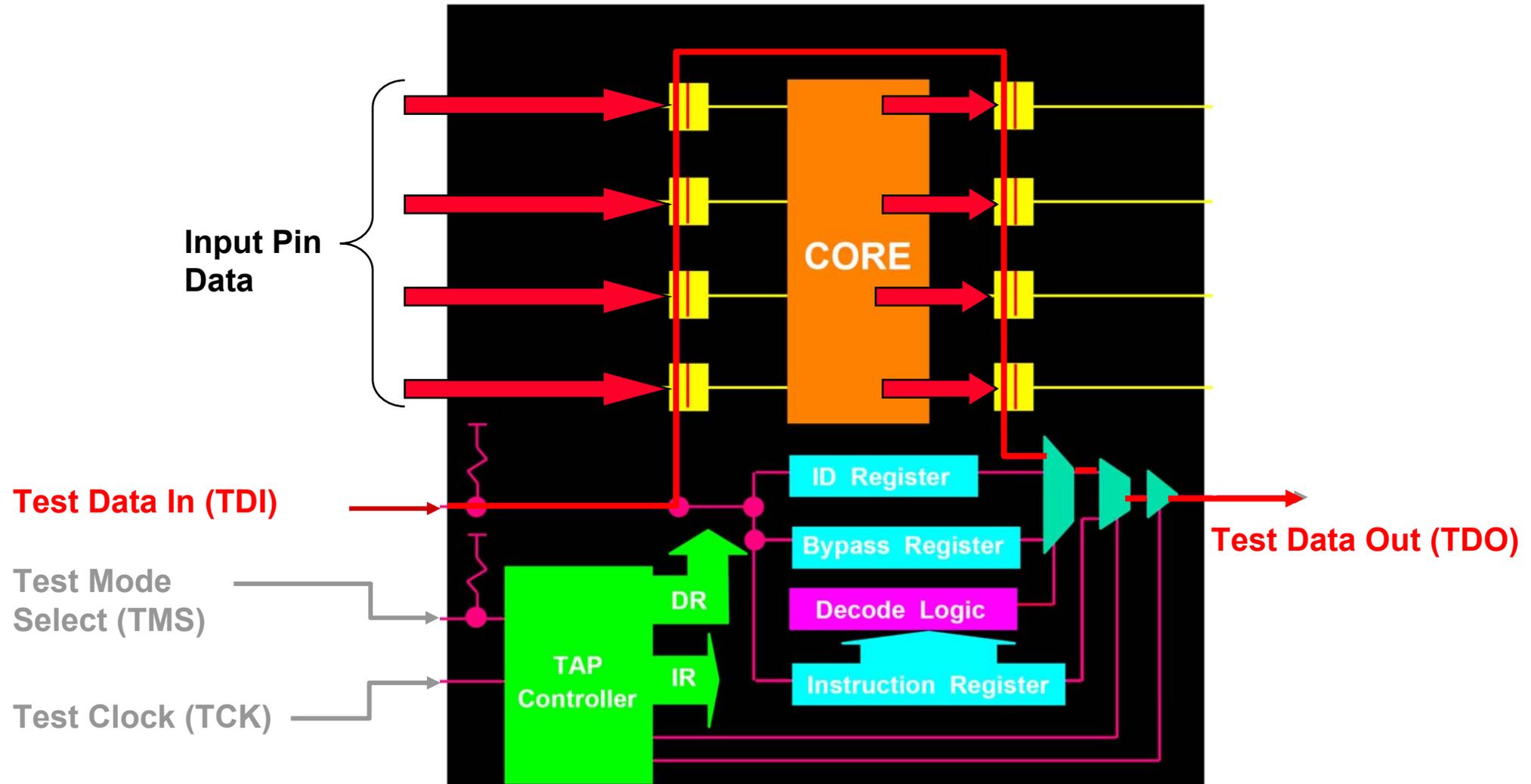
Test Access Port (TAP) Controller



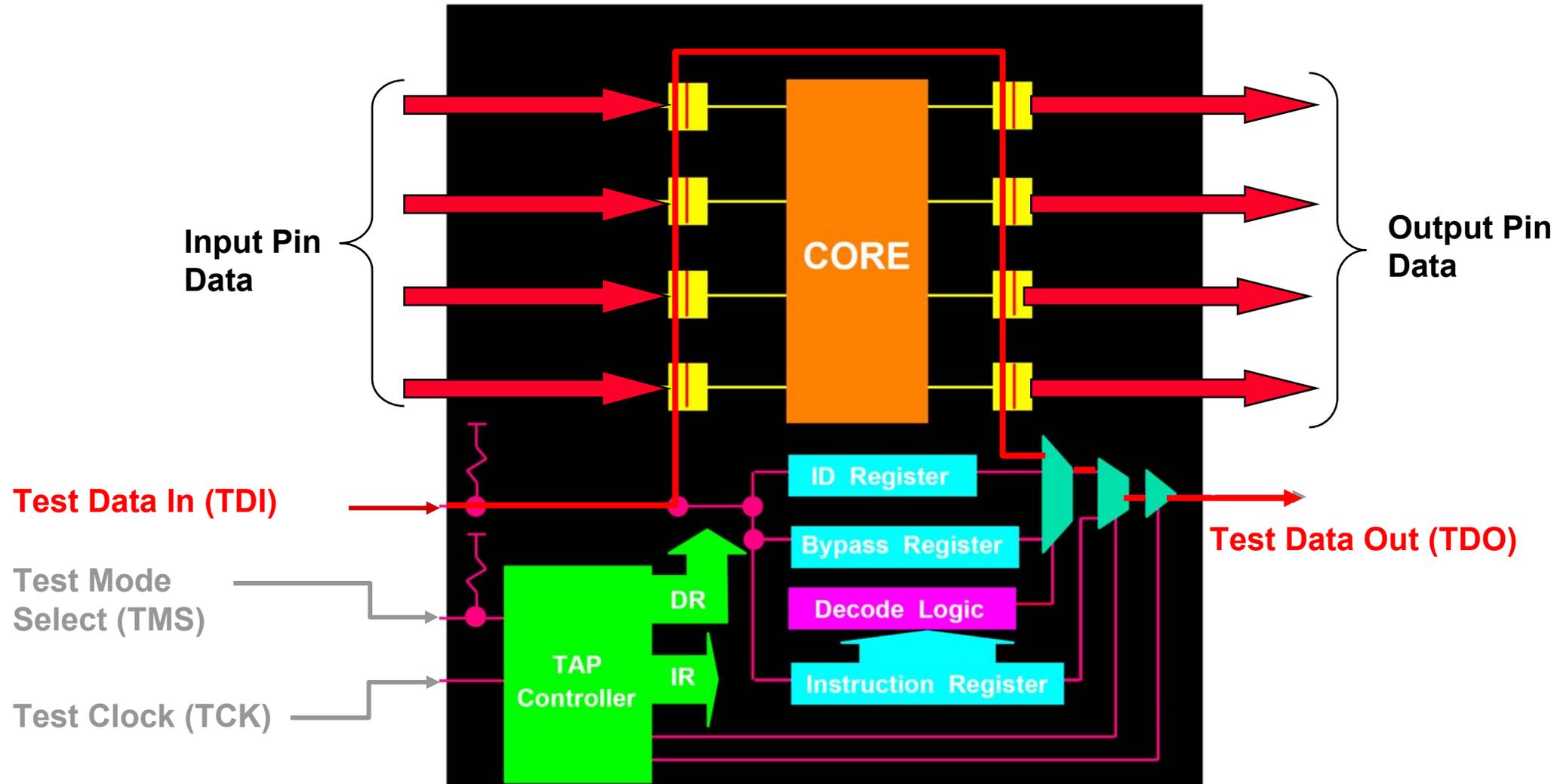
Zustandsautomat zur Kontrolle der Testfunktionen



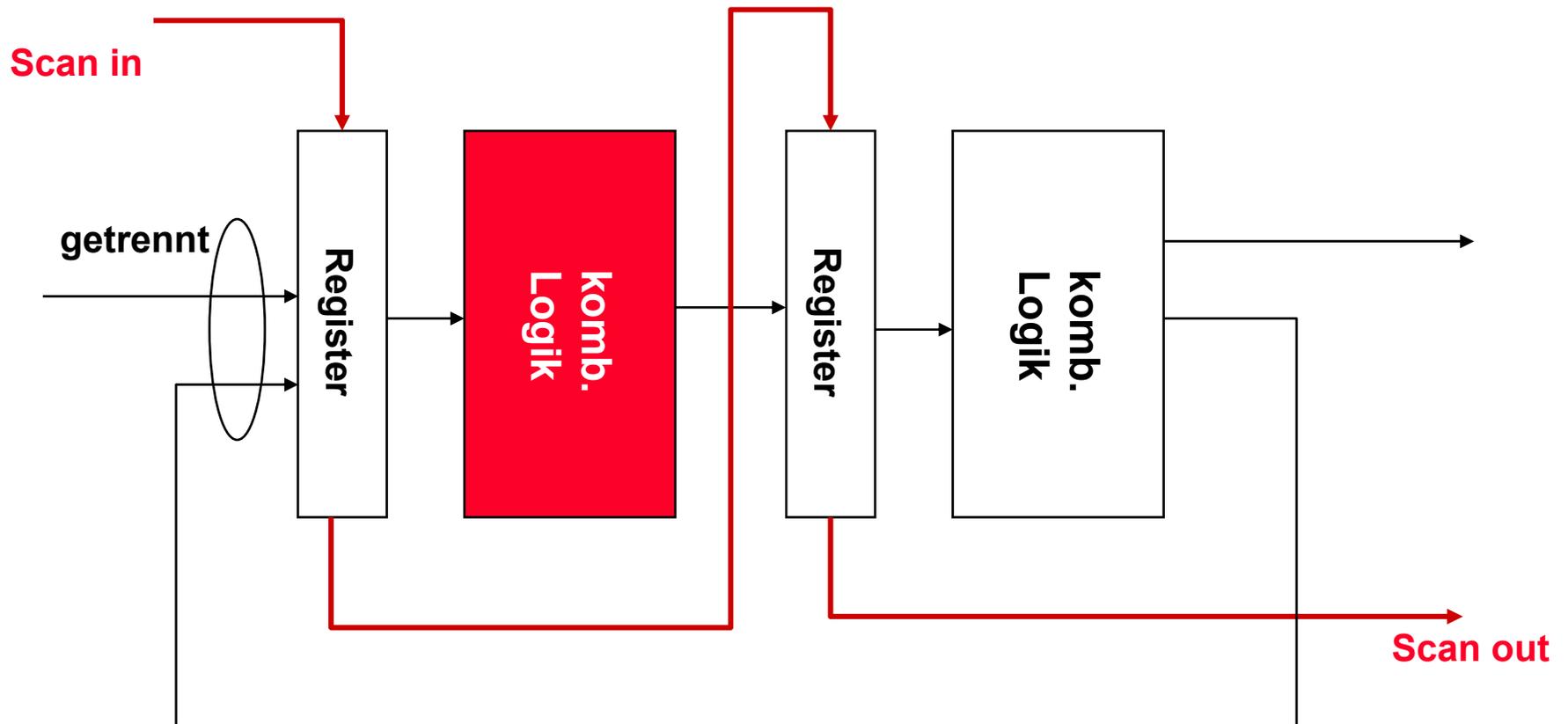
Die "Sample/Preload" Instruktion



Die "Exttest" Instruktion



Test der internen Logik: Die Scan Path Idee



Quantitative Ermittlung der Zuverlässigkeit

Strukturbasierte Modellierung:

- **identifizierbare unabhängige Komponenten**
- **jede Komponente besitzt eine bestimmte Zuverlässigkeit**
- **die Konstruktion des Modells basiert auf der Verbindungsstruktur zwischen den Komponenten**

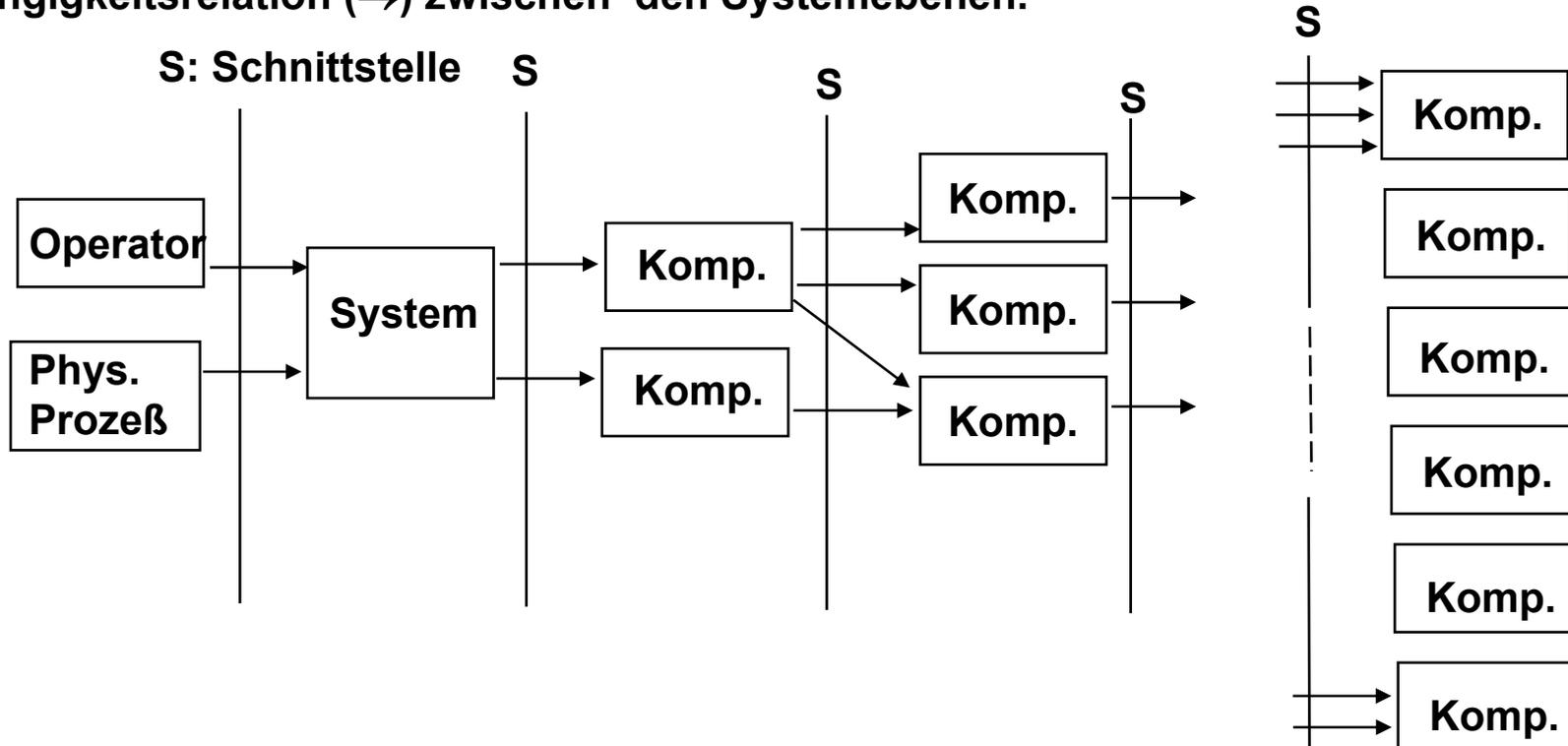


Systemmodellierung

Ein System wird definiert durch:

- seine Struktur, d.h. die Topologie seiner Komponenten
- sein Verhalten, d.h. durch die Gesamtheit des Verhaltens seiner Komponenten

Systemkomponenten sind hierarchisch organisiert. Dadurch ergibt sich eine Abhängigkeitsrelation (\rightarrow) zwischen den Systemebenen.



Zuverlässigkeitsschaltbilder

Intaktwahrscheinlichkeiten:

Für jeden Teil eines Systems werden zwei Zustände betrachtet:

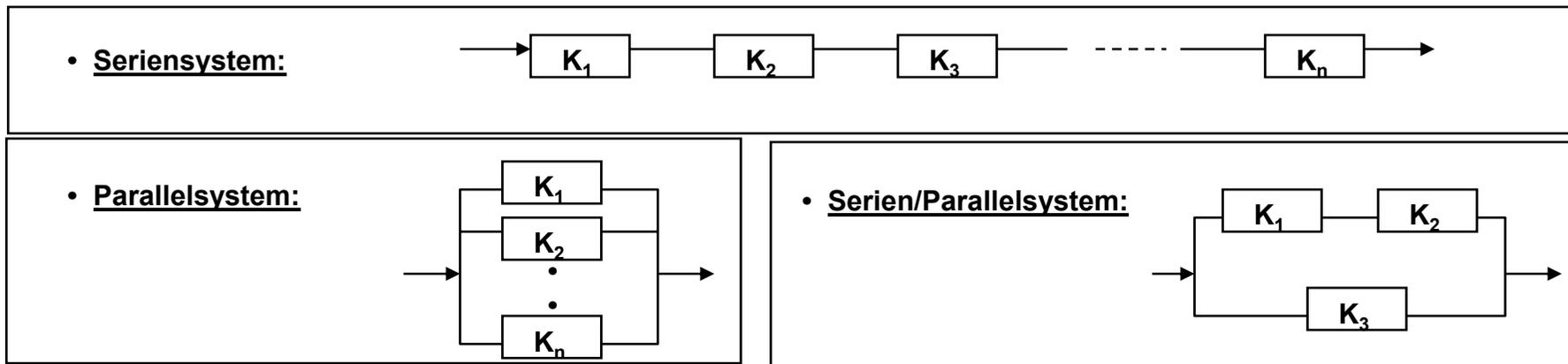
- **intakt** (funktionstüchtig)
- **defekt** (ausgefallen)

Intakt-Wahrscheinlichkeit einer Komponente oder eines Systems von Komponenten:
Wahrscheinlichkeit, dass die Komponente oder das System das spezifizierte Verhalten zeigen.

Ein System ist **fehlertolerant**, wenn es intakt sein kann, ohne dass alle Komponenten intakt sind.

Zuverlässigkeits-Schaltbilder (nicht zu verwechseln mit elektrischen Schaltbildern!):

Abstraktion eines Systems in Komponenten,
denen jeweils eine spezifische Zuverlässigkeit zugeordnet wird.



Intaktwahrscheinlichkeit für ein Seriensystem:



$$P_{\text{serie}} = P(K_1 \text{ intakt}) \vee P(K_2 \text{ intakt}) \vee \dots \vee P(K_n \text{ intakt})$$

Annahme: Die Eigenschaften $(K_i \text{ intakt})$ ($i=1, \dots, n$) sind unabhängig.

➡
$$P_{\text{serie}} = P(K_1 \text{ intakt}) \cdot P(K_2 \text{ intakt}) \cdot \dots \cdot P(K_n \text{ intakt})$$

mit p_i : Intaktwahrscheinlichkeit der Komponente i :

➡
$$P_{\text{serie}} = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$$

Beispiel:

n identische Komponenten:

$$P_{\text{serie}} = p_i^n, \quad n = 5, \quad p_i = 0,99: \quad P_{\text{serie}} = 0,99^5 = 0,95$$

$$P_{\text{serie}} = p_i^n, \quad n = 5, \quad p_i = 0,70: \quad P_{\text{serie}} = 0,70^5 = 0,16$$



Intaktwahrscheinlichkeit für ein Parallelsystem (1-aus-n)

Defektwahrscheinlichkeit = 1 - Intaktwahrscheinlichkeit

(Intakt und defekt sind zueinander komplementäre Ereignisse).

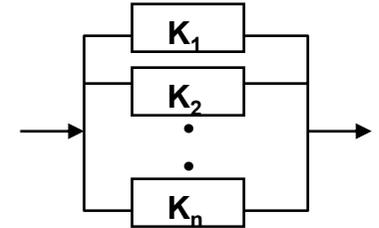
$P_{\text{parallel}} = P(K_1 \text{ defekt}) \text{ und } P(K_2 \text{ defekt}) \text{ und } \dots P(K_n \text{ defekt})$

Annahme: Die Eigenschaften $(K_i \text{ defekt})$ ($i=1, \dots, n$) sind unabhängig.

➔ $P_{\text{parallel}} = P(K_1 \text{ defekt}) \cdot P(K_2 \text{ defekt}) \cdot \dots \cdot P(K_n \text{ defekt})$

Mit p_i : Defektwahrscheinlichkeit der Komponente i:

➔ $P_{\text{parallel}} = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$



Beispiel Defektwahrscheinlichkeit:

n identische Komponenten:

$P_{\text{serie}} = p_i^n$, $n = 5$, $p_i = 1 - 0,99$: $P_{\text{serie}} = 0,01^5 = 0,000000001$ Intaktw.: 0,999999999

$P_{\text{serie}} = p_i^n$, $n = 5$, $p_i = 1 - 0,70$: $P_{\text{serie}} = 0,30^5 = 0,00243$ Intaktw.: 0,99757



K - aus - n - Systeme

Systeme aus n Komponenten von denen mindestens k der Komponenten intakt sind.

Wahrscheinlichkeit, daß genau k ausgewählte Komponenten intakt (die Komponenten 1,...,k), die anderen Komponenten defekt sind (die Komponenten k+1,...,n).

$$P_{k\text{-aus-}n} = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k \cdot (1 - p_{k+1}) \cdot (1 - p_{k+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_n)$$

Es gibt $\binom{n}{i}$ Möglichkeiten, i Komponenten aus n Komponenten auszuwählen:

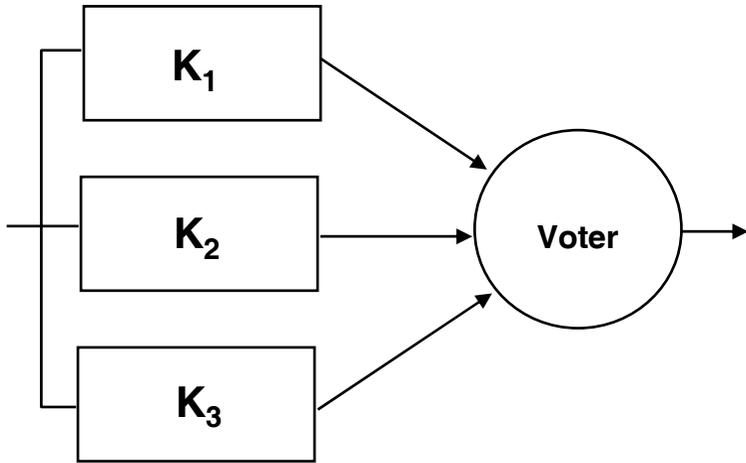
$$P_{k\text{-aus-}n} = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i \cdot (1 - p)^{n-i}$$

Beisp.: ein 2-aus-3 System: $\binom{3}{2} p^2 \cdot (1 - p)^{3-2} + \binom{3}{3} p^3 \cdot (1 - p)^{3-3} = 3 \cdot p^2 \cdot (1 - p) + p^3 \cdot 1$

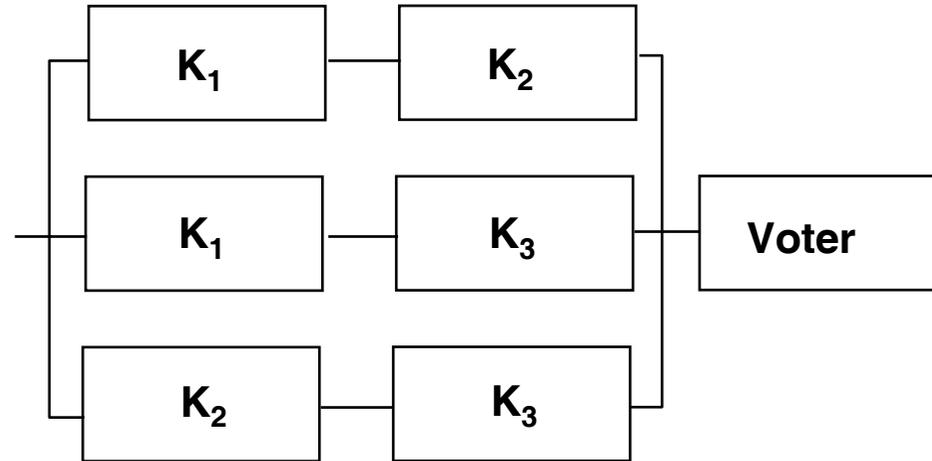


Beispiel TMR (Triple Modulare Redundanz: 2-aus-3-System)

(Elektr.) Schaltbild



Zuverlässigkeits-Schaltbild



$$P_{\text{TMR}} = (p^3 + 3 p^2 \cdot (1 - p)) \cdot p_{\text{voter}}$$

$$p = 0,9, p_{\text{voter}} = 0,99: P_{\text{TMR}} = (0,9^3 + 3 \cdot 0,9^2 \cdot (1 - 0,9)) \cdot 0,99$$

$$= (0,729 + 3 \cdot 0,81 \cdot (1 - 0,9)) \cdot 0,99$$

$$= (0,729 + 2,43 \cdot 0,1) \cdot 0,99 = 0,972 \cdot 0,99$$

$$= 0,96228$$



**HAL: My Fault-Prediction Unit tell me that I
will fail within the next 36 hours.....**

**Wie werden die
Ausfallwahrscheinlichkeiten über
die Zeit ermittelt ?**



Maße der Fehlertoleranz

Lebensdauer T

Zeit vom Beanspruchungsbeginn (DIN 40 042) bis zum Totalausfall (nicht mehr reparierbar)

Ausfallwahrscheinlichkeit F(t)

ist die Wahrscheinlichkeit für eine Komponente bis zum Zeitpunkt $T < t_i$ auszufallen.

Überlebenswahrscheinlichkeit R(t) (Reliability)

Wahrscheinlichkeit, daß eine Komponente zum Zeitpunkt t_i noch nicht ausgefallen ist. $F(t)$ ist das Komplement zu $R(t)$.

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Für nicht reparierbare Systeme ist $R(t)$ eine monoton fallende Funktion. $R(0) \leq 1$, $R(\infty) = 0$

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte f(t)

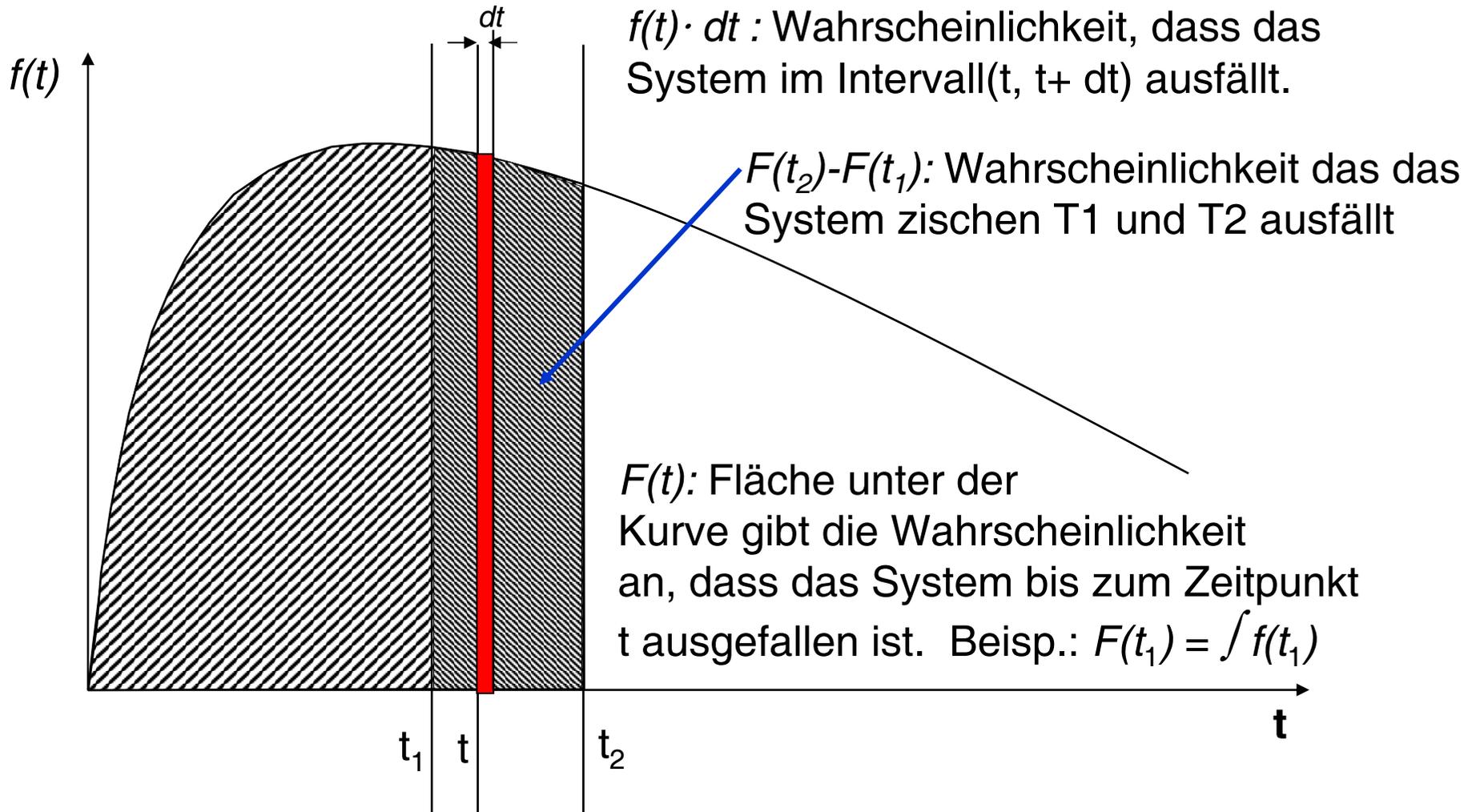
$f(t) \cdot dt$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Ausfall einer Komponente im Zeitintervall $(t, t+dt)$ auftritt.

$f(t)$ ist dann die Wahrscheinlichkeit, mit der in diesem Zeitintervall Ausfälle erwartet werden können.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$$



Lebensdauer-Modellierung

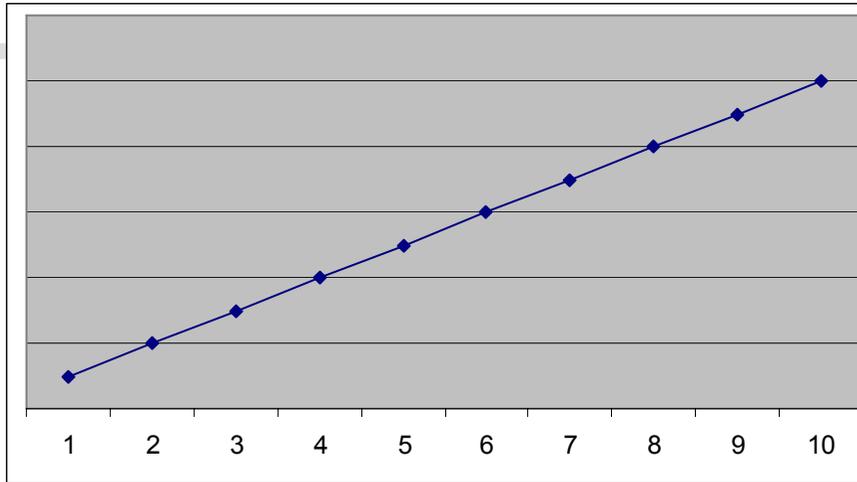


$f(t)$: PDF: Probability Distribution Function

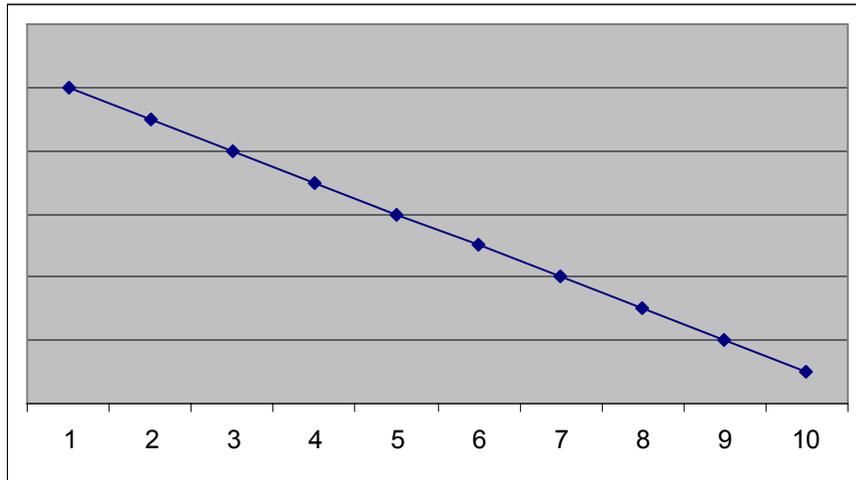
$F(t)$: CDF: Cumulative Distribution Function. Für $t \rightarrow \infty$: $F(t) = 1$

Konstante Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

F(t)

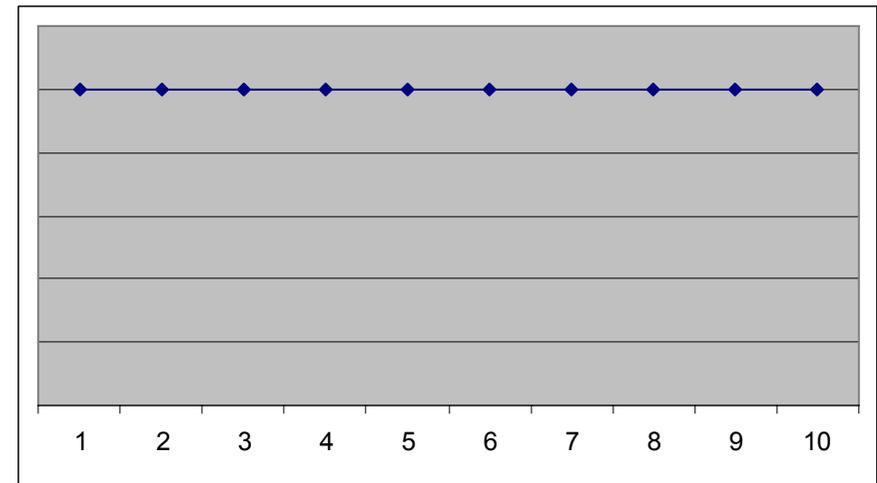


R(t)



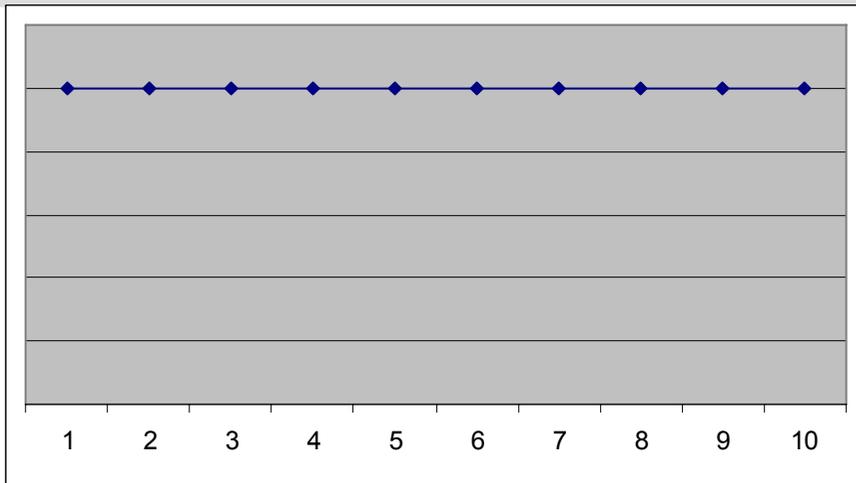
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$$

f(t)

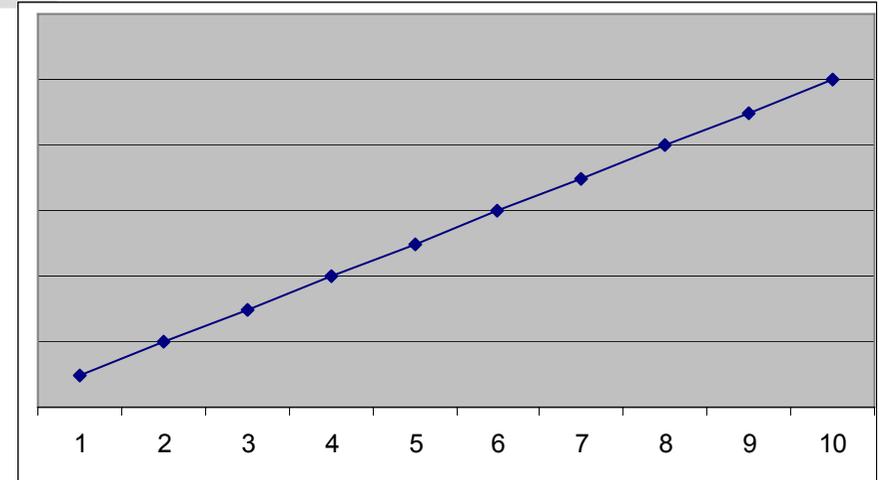


Konstante Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

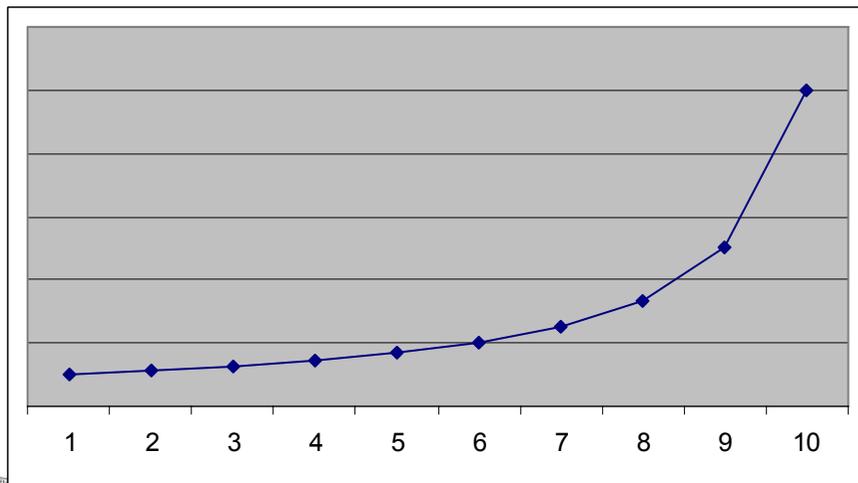
$f(t)$



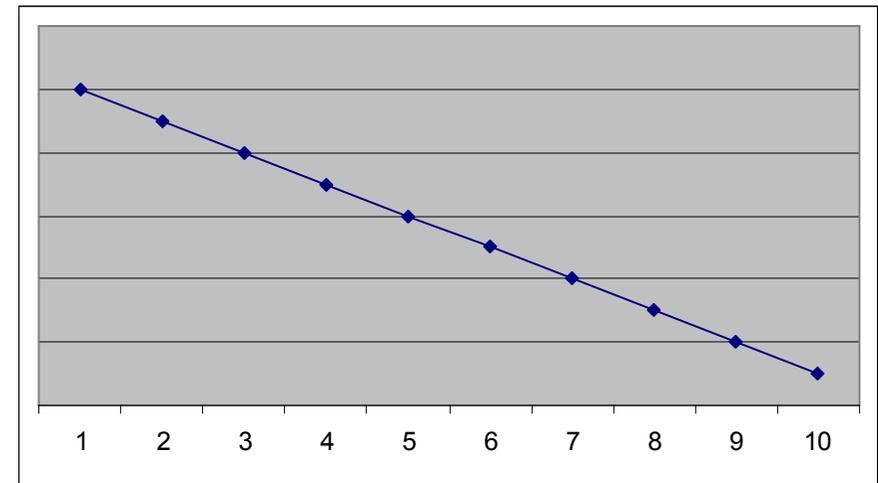
$F(t)$



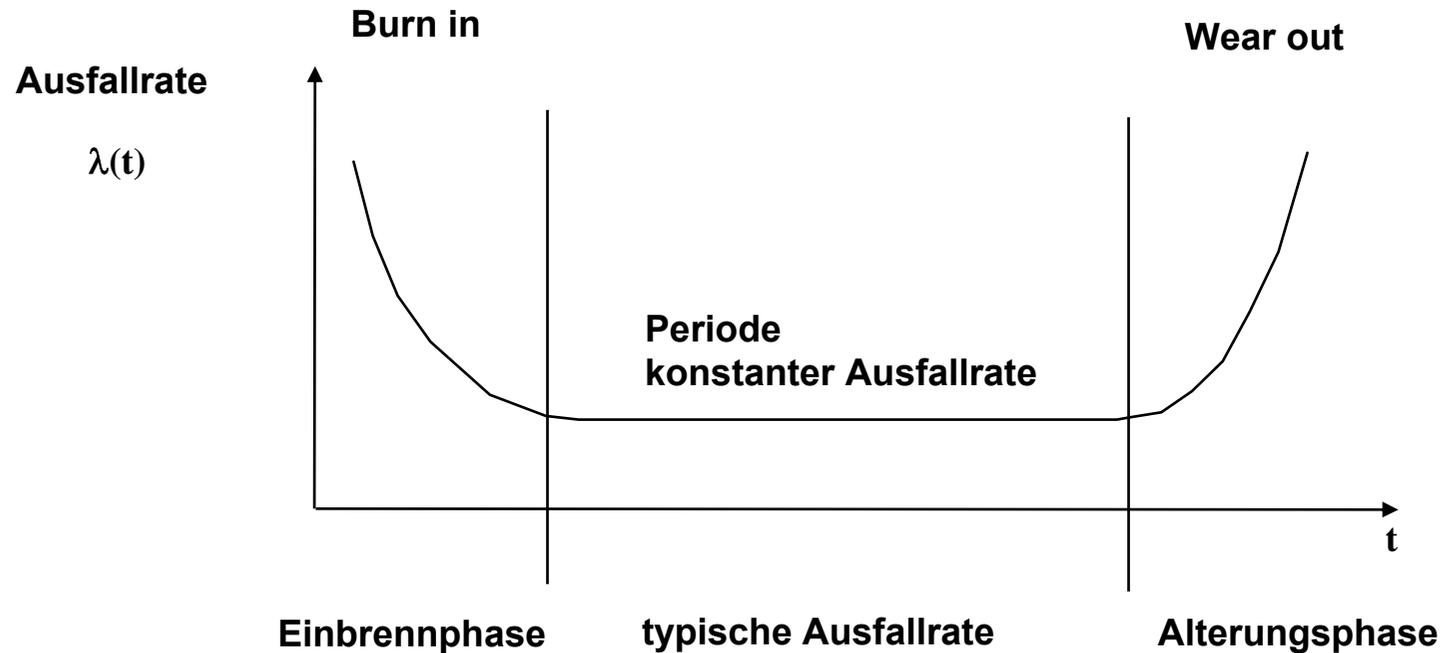
Ausfallrate: λ



$R(t)$



Ausfallrate über die Zeit



Infant
Mortality

Typische Ausfallrate:
VLSI-Chip: 10^{-8} Ausfälle/h = 1 Ausfall in 115000 Jahren



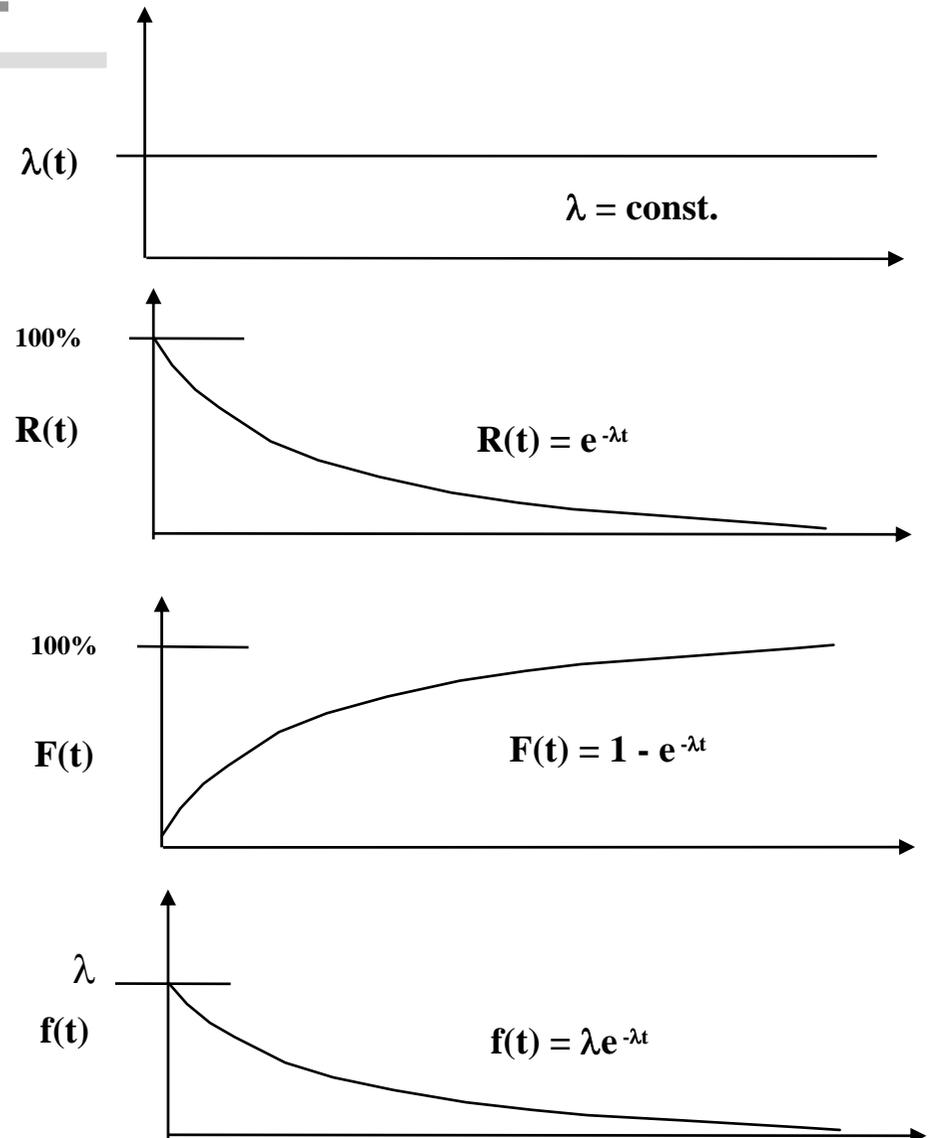
Maße der Fehlertoleranz

Ausfallrate $\lambda(t)$

Anzahl der Ausfälle pro Zeiteinheit

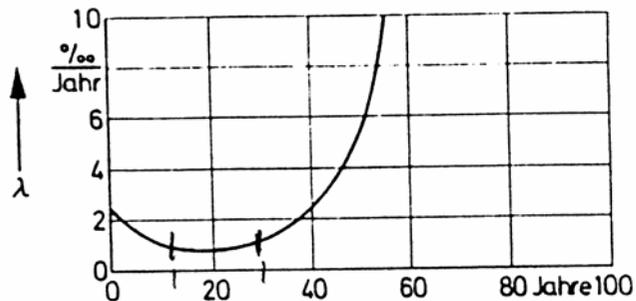
Bemerkung: Die Ausfallrate ist relativ zum Bestand definiert. Fallen pro Zeiteinheit immer gleich viele Komponenten aus, steigt die Ausfallrate relativ zum Bestand an, der ja immer kleiner wird.

Bleibt die Ausfallrate relativ zum Bestand konstant, ergibt sich daraus eine Exponentialverteilung für die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$.

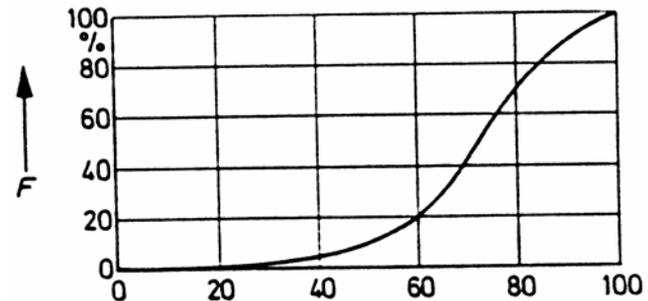


Lebensdauererverteilung beim Menschen

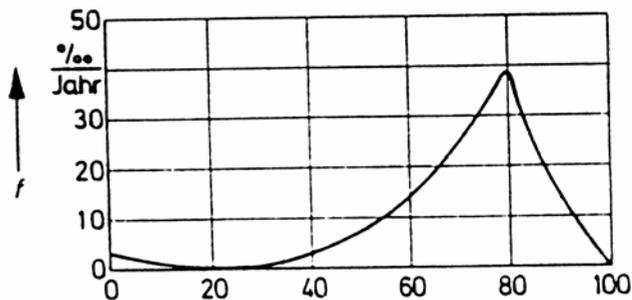
Ausfallrate $\lambda(t)$



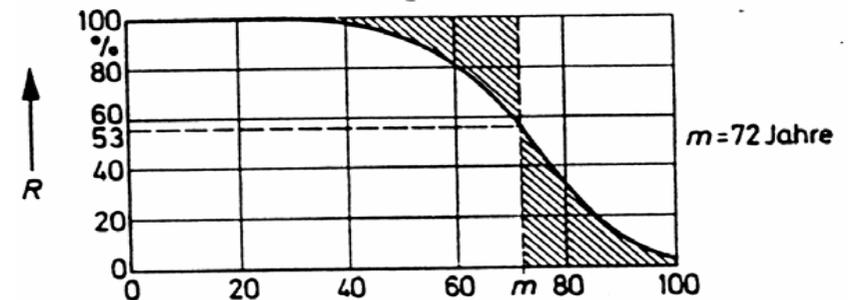
Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$



Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$



Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ (Reliability)



Kenngrößen (Zusammenfassung)

Kenngröße	Symbol	Einheit
Lebensdauer	T	h
Ausfallwahrscheinlichkeit	F	%
Überlebenswahrscheinlichkeit	R	%
Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte	f	%/h
Ausfallrate	λ	1/h

Da die Ausfallrate über die Zeit als konstant angenommen wird, lohnt sich häufiges Testen. Je kürzer das Intervall zwischen den Tests, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass das System in diesem Intervall ausfällt!



Maße der Fehlertoleranz

Unter der Annahme von $\lambda(t) = \text{const.}$ gilt:

$$\frac{1}{\lambda} = \text{MTBF} = \text{MTTFF} = \text{MTTF}$$

MTBF : Mean Time Between Failures

MTTFF: Mean Time To First Failure

MTTF : Mean Time To Failure



Verfügbarkeit (Availability)

Zeit in der ein System intakt ist bezogen auf die gesamte Missionszeit

$$A = \frac{U \text{ (Up time)}}{M \text{ (Mission time)}}$$

$$M = U + TR \text{ (Repair time)}$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$



Maße der Fehlertoleranz

Beispiele:

- **Telefonvermittlungssysteme**
Nichtverfügbarkeit 2h/a bis 3 Min /a

Klasse 5

Aber: in den letzten Jahren waren mehrere große Ausfälle:
1 USA-nationsweiter Fehler: 8h
1 Midwest: 4 Tage

- **Starkstromüberwachung**
Nichtverfügbarkeit typ.: 2h/a

Klasse 4

- **AAS (Advanced Automation System) IBM**
3 sek/a für kritische Dienste (A = 0,9999999)
156 sek/a für weniger kritische Dienste (A = 0,9999950)

Klasse 7++
Klasse 5



Prozeßsicherheit (Betriebssicherheit, Safety)

- ist die Überlebenswahrscheinlichkeit in Beziehung zu kritischen (Funktions-) Ausfällen
- ist die Realisierung eines bestimmten Verhaltens beim Auftreten bestimmter Fehler (Ausschuß Steuerungstechnik VDE/VDI). Grundlage dafür ist eine Sicherheitsvereinbarung, die einen Fehlerkatalog und einen Verhaltenskatalog spezifiziert.
- ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System ein bestimmtes antizipiertes Verhalten zeigt, d.h. wenn es von einem kritischen Funktionsausfall betroffen ist, in einen Zustand überführt werden kann, in dem der kritische Funktionsausfall sich nicht katastrophal auswirken kann.

Der Sicherheitsgrad kann angegeben werden mit:

$$S = 1 - \frac{k}{u+k}$$

S : Sicherheitsgrad

k: Anzahl der kritischen Funktionsausfälle

u: Anzahl der unkritischen Funktionsausfälle

Ein Funktionsausfall ist kritisch, wenn seine Konsequenzen die normalen Installations- und Betriebskosten eines Systems bei weitem (mehrere Größenordnungen) übersteigen.



Maße der Fehlertoleranz

Verfügbarkeit: Einteilung in Systemklassen

$$\text{Klasse: } \lfloor \log_{10} (1/(1-A)) \rfloor$$

1 Jahr = 525600 Minuten = 8760 h

Systemtyp	Nicht-Verfügbarkeit Minuten/Jahr	Verfügbarkeit %	Klasse
Nicht verwaltete Systeme	50 000	~ 90	1
Verwaltete Systeme	5 000	99	2
Gut verwaltete Syst.	500	99,9	3
Fehlertolerante Syst.	50	99,99	4
Hochverfügbare Syst.	5	99,999	5
Sehr hochverf. Syst.	0,5	99,9999	6
Ultra-hochverf. Syst.	0,05	99,99999	7



Organisation der redundanten Komponenten

Arten der Redundanz:

- **Komponentenredundanz**
- **Zeitredundanz**

- **Aktive Redundanz:** Mehrere Komponenten erbringen dieselbe Dienstleistung nebenläufig.

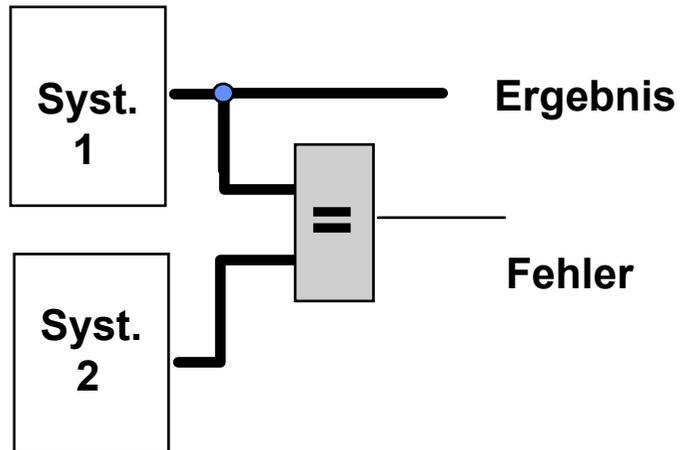
- **Passive Redundanz:** Redundante Komponenten sind nicht an der Erbringung der Dienstleistung beteiligt.

- **Cold Standby:** die redundante(n) Komponente(n) werden erst aktiviert, wenn eine aktive Komponente ausgefallen ist. Der Zustand der Berechnung zum Zeitpunkt des Ausfalls der aktiven Komponente muss auf der redundanten Komponente rekonstruiert werden.

- **Hot Standby:** die redundante(n) Komponente(n) ist aktiv, erzeugt aber keine Ausgaben. Die redundante Komponente enthält beim Ausfall der aktiven Komponente bereits deren Zustand und kann sie sofort ersetzen.

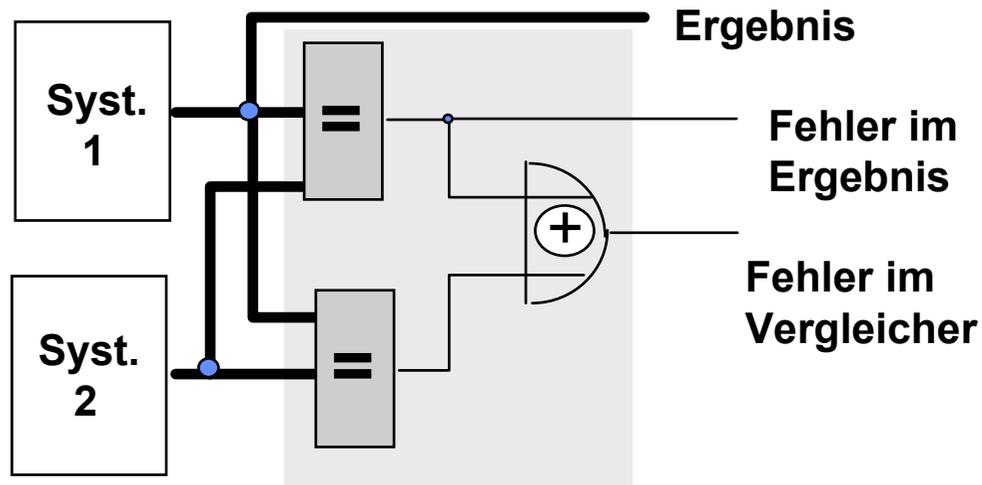


Organisation der redundanten Komponenten



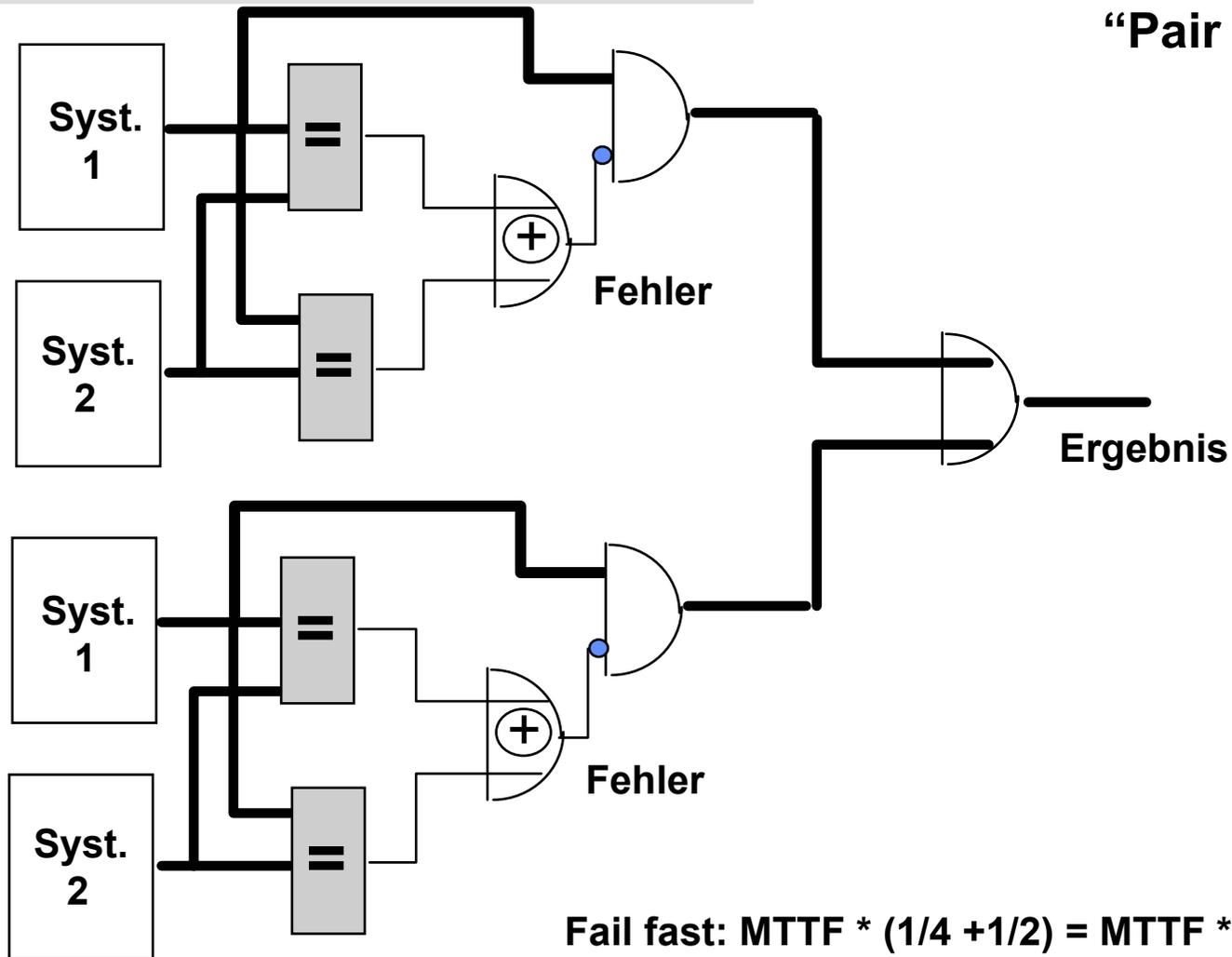
MTTF für ein Modul ist: $1 * \text{MTTF}$
Für ein System mit 2 Moduln gilt dann:
 $\text{MTTF} / 2$.

Fail Fast: $\text{MTTF}/2$
Fail Soft: $\text{MTTF} * (1+1/2) = \text{MTTF} * 3/2$



Organisation der redundanten Komponenten

“Pair and Spare”



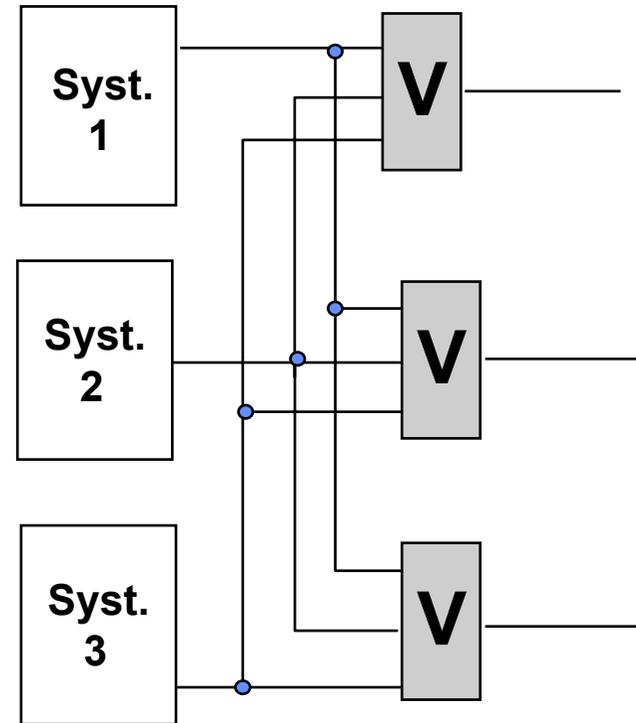
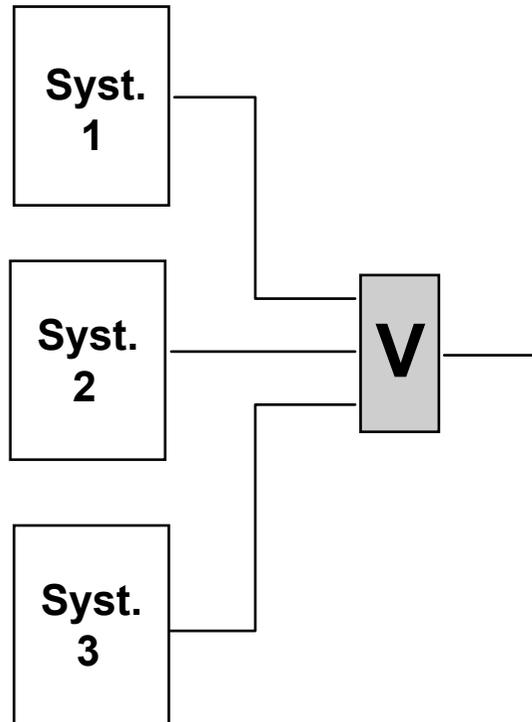
$$\text{Fail fast: } \text{MTTF} * (1/4 + 1/2) = \text{MTTF} * (3/4)$$

$$\text{Fail soft: } \text{MTTF} * ((3/4) + (2/4) + 1) = \text{MTTF} * 2,25$$



Organisation der redundanten Komponenten

Triple Modular Redundancy (TMR)



Fail Fast: $MTTF/3 + MTTF/2 = MTTF (2/6) + MTTF (3/6) = MTTF(5/6)$

Fail Soft: $MTTF (1 + 5/6)$



Organisation der redundanten Komponenten

Annahme: MTTF = 1 Jahr

Organisation	MTTF (Jahre)	Klasse	Gleichung	Kosten
Simplex	1	3	$MTTF * 1$	1
Duplex (FF)	~ 0,5	3	$MTTF/2$	$2 + \epsilon$
Duplex (FS)	~ 1,5	3	$MTTF(3/2)$	$2 + \epsilon$
TMR (FF)	~ 0,8	3	$MTTF(5/6)$	$3 + \epsilon$
TMR (FS)	~ 1,8	3	$MTTF(1+5/6)$	$3 + \epsilon$
Pair&Spare (FF)	~ 0,75	3	$MTTF(3/4)$	$4 + \epsilon$
Pair&Spare (FS)	~ 2,25	3	$MTTF((3/4) + (2/4) + 1)$	$4 + \epsilon$

FF: Fail fast

FS: Fail soft

Quelle: J.Gray

