Grundlagen der technischen Risikoanalytik

Basismethoden der Risikoanalytik (Forts.)

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

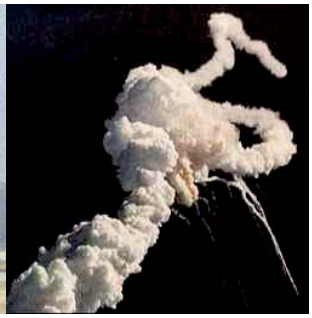
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY

DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Fault Tree Analysis (FTA), Fehlerbaumanalyse

Problematik

Für hochzuverlässige oder „neuartige“ Systeme liegen keine direkt nutzbaren Erfahrungen auf Systemebene vor; wegen der Höhe der Investition und involvierten Gefahren sind (Vorab-) Aussagen zur Ausfallwahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) und zu Risiken nötig.



Lösungsansatz: Zerlegung
Aus den Systemkomponenten, deren Eigenschaften eher bekannt sind, lässt sich über deren funktionelle und logische Verknüpfung das Gesamtsystem modellieren und analysieren.

Ansatz der FTA

Ausgangspunkt ist ein definierter Systemzustand ("top event", z.B. Systemausfall), der weiter "top down" (von oben nach unten) über Zwischenzustände bis zu Basisereignissen (Komponentenausfälle) aufgeschlüsselt wird. Die Fragestellung bzw. Vorgehensweise ist deduktiv.

Ziele

- Systematische Identifizierung möglicher Ausfallkombinationen und dahinterliegender Basisereignisse, die zu einem vorgegebenen "top-event" führen können.
- Zusätzliche Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ausfallkombinationen und des "top-event", nach Zuweisung von Zuverlässigkeitskenngrössen für Basisereignisse (Ausfallwahrscheinlichkeit).

Normen

- Fehlerbaumanalyse, Methode und Bildzeichen, DIN 25 424, Teil 1 (Berlin, Beuth Verlag GmbH: 1981),
- Fehlerbaumanalyse, Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaums, DIN 25 424, Teil 2 (Berlin, Beuth Verlag GmbH: 1990).

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Arbeitsschritte der FTA

qualitativ

1. Festlegen des "top-event" (nicht immer einfach),
2. Identifizierung aller Ereigniskombinationen, die zum "top-event" führen, und zugehöriger Basisereignisse.

qualitativ und quantitativ

3. Ermittlung und Zuweisung von Zuverlässigkeitskenngrössen zu jedem Basisereignis,
4. Systemmodellierung und Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Verzweigungen und des "top-events",
5. Analyse der dominierenden Ereigniskombinationen und –beiträge (Importanzanalyse), Vorschläge zur Systemoptimierung.

zu 1. "top-event"

Festlegung

- Allgemein: Systemausfall, z.B. Ausfall eines sicherheitstechnisch wichtigen Kühlsystems,
- speziell: Ausfall bestimmter Funktionen, die einem Systemausfall gleichkommen, z.B. Bersten eines Gastanks.

zu 2. Ereigniskombinationen

Verknüpfungen bilden die logische Struktur des betrachteten Systems bzw. des daraus abgeleiteten Modells (Fehlerbaum) mit

- Ereigniseingängen: Art der Ereignisse,
- logischen Verknüpfungen: UND, ODER, NICHT,
- Ereignisausgängen: Ereignisfolgen.

Die Regeln der Verknüpfungen sind durch Boolesche Algebra festgelegt.

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Boolean-Modellierung und Wahrscheinlichkeitsberechnung

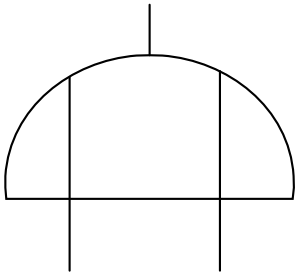
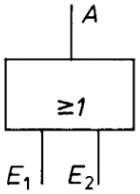
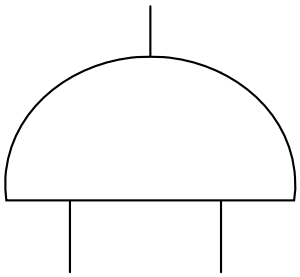
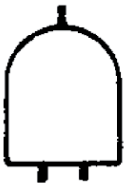
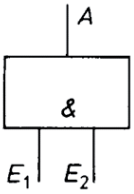
Zusammenfassung der Annahmen/Voraussetzungen :

- Ein technisches System besteht aus Einheiten (Komponenten): S={K1, … Kn}
- Die Einheiten werden sowohl technisch als auch logisch verbunden, Fehler von Komponenten sind stochastisch unabhängig.
- Der Zustand jeder Einheit folgt einer binären Logik (WAHR/FALSCH, Ein/Aus-, intakt / defekt)
- Verfügbare logische Operatoren sind:
  - Konjunktion: UND ($\cap$)
  - Disjunktion: ODER ($\cup$)

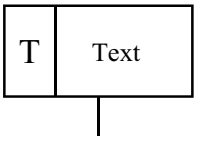
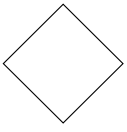
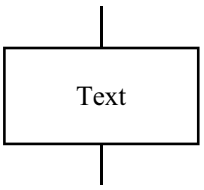
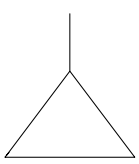
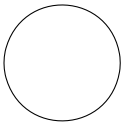
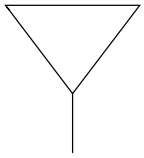
Bezeichnung der Wahrscheinlichkeiten :

- p_i: Wahrscheinlichkeit des Überlebens der i-ten Einheit
- q_i: Wahrscheinlichkeit des Misserfolgs der i-th Einheit

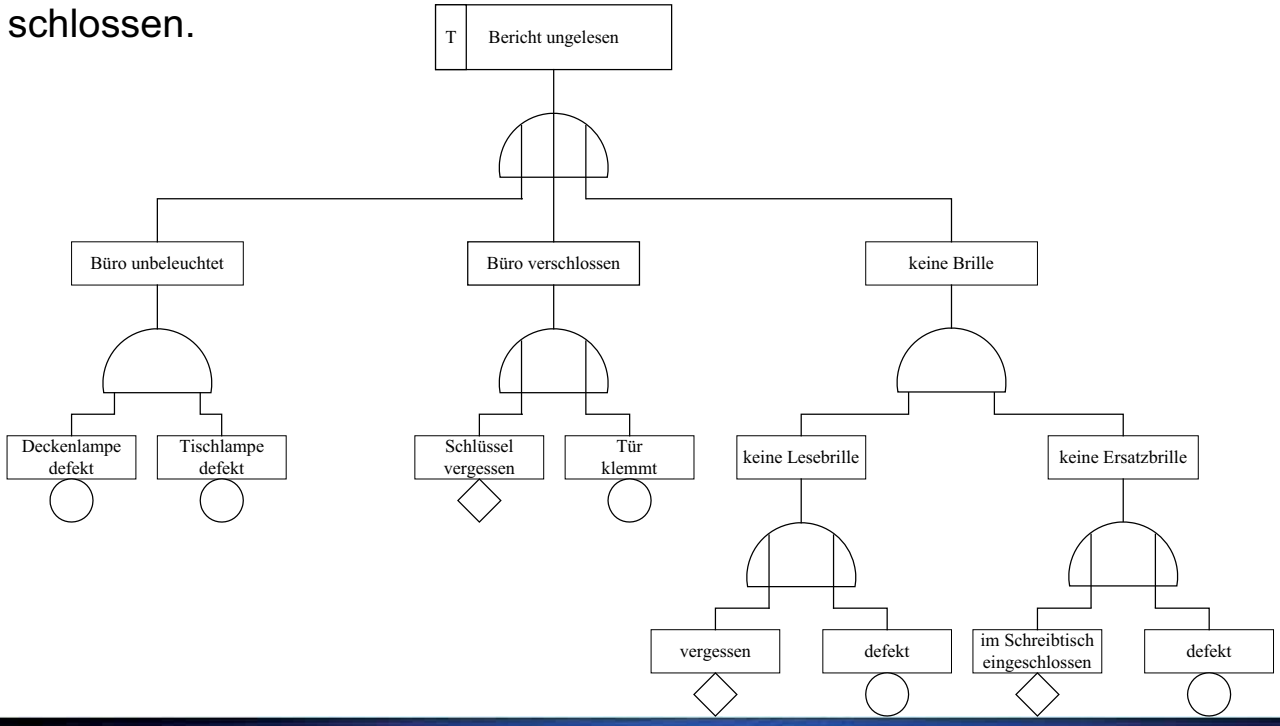
Logische Verknüpfungen

Symbol	Alternative Symbole		Benennung
			**ODER-Verknüpfung** logische Vereinigung einer Menge
			**UND-Verknüpfung** logischer Durchschnitt einer Menge

Zur besseren Handhabung dienen

Symbol	Benennung	Symbol	Benennung
	Bezeichnung des „top event“		nicht weiter entwickeltes Ereignis
	Kommentar, Beschreibung		Transfer zu einem separaten Fehlerbaum
	Basisereignis		Transfer von einem separaten Fehlerbaum

Beispiel:
Herr K. möchte um Mitternacht in seinem Büro einen Bericht lesen.
Er benötigt eine Lesebrille; eine Ersatzbrille ist im Schreibtisch eingeschlossen.



ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Benötigte Informationen für eine FTA

- Verschiedene relevante Ausfallarten der einzelnen Komponenten,
- Komponentenexterne relevante Einflussgrössen, z.B. Instandhaltungsmassnahmen, Umwelteinwirkungen,
- Zuverlässigkeitskenngrössen (Ausfallwahrscheinlichkeiten),
- Definition des zu untersuchenden Betriebszustandes der Anlage und deren Abgrenzung (Systemgrenzen).

zu 3. Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist eine von mehreren Zuverlässigkeitskenngrössen (ZKG). ZKG sind quantitative Merkmale, die das mit Versagen zusammenhängende stochastische Verhalten einer Einheit (Hard-, Software etc.) technischer Systeme unter bekannten Leistungsbedingungen kennzeichnen.

Problematiken

Allgemeiner Datenmangel; besonders ausgeprägt bei Zuverlässigkeitskenngrössen für hochzuverlässige Spezialanfertigungen in der Kernenergie, für Komponenten unter wechselnden Betriebsbedingungen in der Chemie, für abhängige Ausfälle etc.

zu 4. Modellierung technischer Systeme

Zusammenfassung der Annahmen/Voraussetzungen:

- Ein technisches System besteht aus Betrachtungseinheiten BE (Komponenten),
- die BE sind sowohl technisch als auch logisch untereinander verbunden,
- jede BE kann nur zwei Zustände annehmen (binäre Logik).

Zur Verfügung stehende logische Operatoren:

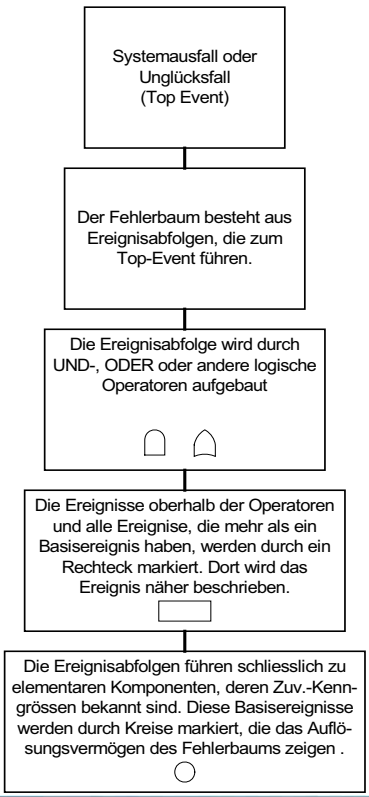
- Konjunktion: UND ($\cap$),
- Disjunktion: ODER ($\cup$).

Bezeichnung der Wahrscheinlichkeiten:

- p_i: Überlebenswahrscheinlichkeit der *i*-ten Einheit,
- q_i: Ausfallwahrscheinlichkeit der *i*-ten Einheit.

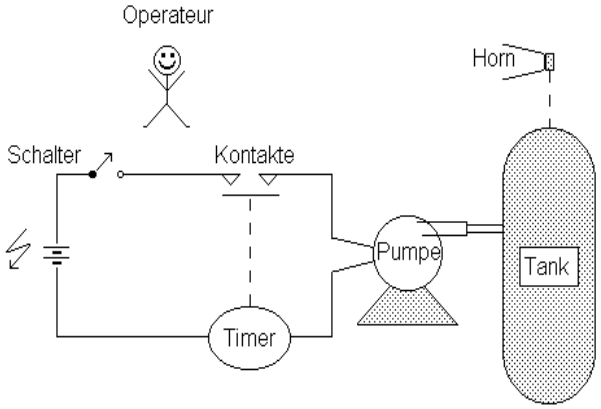
ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Fazit: Elementare Struktur eines Fehlerbaumes

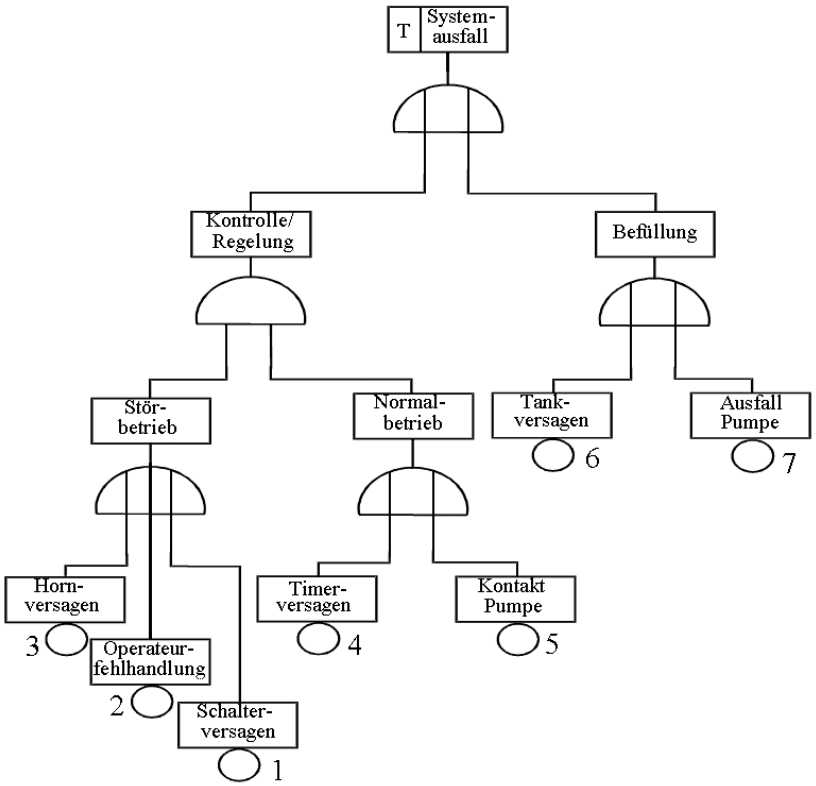


Beispiel: Fehlerbaum für ein „Pumpsystem“

Im Pumpsystem wird der Speicher in 10 Minuten gefüllt und in 50 Minuten entleert; ein vollständiger Zyklus umfasst also 1 Stunde. Nachdem der Schalter geschlossen ist, werden die Kontakte mit Hilfe des Timers nach 10 Minuten geöffnet. Versagt dieser Mechanismus, so ertönt ein Alarmsignal und der Operateur öffnet den Schalter, um ein Tankversagen durch Tanküberfüllung zu vermeiden.



Fehlerbaum des Pumpsystems

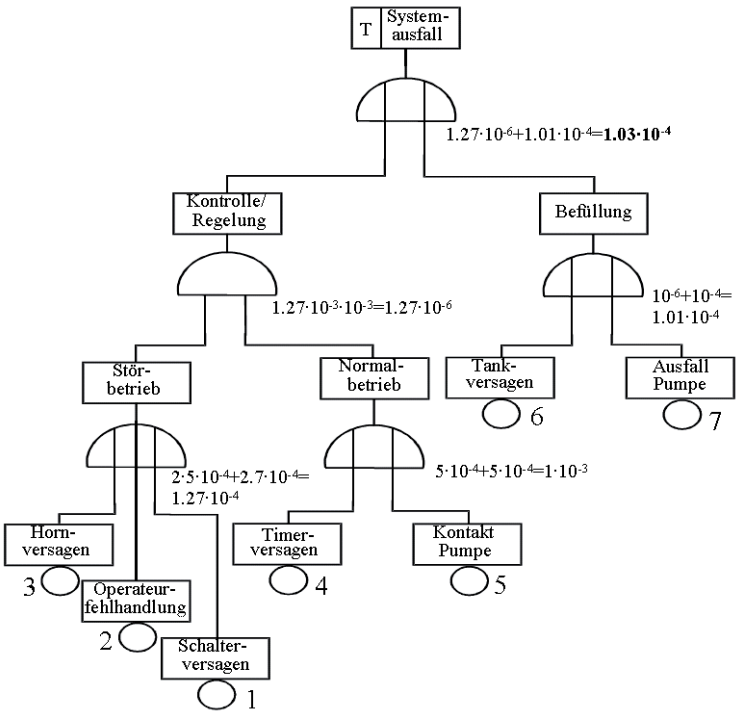


Wahrscheinlichkeiten zur Quantifizierung des Fehlerbaums (Richtwerte)

Einheiten bzw. Funktionselemente in (): Nr. des Basisereignisses im Fehlerbaum	Überlebenswahrscheinlichkeit p_i	Ausfallwahrscheinlichkeit q_i
elektromechanische Teile: Schalter, Timer, Horn, Kontakte	0.9995	$5 \cdot 10^{-4}$
passives Element: Tank	0.999999	10^{-6}
aktives Element: Pumpe	0.9999	10^{-4}
„Funktionselement Mensch“: Operateur	0.99973	$2.7 \cdot 10^{-3}$

- $q_{Operatuer}$: Wahrscheinlichkeit, dass der Operateur auf ein wahrgenommenes Signal gar nicht oder falsch reagiert,
- q_{Pumpe}: Wahrscheinlichkeit, dass die Pumpe trotz geöffnetem Schalter weiterfördert.

Quantitativer Fehlerbaum des „Pumpsystems“



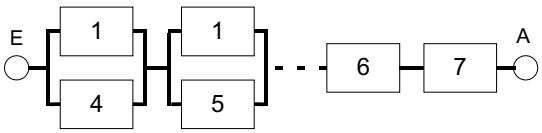
Boolesche Gleichung - Ausfall

$$\bar{y} = [(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3) \wedge (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_5)] \vee (\bar{x}_6 \vee \bar{x}_7)$$

ausmultiplizieren

$$\bar{y} = \bar{x}_1\bar{x}_4 \vee \bar{x}_1\bar{x}_5 \vee \bar{x}_2\bar{x}_4 \vee \bar{x}_2\bar{x}_5 \vee \bar{x}_3\bar{x}_4 \vee \bar{x}_3\bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7$$

Kombination Serien-Parallel- und Seriensystem



Berechnung

$$F_{SP} = 1 - \prod_{i=1}^{6}(1 - q_{1i}q_{2i}) = 1 - \left[(1 - q_1q_4)(1 - q_1q_5)....\text{etc}\right]$$

$$F_s = 1 - \left[(1 - q_6)(1 - q_7)\right]$$

$$F = F_{SP} + F_s = ... = 1.0227 \cdot 10^{-4}$$

Nur für einfache Systeme gelten die Vereinfachungen (jedes Basisereignis kommt im Fehlerbaum nur einmal vor)

$Pr(A \cap B) =$ $Pr(A) \cdot Pr(B)$	$Pr(A \cup B) =$ $Pr(A) + Pr(B) - Pr(A \cap B)$
	für kleine Einzelwahrscheinlichkeiten gilt: $Pr(A \cup B) \approx Pr(A) + Pr(B)$

Exkurs

Für beliebig zufällige Ereignisse A_i (i = 1, 2, ..., n) gilt für $n \geq 3$ nach Poincaré

$$\Pr\left(\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right) = \sum_{i=}^{n} \Pr(A_i) - \sum_{\substack{i_1 i_2 = 1 \\ i_1 < i_2}}^{n} \Pr(A_{i1} \cap A_{i2}) + \sum_{\substack{i_1 i_2, i_3 = 1 \\ i_1 < i_2 < i_3}}^{n} \Pr(A_{i1} \cap A_{i2} \cap A_{i3}) + \ldots + (-1)^{n-1} \Pr(A_1 \cap A_2 \cap \ldots \cap A_n)$$

Für kleine $Pr(A_i)$ gilt näherungsweise

$$\sum_{i=}^{n} \Pr(A_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \Pr(A_i \cap A_j) \leq \Pr\left(\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right) \leq \sum_{i=}^{n} \Pr(A_i)$$

ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik Department of Mechanical & Process Engineering

Vor-/Nachteile FTA

Vorteile	Nachteile
• Gut geeignet zur Modellierung mechanischer, dualer Vorgänge, z.B. Ventil geöffnet oder geschlossen. • Es können Ereignisse betrachtet werden, die durch das Zusammenwirken mehrerer Ausfälle oder Fehler auf Komponentenebene zustande kommen. • Bei ausreichender Datenbasis ist eine Quantifizierung möglich. • Es bestehen breite Einsatzmöglichkeiten, die eine Systemoptimierung einschliessen.	• Zeitabhängige und dynamische Änderungen sind schwer zu modellieren; die Systembeschreibung ist „statisch“. • Komplexe Systeme führen zu „unüberschaubar“ vielen Verzweigungen, weshalb Beschränkung auf das Wesentliche notwendig ist. • Die einzelnen Eintrittswahrschein-lichkeiten sind z.T. schwer zu ermitteln und mit erheblichen (Daten-) Unsicherheiten behaftet.

Berechnung von Fehlerbäumen für grössere Systeme

Problematik

- Oft schwierig, einen kompletten Fehlerbaum zu erstellen und exakt zu berechnen.

Lösungsansatz

- Ermittlung jener Komponenten, die mindestens betriebsfähig sein müssen, damit das Gesamtsystem funktioniert (Positiv-Logik).

oder

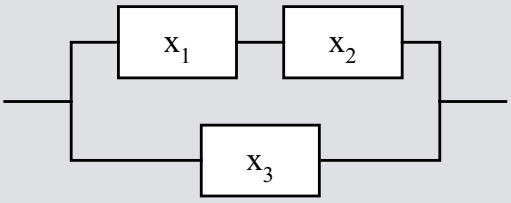
- Ermittlung jener Komponenten, die bei Ausfall das Gesamtsystem ausfallen lassen (Negativ-Logik).

→ Minimalschnitte bzw. Minimalpfade.

Bezeichnung

- Zustand x_i der Komponente *i*:

$$x_i = \begin{cases} 0: \text{Zustand "Ausfall" (kurz}: \overline{x}_i) \\ 1: \text{Zustand „Funktion“ (kurz}: x_i) \end{cases}$$

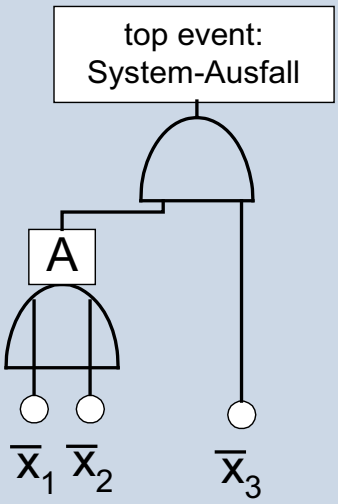
Minimalschnitte (Cut Sets)	Minimalpfade (Path Sets)
Kleinste Menge ausgefallener Einheiten, die im Zuverlässigkeitsblockdiagramm den Weg vom "Eingang" zum "Ausgang" versperrt.	Kleinste Menge (funktionierender) Einheiten, die im Zuverlässigkeitsblockdiagramm einen Weg vom "Eingang" zum "Ausgang" offen hält.
Beispiel 	
Schnitte σ_i: $\sigma_1 = \{\overline{x}_1; \overline{x}_3\}; \sigma_2 = \{\overline{x}_2; \overline{x}_3\}$	Pfade π_j: $\pi_1 = \{x_1; x_2\}; \pi_2 = \{x_3\}$

für jede Schnitt-Menge *i* gilt	für jede Pfadmenge *j* gilt
$\sigma_i = \bigcap_{k=1}^{l} \overline{x}_k$	$\pi_j = \bigcap_{m=1}^{r} x_m$
Systemausfall: Verknüpfung der Schnitte σ_i $\overline{y} = \bigcup_{i=1}^{n} \sigma_i$	**Systemfunktion**: Verknüpfung der Pfade π_j $y = \bigcup_{j=1}^{s} \pi_j$
de-Morgansches Theorem	
$\overline{y} = 1 - \bigcap_{j=1}^{n} (1-\sigma_j) = 1 - \left[(1-\overline{x}_1\overline{x}_3)(1-\overline{x}_2\overline{x}_3)\right]$	$\overline{y} = \bigcap_{j=1}^{s} (1-\pi_j) = (1-x_1x_2)(1-x_3)$
ausmultiplizieren, Idempotenzgesetz: x ∩ x = x; x ∪ x = x	
$\overline{y} = 1 - \left[(1-\overline{x}_1\overline{x}_3)(1-\overline{x}_2\overline{x}_3)\right]$ $= 1 - (1 - \overline{x}_1\overline{x}_3 - \overline{x}_2\overline{x}_3 + \overline{x}_1\overline{x}_3\overline{x}_2\overline{x}_3)$ $= \overline{x}_1\overline{x}_3 + \overline{x}_2\overline{x}_3 - \overline{x}_1\overline{x}_2\overline{x}_3$	$\overline{y} = 1 - x_1x_2 - x_3 + x_1x_2x_3$

Einsetzen der Ausfallwahrscheinlichkeiten $q_i(t)$	Einsetzen der Ausfallwahrscheinlichkeiten $p_i(t)$
…	zum Vergleich mit Minimalschnitt $\overline{y} = 1 - (1-\overline{x}_1)(1-\overline{x}_2) - (1-\overline{x}_3) + (1-\overline{x}_1)(1-\overline{x}_2)(1-\overline{x}_3)$ =...ausmultiplizieren... $= \overline{x}_1\overline{x}_3 + \overline{x}_2\overline{x}_3 - \overline{x}_1\overline{x}_2\overline{x}_3$
System-Ausfallwahrscheinlichkeit	
$F = q_1q_3 + q_2q_3 - q_1q_2q_3$	$F = q_1q_3 + q_2q_3 - q_1q_2q_3$

Zusammenhang zwischen Fehlerbaum und Minimalschnitten

Ermittlung von Minimalschnitten aus einem Fehlerbaum.

Fehlerbaum	Algorithmus
	Beginnend beim „top event“ werden die Eingänge des ODER-Gatters zeilenweise, bei einem UND-Gatter spaltenweise aufgelistet. Beim Ersetzen eines ODER-Gatters gibt es für jeden neuen Eingang eine neue Zeile, wobei die restliche Zeile erhalten bleibt. Beachte innerhalb einer • Zeile: Idempotenzgesetz, • Spalte: Absorptionsgesetz $Z_1 \square (Z_1 \cdot Z_2) = Z_1$, Beispiel 1. Schritt (eine Zeile) $\{A, \overline{x}_3\}$ 2. Schritt: ersetze ODER-Gatter A, füge eine Zeile hinzu $\{\overline{x}_1; \overline{x}_3\}$ $\{\overline{x}_2; \overline{x}_3\}$ q.e.d.

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Ereignisablaufanalyse (ETA)

(„event tree analysis“, Störfallablaufanalyse, incident sequence analysis).

Norm

Ereignisablaufanalyse, Verfahren, graphische Symbole und Auswertung, DIN 25 419 (Berlin, Beuth Verlag GmbH: 1985).

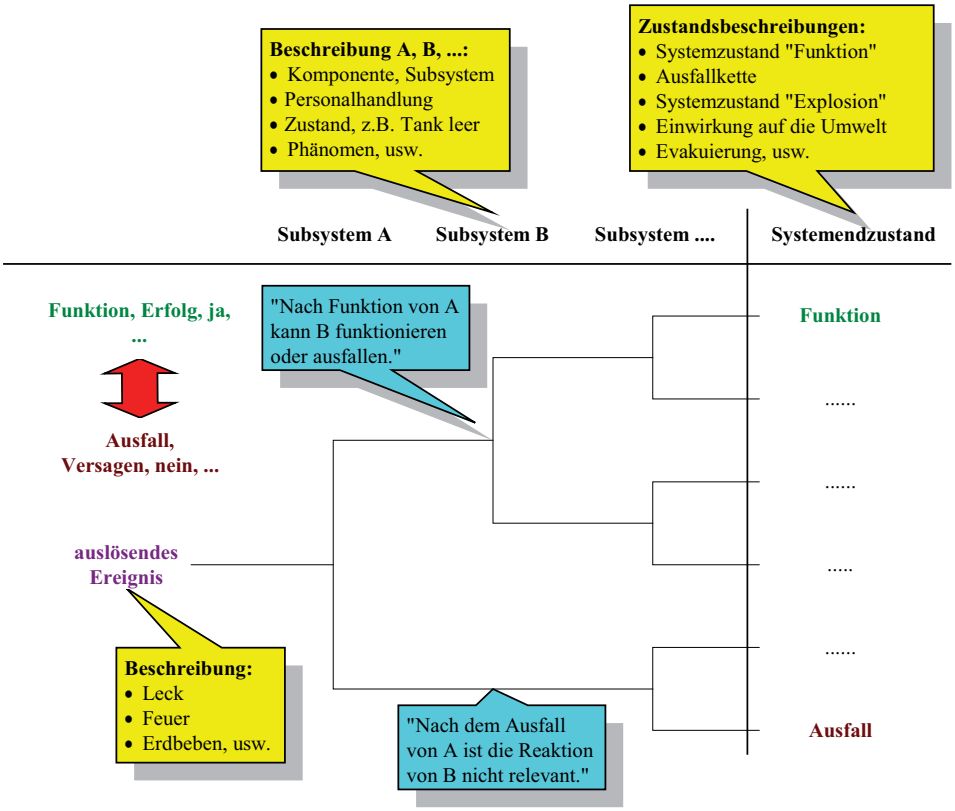
Ziele einer Ereignisablaufanalyse (induktiv)

Erfassen der Ereignisabläufe in einem (grösserem) System, die nach einem auslösenden Ereignis durch die Reaktion nachfolgender (sicherheitstechnischer) Subsysteme entstehen können:

- Graphische Darstellung des logischen und physikalischen Ineinandergreifens aufeinanderfolgender Ereignisse in einem System,
- Ermittlung von Systemendzuständen, die aus einer bestimmten Ursache folgen,
- Berechnung der Eintrittshäufigkeiten resultierender Systemendzustände.

Merke: ETA ist auch auf menschliche Handlungen, physikalische / chemische Ereignisse und andere Ereignisse mit binärem Charakter anwendbar.

Prinzipieller Aufbau eines Ereignisbaumes

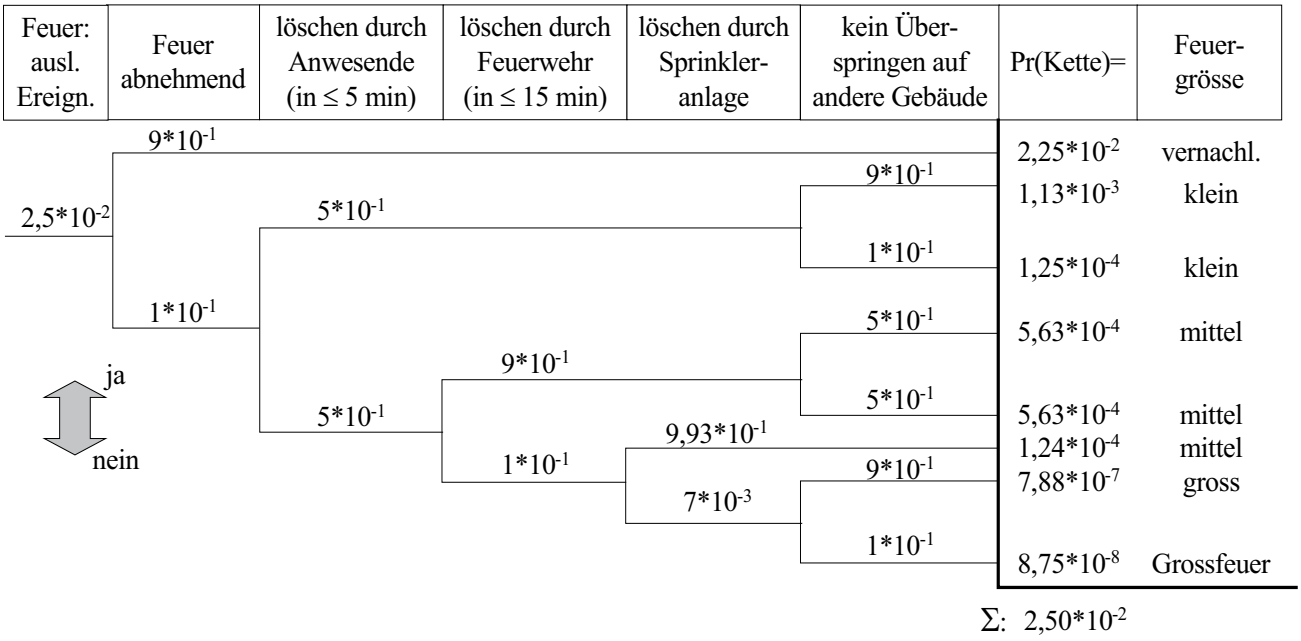


ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Laboratory for Safety Analysis
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY
DMAVT
Departement Maschinenbau & Verfahrenstechnik
Department of Mechanical & Process Engineering

Arbeitsschritte einer quantitativen Ereignisablaufanalyse

1. Auflisten aller **auslösenden Ereignisse**,
2. **Identifizierung** der direkten (funktionellen) Systemantworten, die jeweils durch die Funktion oder Nichtfunktion eines Subsystems bzw. Eintreten oder Nichteintreten von Ereignissen entstehen,
3. **Zusammenfügen** der auslösende Ereignisse mit allen Systemantworten,
4. **Bestimmung von Ereignisketten:** Jede Systemantwort hat eine zugehörige Verzweigung, die Erfolg oder Misserfolg anzeigt. Am Ende jeder Kette steht eine Beschreibung der erwarteten Auswirkungen auf das System,
5. Zuweisung von **Eintrittshäufigkeit [a^{-1}]** für das **auslösende Ereignis** und **„bedingten“ Wahrscheinlichkeiten** für Funktion/Ausfall,
6. Berechnung der **Eintrittshäufigkeit der Endzustände** des Gesamtsystems.

Beispiel 1: Brandrisiko und Brandschutzmassnahmen



Berechnungen mit einem Ereignisbaum

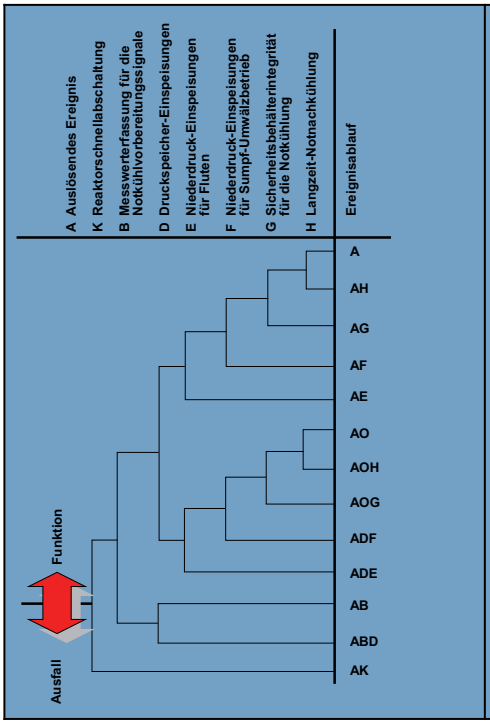
- Die Summe über alle n "Kettenwahrscheinlichkeiten"[1)] ergibt die Wahrscheinlichkeit des auslösenden Ereignisses.
- Die Eintrittswahrscheinlichkeit am Ende einer Kette *A* mit *n* nachfolgenden Subsystemen berechnet sich aus:

$$Pr(Kette) = Pr(Subsystem) \bullet \prod_{i=1}^{n} Pr(Subsystem)$$

- Im Beispiel beträgt die Wahrscheinlichkeit eines Grossfeuers:
- Pr(Feuergrösse = Grossfeuer) = $2.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 8.75 \cdot 10^{-8}$.
- Die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ausmasses ist die Summe der Ketten mit demselben Endergebnis, z. B.:
- Pr(Feuergrösse = klein) = $1.13 \cdot 10^{-3} + 1.25 \cdot 10^{-4} = 1.26 \cdot 10^{-3}$.

[1)] meist Häufigkeiten [a^{-1}]

Beispiel 2: "Grosses Leck in der Hauptkühlmittelleitung" eines KKW



Vollständige Funktion

$$Pr = Pr_A \cdot (1-q_K) \cdot (1-q_B) \cdot (1-q_D) \cdot (1-q_E) \cdot (1-q_F) \cdot (1-q_G) \cdot (1-q_H)$$

q_i: bedingte Versagenswahrscheinlichkeit des Subsystems i,
Pr_A: Eintrittswahrscheinlichkeit des auslösenden Ereignisses,
Pr: Eintrittswahrscheinlichkeit des "Gesamtpfades".

Bemerkungen zur Ereignisablaufanalyse

- Besonders geeignet für grössere Anlagen mit aktiven und passiven Sicherheitseinrichtungen sowie ungewissen physikalisch-chemischen Zuständen
- **Praktische Erfahrungen** und vorausgehende Systemuntersuchungen erforderlich
- Methode für **alle Arten (technischer) Systeme** geeignet
- (Auch) umfassende Ereignisbäume bieten keine Garantie hinsichtlich Fehlerfreiheit und Vollständigkeit.

→ Sorgfältiger Review der Ergebnisse Teil einer vollständigen Analyse.

Zusammenfassung Ereignisbaum- und Fehlerbaumanalyse

Fehlerbaumanalyse

- Deduktive Logik („Abwärtslogik“)
- Statische Betrachtungsweise
- Eine einzelne Kette von Ereignissen vom "top-event" zu einem Basisereignis hat keine offensichtliche technische Bedeutung (nur Subfehlerbäume)

Ereignisbaumanalyse

- Induktive Logik („Vorwärtslogik“)
- Berücksichtigung dynamischer Prozesse begrenzt möglich
- Jedes Ereignis auf der Kette vom auslösenden Ereignis bis zum Systemendzustand hat eine systemtechnische Bedeutung

Kombination von Ereignisbäumen und Fehlerbäumen