

Fehlerbaumanalyse

Ralf Mock, 2. November 2015

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Die Teilnehmenden können

- ▶ einen qualitativen Fehlerbaum erstellen
- ▶ die Grundlagen der Booleschen Systemanalyse skizzieren
- ▶ einen quantitativen Fehlerbaum erstellen und berechnen
- ▶ einfache Fehlerbaumanalysen konzipieren und die Ergebnisse einschätzen.

Lernziele

Fehlerbaum

Problematisik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

andere Bezeichnungen:Fault Tree Analysis, FTA

Problematik

- ▶ In komplexen Systemen lassen sich (Fehler-)Ursachen, die zu unerwünschten Ereignissen (Ausfälle) führen können, nicht über „Brainstorming“ erkennen.
- ▶ Für hochzuverlässige oder „einzigartige“ Systeme (z.B. Prototypen) gibt es kaum Zuverlässigkeits- oder andere statistischen Daten (Analyse als „black box“ nicht möglich).

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Top-event

- ▶ **Allgemein:** Systemausfall
- ▶ **speziell:** Ausfall bestimmter Funktionen, die einem Systemausfall gleichkommen, z.B. Bersten eines Gas-tanks.

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.

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

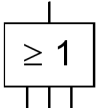
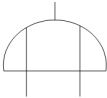
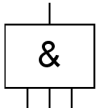
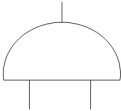
quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Symbole für die logischen Verknüpfungen

Symbol (dt. Sprachraum)	Symbol (angelsäch. Sprachraum)	Benennung
 DIN 25 424		ODER-Verknüpfung logische Vereinigung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mengenalgebra: $a \cup b$ ▪ Logik: $a \vee b$
 DIN 25 424		UND-Verknüpfung logischer Durchschnitt <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mengenalgebra: $a \cap b$ ▪ Logik: $a \wedge b$

Literatur: [1, 4, 5]

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

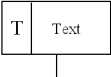

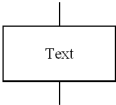



quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Symbole zur Beschriftung

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

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Wahrheitsbedingungen

- ▶ UND: Ein Ereignis ist wahr, wenn alle Eingangsereignisse wahr sind (zutreffen)
- ▶ ODER: Ein Ereignis ist wahr, wenn mindestens eines der Eingangsereignisse wahr ist (zutrifft)

Boolesche Logik im Fehlerbaum

Ein Fehlerbaum

- ▶ ist die grafische Darstellung einer Booleschen Gleichung
- ▶ zeigt nur Ausfälle (Fehler)
- ▶ zeigt *keine* Ereignisreihenfolge
- ▶ ist zeitlos
- ▶ wird quantitativ, indem jedem Basisereignis eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugeordnet wird
- ▶ kann nur über die Boolesche Algebra korrekt berechnet werden!

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Theorie und Berechnung eines Fehlerbaumes

- ▶ **Gesucht:**
Vorgehensweise, um mit einem Fehlerbaum die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems zu berechnen.
- ▶ **Einsetzen:**
Ausfallwahrscheinlichkeiten der Basisereignisse
- ▶ **Problem**
 - Die Booleschen UND- und ODER-Operatoren lassen sich nicht direkt durch die Multiplikations- und Additionsoperatoren \cdot und $+$ ersetzen.
 - Eine Boolesche Funktion muss (oft) erst in eine Form überführt werden, die dieses Ersetzen erlaubt.

Fehlerbaumanalyse

Lernziele

Fehlerbaum

Problematisierung
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Boolesche Logik Boolesche Variable

$$X = \begin{cases} L & : \text{Zustand erfüllt} \\ O & : \text{Zustand nicht erfüllt} \end{cases}$$

Boolesche Operatoren

- UND: \wedge , \cap (Anm.: Wird in Funktionen oft weggelassen, z.B. $X \wedge Y \equiv XY$)
- ODER: \vee , \cup

Boolesche Axiome (Schaltalgebra)

symbolisch	Beschreibung	symbolisch	Beschreibung
$X \wedge Y = Y \wedge X$ $X \vee Y = Y \vee X$	kommutative Gesetze	$\overline{\overline{X}} = X$ $\overline{O} = 1; \overline{1} = 0$	Verneinungsgesetze
$X \wedge Y \wedge Z = (X \wedge Y) \wedge Z$ $X \vee Y \vee Z = (X \vee Y) \vee Z$	assoziative Gesetze	$(\overline{X \wedge Y}) = \overline{X} \vee \overline{Y}$ $(\overline{X \vee Y}) = \overline{X} \wedge \overline{Y}$	de-Morgansches Gesetz
$X \wedge (Y \vee Z) = (X \wedge Y) \vee (X \wedge Z)$ $X \vee (Y \wedge Z) = (X \vee Y) \wedge (X \vee Z)$	distributive Gesetze	$O \wedge X = O$ $L \vee X = L$	Extremalgesetze
$X \wedge X = X$ $X \vee X = X$	Idempotenzgesetze	$L \wedge X = X$ $O \vee X = X$	Neutralitätsgesetze
$X \wedge (X \vee Y) = X$ $X \vee (X \wedge Y) = X$	Absorptionsgesetze	$X \vee (\overline{X} \wedge Y) = X \vee Y$ $X \wedge (\overline{X} \vee Y) = X \wedge Y$	
$X \wedge \overline{X} = O$ $X \vee \overline{X} = L$	Komplementärgesetze		

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Vorgehensweise: Kanonische Darstellung einer Booleschen Funktion

- ▶ **Problem 1:** Vom Zustand $X = x_i$ zur Wahrscheinlichkeit $Pr(X = x_i)$
- ▶ **Problem 2:** ODER-Verknüpfung:
 $Pr(A \cup B) = Pr(A) + Pr(B) - Pr(A \cap B)$
und damit gilt
 $Pr(A \cup B) \neq Pr(A) + Pr(B)$
- ▶ **Ansatz:** gegebene Boolesche Funktion \Rightarrow Erweiterung in Normalform \Rightarrow lineare Systemfunktion
- ▶ **Vorgehensweise:** Erweiterung einer Booleschen Funktion mit ODER-Verknüpfung, dass eine Summe von sog. Mintermen entsteht.

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Kanonische Darstellung Boolescher Funktionen

► Disjunktive Normalform (DN)

$$K_0 \vee K_1 \vee \dots \vee K_{n-1} = \bigvee_{i=0}^{n-1} K_i$$

K_i : Konjunktionsterm, z.B. $x \wedge y$ aus einfachen oder negierten Booleschen Variablen

Beispiel 1: Exklusiv-ODER

$$f(x_0, x_1) = (x_0 \wedge \bar{x}_1) \vee (\bar{x}_0 \wedge x_1)$$

► Ausgezeichnete DN (ADN): in jedem K_i kommt jede Variable genau einmal vor (einfach oder negiert). Eine solche Konjunktion wird Minterm MI genannt.

Beispiel 2: Erweiterung mit „1“: $X \vee \bar{X} = L$

$$\begin{aligned} x_0 \vee \bar{x}_1 &= x_0(x_1 \vee \bar{x}_1) \vee \bar{x}_1(x_0 \vee \bar{x}_0) \\ &= x_0x_1 \vee x_0\bar{x}_1 \vee x_0\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0\bar{x}_1 \mid \text{Idempotenzgesetz} \\ &= x_0x_1 \vee x_0\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0\bar{x}_1 \end{aligned}$$

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Vertiefung des Beispiels $x_0 \vee \bar{x}_1$

- ▶ Überführung der Booleschen Gleichung in die ADN
$$x_0 \vee \bar{x}_1 = x_0 x_1 \vee x_0 \bar{x}_1 \vee \bar{x}_0 \bar{x}_1$$
- ▶ Die ADN enthält drei Minterme MI
$$MI_1 = x_0 x_1; \quad MI_2 = x_0 \bar{x}_1; \quad MI_3 = \bar{x}_0 \bar{x}_1$$
- ▶ „Summenproblem“ ist gelöst, denn die paarweise Verknüpfung von Mintermen ergibt null, d.h.

$$MI_1 \wedge MI_2 = x_0 x_0 x_1 \bar{x}_1 = 0$$

$$MI_1 \wedge MI_3 = x_0 \bar{x}_0 x_1 \bar{x}_1 = 0$$

$$MI_2 \wedge MI_3 = x_0 \bar{x}_0 \bar{x}_1 \bar{x}_1 = 0$$

$$\Rightarrow x_0 \vee \bar{x}_1 = x_0 x_1 + x_0 \bar{x}_1 + \bar{x}_0 \bar{x}_1$$

Quelle: [6]

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Verfahren der Quantifizierung

Es gibt viele Verfahren, um den Umgang mit Booleschen Systemfunktionen zu vereinfachen. Beispiele sind:

- ▶ Fehlerbäume
- ▶ Zuverlässigkeitsblockdiagramme ZBD
- ▶ Minimalschnitte und -pfade
- ▶ Funktionstabellen

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

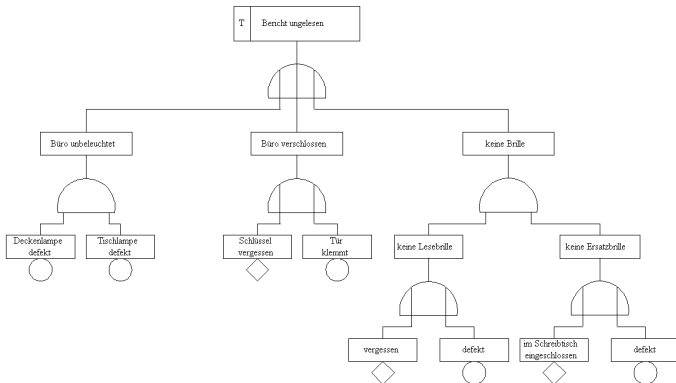
Algorithmus

Tools

Literatur

Einfaches qualitatives Beispiel

Dr. M. möchte um Mitternacht in seinem Büro einen Bericht lesen. Er benötigt eine Lesebrille; eine Ersatzbrille ist im Schreibtisch eingeschlossen.



Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Einführung über das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD)

- ▶ Ein ZBD zeigt das *Funktionieren* eines Systems
- ▶ Es ist, wie der Fehlerbaum, eine grafische Darstellung einer Booleschen Gleichung
- ▶ Es besteht aus Modulen (Teilsystemen)
 - **Seriensystem:** Das Teilsystem funktioniert, wenn alle Elemente funktionieren (\equiv fällt aus, wenn eines der Elemente ausfällt)
 - **Parallelsystem:** Das Teilsystem funktioniert, wenn eins der Elemente funktioniert \equiv fällt aus, wenn alle Elemente ausfallen)
- ▶ Ein ZBD hat einen Eingang E und einen Ausgang A

Literatur: [3]

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

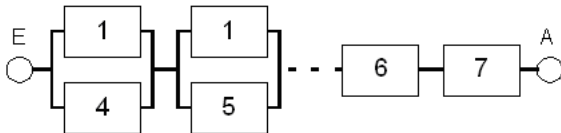
quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Beispiel eines ZBD



Das System funktioniert, wenn Komponenten (1 ODER 4) funktionieren UND (1 ODER 5) UND ...(6 UND 7)

Anmerkung

- ▶ Im ZBD darf dieselbe Komponente (Element) mehrfach vorkommen
- ▶ ...: irgendwelche anderen Komponenten (hier nicht aufgeführt)

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

mathematische Notation

- ▶ bisher:

$$X_i = \begin{cases} 1 & : \text{Komponente } i \text{ funktioniert} \\ 0 & : \text{Komponente } i \text{ funktioniert nicht (Ausfall)} \end{cases}$$

- ▶ neu Kurzform: $(X_i = 1) = x_i$; $(X_i = 0) = \bar{x}_i$, d.h.

$$X_i = \begin{cases} 1 & : \text{Komponente } i \text{ funktioniert} \equiv x_i \\ 0 & : \text{Komponente } i \text{ funktioniert nicht} \equiv \bar{x}_i \end{cases}$$

- ▶ Überlebenswahrscheinlichkeit: $P(X_i = 1) = P(x_i) = p_i$
 - ▶ Ausfallwahrscheinlichkeit: $P(X_i = 0) = P(\bar{x}_i) = q_i$
- ⇒ $p_i + q_i = 1$ bzw. $p_i = 1 - q_i$

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Vergleich: Serien- und Parallelsystem mit 2 Komponenten

Seriensystem

- Überleben: $X_S = x_1 \wedge x_2$
- Ausfall: $\bar{X}_S = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$
- System-Überlebenswahrsch.:

$$\begin{aligned}R_S &= P(X_S) = P(x_1 \wedge x_2) \\&= p_1 \cdot p_2 \\&= (1 - q_1) \cdot (1 - q_2) \\&= 1 - q_1 - q_2 + q_1 \cdot q_2\end{aligned}$$

- System-Ausfallwahrsch.:

$$\begin{aligned}F_S &= P(\bar{X}_S) = P(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) \\&= P(\bar{x}_1) + P(\bar{x}_2) - P(\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2) \\&= q_1 + q_2 - q_1 \cdot q_2 \\&\equiv 1 - p_1 \cdot p_2 = 1 - R_S\end{aligned}$$

Parallelsystem

- Überleben: $X_P = x_1 \vee x_2$
- Ausfall: $\bar{X}_P = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2$
- System-Ausfallwahrsch.:

$$\begin{aligned}F_P &= P(\bar{X}_P) = P(\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2) \\&= q_1 \cdot q_2 \\&= (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \\&= 1 - p_1 - p_2 + p_1 \cdot p_2\end{aligned}$$

- System-Überlebenswahrsch.:

$$\begin{aligned}R_P &= P(X_P) = P(x_1 \vee x_2) \\&= P(x_1) + P(x_2) - P(x_1 \wedge x_2) \\&= p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2 \\&\equiv 1 - q_1 \cdot q_2 = 1 - F_P\end{aligned}$$

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Fazit: von Boolescher Funktion zu linearer Arithmetik

- ▶ Die Zustände in einer Booleschen Funktion (und damit in einem Fehlerbaum!) lassen sich nicht 1:1 durch Wahrscheinlichkeiten ersetzen.
- ▶ Der Übergang gelingt durch die konsequente Anwendung der Booleschen Algebra. Die Vorgehensweise ist formal richtig, aber umständlich
- ▶ **Gesucht:** Praxisnahe Näherungen und Vereinfachungen

Literatur: [2]

Fehlerbaumanalyse

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Vereinfachungen

Kommt jedes Basisereignis im Fehlerbaum nur einmal vor, dann – und nur dann – lassen sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Basisereignisse direkt einsetzen.

UND

2 Einheiten $A_i; i = 1, 2$

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2)$$

ODER

2 Einheiten $A_i; i = 1, 2$

$$\begin{aligned} P(A_1 \vee A_2) &= P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 \wedge A_2) \\ &\approx P(A_1) + P(A_2); \text{ falls } \approx P(A_i) \leq 10^{-2} \end{aligned}$$

n Einheiten $A_i; i = 1, 2, \dots, n$

$$P\left(\bigwedge_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i)$$

für $n \geq 3$ Einheiten $A_i; i = 1, 2, \dots, n$, gilt nach Poincaré

$$\begin{aligned} P\left(\bigvee_{i=1}^n A_i\right) &= \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{\substack{i_1, i_2 \\ i_1 < i_2}}^n P(A_{i_1} \wedge A_{i_2}) \\ &\quad + \sum_{\substack{i_1, i_2, i_3 \\ i_1 < i_2 < i_3}}^n P(A_{i_1} \wedge A_{i_2} \wedge A_{i_3}) + \dots \\ &\quad + (-1)^{n-1} \cdot P(A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n) \end{aligned}$$

Lernziele

Fehlerbaum

Problematisierung
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Beispiel: Fehlerbaum Virenangriff auf PCD

Ein Internet-PC enthält wichtige Daten. Ein Ausfall, z.B. durch einen Virus, hat schwerwiegende Folgen für den Betrieb. Zur Kontrolle und Behebung einer Störung stehen ein SysAdmin sowie ein Pikett-Dienst zur Verfügung.

- ▶ Der folgende Fehlerbaum gibt im Ansatz einen Fehlerbaum wieder.
- ▶ Die verwendeten Ausfallwahrscheinlichkeiten sind fiktiv.

Fehlerbaumanalyse

Lernziele

Fehlerbaum

Problematic

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

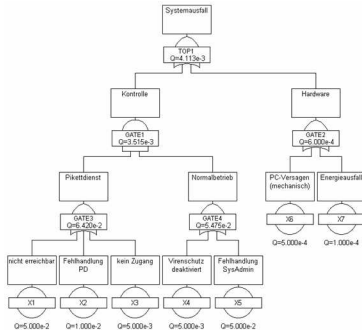
quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Beispiel: Fehlerbaum Virenangriff auf PC



Vereinfacht nach $Pr(A \cup B) \approx Pr(A) + Pr(B)$:

Ergebnis: $F = 4.175 \cdot 10^{-3}$

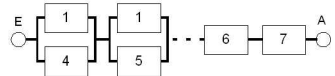
Boolesche Gleichung

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

ausmultiplizieren

$$\bar{Y} = \bar{X}_1 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_1 \bar{X}_5 \vee \bar{X}_2 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_2 \bar{X}_5 \vee \bar{X}_3 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_3 \bar{X}_5 \vee \bar{X}_6 \vee \bar{X}_7$$

ZBD: Serien-Parallel (SP)- und Seriensystem (S)



Berechnung über Module

$$R_{SP} = \prod_{i=1}^6 (1 - q_{1i} q_{2i}) = [(1 - q_1 q_4)(1 - q_2 q_5) \dots \text{etc}]$$

$$R_s = (1 - q_6)(1 - q_7)$$

$$\text{Ergebnis: } F = 1 - R_{SP} \cdot R_s = \dots = 4.113 \cdot 10^{-3}$$

Lernziele

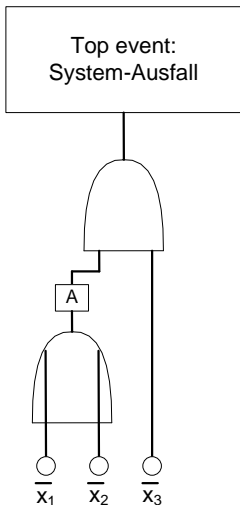
Fehlerbaum

Problematik
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

Algorithmus: Vom Fehlerbaum zu Minimal-Schnitten



Beginnend beim Top Event werden die Eingänge notiert: beim UND werden alle Eingänge nebeneinander, beim ODER untereinander. Hier gibt es dann für jeden neuen Eingang eine neue Zeile, wobei der Rest erhalten bleibt. Beachte innerhalb einer

- ▶ Zeile: Idempotenzgesetz
- ▶ Spalte: Absorptionsgesetz
 $Z_1 \vee (Z_1 \wedge Z_2) = Z_1$

Beispiel

- ▶ 1. Schritt: (eine Zeile)
 $\{A, \bar{x}_3\}$
- ▶ 2. Schritt: ersetze ODER-Gatter A
 $\{\bar{x}_1, \bar{x}_3\}$
 $\{\bar{x}_2, \bar{x}_3\}$ q.e.d.

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik

Begriffe und Symbole

Boolesche Algebra

qualitatives Beispiel

Quantifizierung

quantitatives Beispiel

Algorithmus

Tools

Literatur

Tools (Auswahl)

- ▶ **Microsoft Visio Professional**; FTA Flow Chart (AND, OR Gates etc.; keine Berechnungen)
- ▶ **OpenFTA** (open source)
- ▶ **Windchill FTA** (ehemals Relux Fault Tree)
- ▶ **isograph: FaultTree+**
- ▶ **item: ITEM ToolKit**
- ▶ **BQR: FTA**
- ▶ **RiskSpectrum**
- ▶ **ALD Fault Tree Analyzer**; browser-basiert
- ▶ **LOGAN, Fault and Event Tree Analysis**
- ▶ **Bright Hub PM**; EXCEL-Template; qualitativ

Literatur I

Lernziele

Fehlerbaum

Problematik
Begriffe und Symbole
Boolesche Algebra
qualitatives Beispiel
Quantifizierung
quantitatives Beispiel
Algorithmus

Tools

Literatur

- [1] DIN-25424T1: *Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen (DIN 25 424 Teil 1)*.
Beuth Verlag, September 1981.
- [2] DIN-25424T2: *Fehlerbaumanalyse: Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes (DIN 25 424 Teil 2)*.
Beuth Verlag, April 1990.
- [3] DIN-EN61078: *Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit: Verfahren mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm (DIN EN 61078: 1994-10)*.
Beuth Verlag, Oktober 1994.
- [4] ROBERTS, N. H., W. E. VESELY, D. F. HAASL and F. F. GOLDBERG: *Fault Tree Handbook (NUREG-0492)*.
U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1981.
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0492/sr0492.pdf>; visited:
Feb. 9, 2012.
- [5] STAMATELATOS, M. and J. CARABALLO: *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*.
Technical Report V. 1.1, NASA, Aug., 2002.
<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/fthb.pdf>; visited: Sept. 2014.
- [6] VDI-4008: *Strukturfunktion und ihre Anwendung*.
Technical Report VDI-4008-Blatt 7, Beuth Verlag, Berlin, 1986.