

Einführung und Übersicht

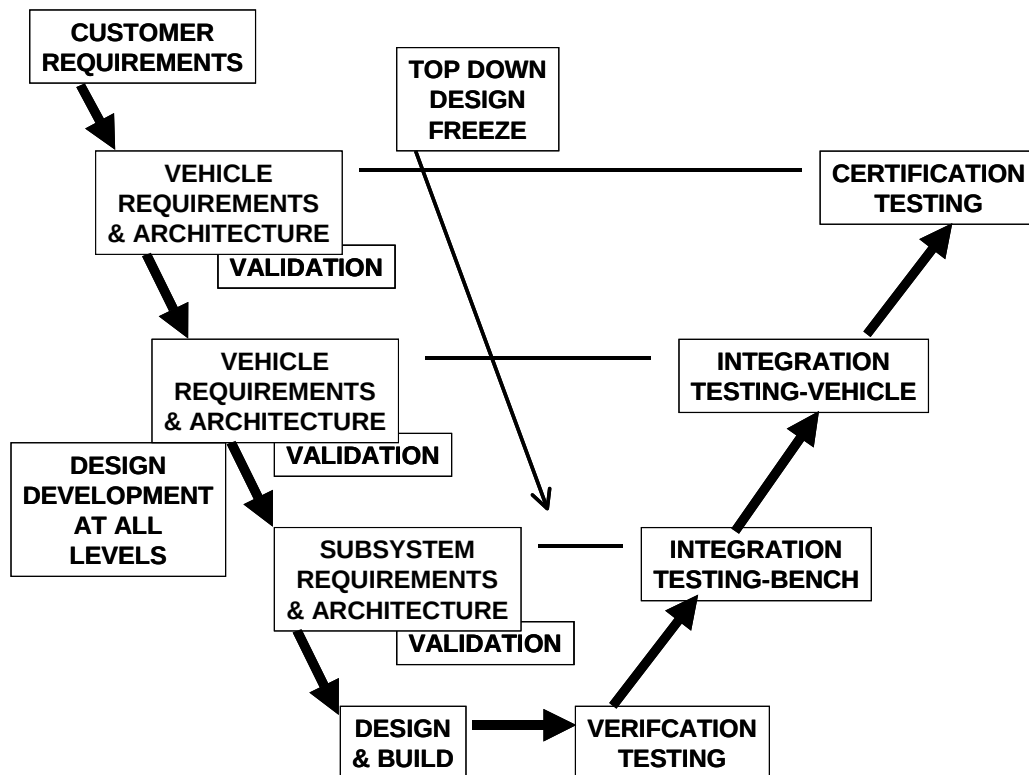


Bild 1: Das V-Modell der Top-Down Spezifikation und der Bottom-Up Verifikation von elektronischen Systemen in der Kfz-Entwicklung. (Quelle: DaimlerChrysler).

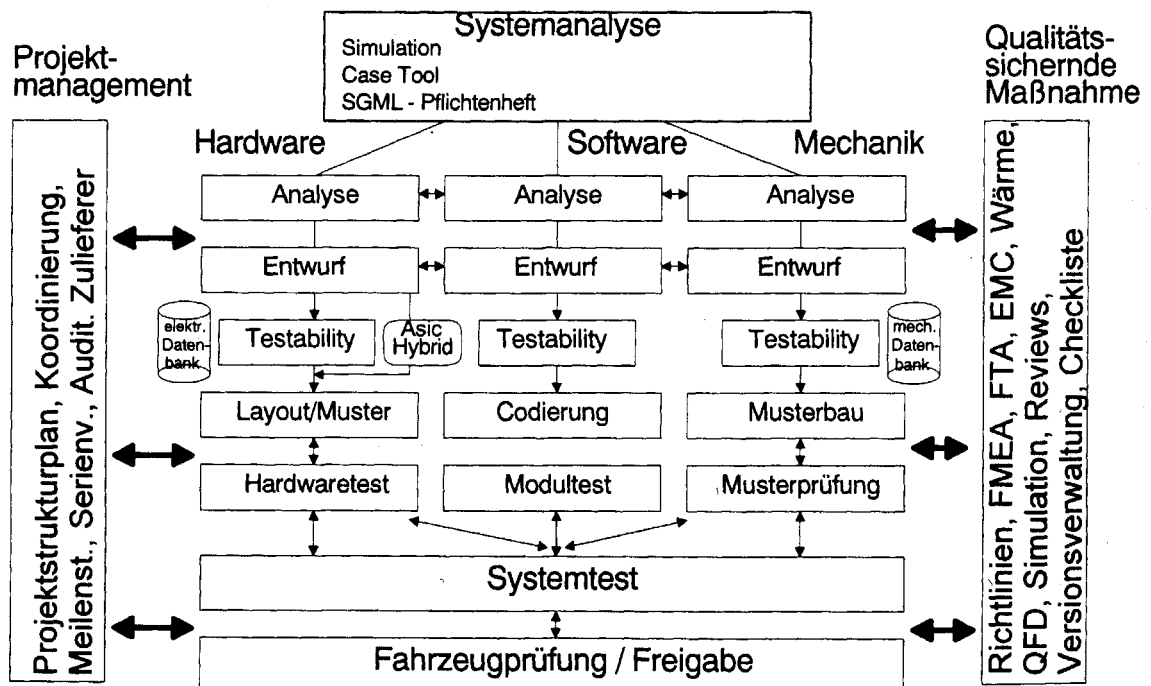


Bild 2: Systementwicklung für elektronische Kfz-Module. Partitionierung in Software, Hardware und Mechanik. (Quelle: DaimlerChrysler).

Generelle Entwicklungs-Zielsetzungen für materielle Produkte

1. Funktion erfüllen
 - Gebrauch verbessern
 - Ergonomie beachten
2. Qualität sicherstellen
 - Sicherheit und Zuverlässigkeit gewährleisten
 - Instandhaltung unterstützen
3. Kosten minimieren
4. Fertigung vereinfachen
 - Montage erleichtern
 - Transport ermöglichen
5. Einhaltung von Normen und Vorschriften
6. Sonstige Randbedingungen
 - Recycling anstreben

Methode	Anwendung in Phase	Verantwortlich für Durchführung	Beteiligte Fachbereiche
Total Quality Management	alle	Unternehmensleitung Beauftragter Koordinator	alle
Projektmanagement	Freigabe Vorentwicklung bis Freigabe erste Serienlieferung	Projektverantwortlicher	Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Q-Sicherung, Vertrieb, Einkauf
Simultaneous Engineering	Zielsetzung bis Serienfreigabe Abnehmer	Projektverantwortlicher	Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Q-Sicherung, Vertrieb, Einkauf
Design Review	Freigabe Listenheft 1 (Konzept) Freigabe Listenheft 2 (Konstruktion)	Projektverantwortlicher (Fachteamverantwortlicher Entwicklung)	Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Q-Sicherung, Vertrieb, Einkauf
Quality function deployment	Zielsetzung bis Freigabe Produktionshilfsmittel Beschaffung	Verkauf (Entwicklung)	Verkauf, Entwicklung, Konstruktion, Design, Produktion, Arbeitsvorbereitung
Fehlermöglichkeits- und Einfluß-Analyse FMEA	System-FMEA-Produkt: Beginn Entwicklung bis Freigabe Planung System- FMEA Prozess: Freigabe Planung bis Freigabe BM-Beschaffung	Entwicklungsteamverantw. Produktionsplanungs-teamverantwortlicher	Arbeitsvorbereitung, Entwicklung, Konstruktion, Qualität, Arbeitsvorbereitung, Entwicklung, Konstruktion, Qualität, Produktion
Fehlerbaumanalyse FTA	alle	Fachteamverantwortlicher (Teammitglied)	entsprechende Fachteam-mitglieder
Versuchsmethodik	Für Produkte: Zielsetzung bis Serienanlauf Für Produktion: Freigabe BM-Beschaffung bis Laufzeit-Ende	Erprobungsteam-verantwortliche Produktionsplanungs-teamverantwortliche	Arbeitsvorbereitung, Versuch, Konstruktion
Prozeßfähigkeits-untersuchung	Freigabe BM-Beschaffung bis Freigabe Serienanlauf	Produktionsplanung (Produktion)	AV, Qualität, Produktion
Prozeßlenkung	Freigabe Serienanlauf bis Laufzeit Produkt	Produktion	Qualität, Produktion

Tabelle 1: Einsatz von Management-, Planungs- und Analysemethoden bei der Produktentstehung.

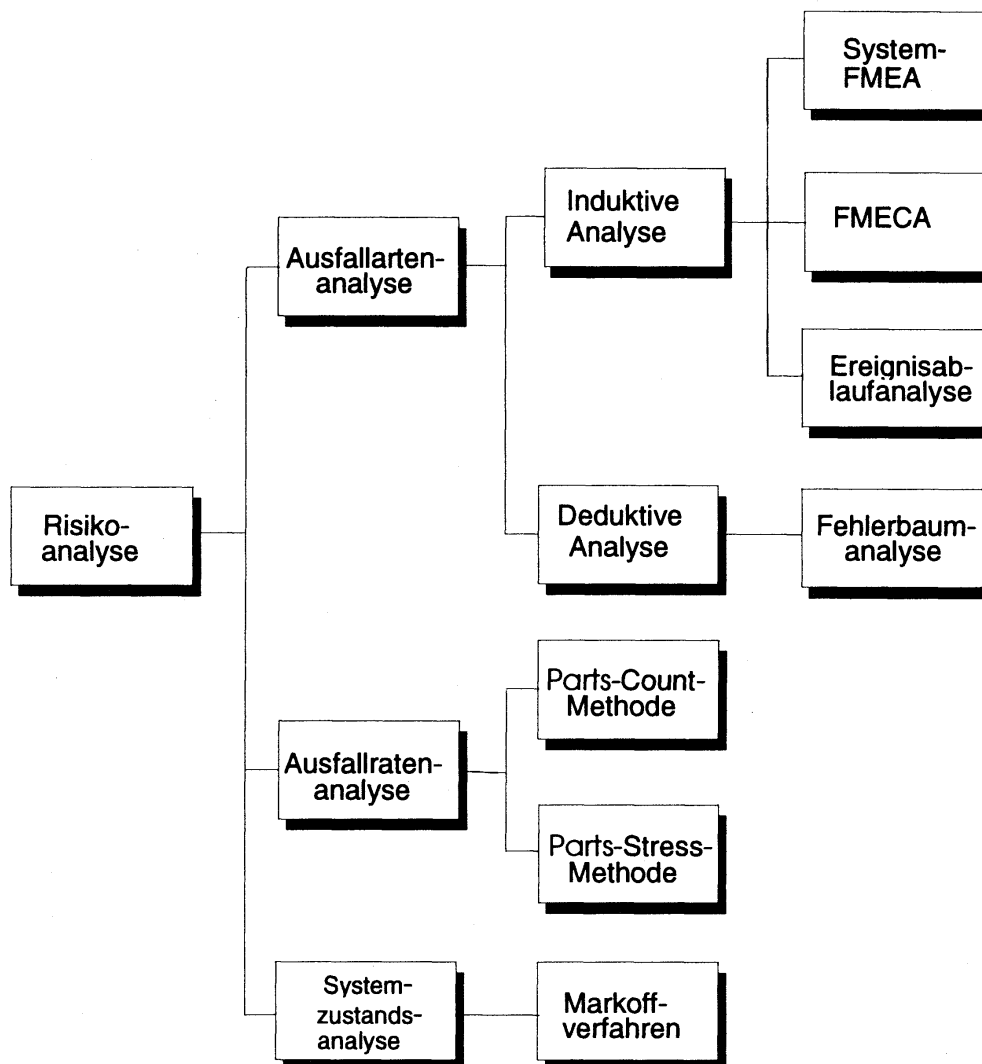


Bild 3: Die gebräuchlichsten technischen Risiko- und Zuverlässigkeitsanalysen.

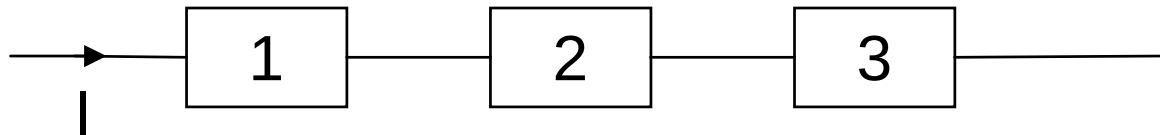
(Quelle: N. N.: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, Teil 2. 1. Aufl. Frankfurt: Verband der Automobilindustrie 1996.)

Das Zuverlässigkeits-Blockdiagramm (Ausfallraten-Analyse)

Fragestellung: Wie kann ich bei gegebenen Ausfallraten λ_i der n Komponenten die Ausfallrate λ_s eines Systems bestimmen?

Zunächst ist dabei die Frage der Anordnung der Komponenten von Bedeutung:

Dazu ist das Analogon eines Widerstandsnetzwerkes hilfreich:



Ein Strom fließt nur, wenn alle Bauelemente gleichzeitig funktionieren.

Das Modell kann auf alle elektronischen Geräte übertragen werden. Wenn irgendein Bauelement ausfällt, so ist das Gesamtgerät defekt oder kann als defekt definiert werden:

- Keine Funktion
- eingeschränkte Funktion
- verminderte Performance
- verminderte Zuverlässigkeit

Die Wahrscheinlichkeit, daß zum Zeitpunkt t ein beliebiges Bauelement funktioniert, ist

$$R_i(t) < 1$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß zwei Bauelemente i und j gleichzeitig funktionieren, ist

$$R_s(t) = R_i(t) \cdot R_j(t) < 1$$

Allgemein gilt bei n Bauelementen, welche jeweils die Funktionswahrscheinlichkeit (=Zuverlässigkeit) $R_i(t)$ besitzen:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

Typischerweise ist für die Einzelbauelemente eine Ausfallrate λ_i angegeben. Gemäß Definition ist bei einer Exponentialverteilung der Ausfallrate die Fehlerwahrscheinlichkeit wie folgt definiert:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t)$$

bzw. $R(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$

(Es gilt näherungsweise $F(t) \approx \lambda \cdot t$ für $t \leq 0,01 \cdot \lambda^{-1}$)

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i \cdot t)$$

$$R_s(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right) = \exp(-\lambda_s \cdot t)$$

Damit gilt für die Ausfallrate des gesamten Systems λ_s :

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Bei Serienschaltung der Komponenten addieren sich somit die Ausfallraten.

Die Berechnung der Ausfallrate eines Systems unter der Annahme der Serienschaltung aller Komponenten nach dieser Formel wird als **Parts-Count-Methode** bezeichnet.

Für die mittlere Zeit $\hat{t}_s$ bis zum Ausfall gilt bei der Exponentialverteilung $\hat{t}_s = 1/\lambda_s$

$\hat{t}_s$ wird auch als MTBF : Mean time between failures bezeichnet.

Allgemeiner Fall: Das Ausfallverhalten wird durch eine Weibull-Verteilung beschrieben:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{T}\right)^b\right) \text{ bzw. } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T}\right)^b\right)$$

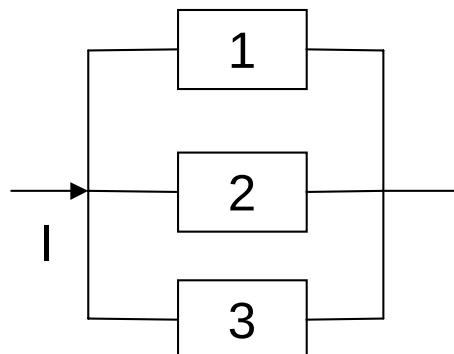
$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{t}{T_i}\right)^{b_i}\right) = \exp\left(-t^{b_i} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i}\right)^{b_i}\right)$$

Wenn alle b_i gleich sind ($b=b_i$), so ergibt sich wieder eine Weibullverteilung. Für deren charakteristische Ausfallzeit gilt:

$$\frac{1}{T} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}$$

Redundanz

Das alternative Modell zur Serienschaltung ist das der Parallelschaltung der Widerstände.



Auch hier hat jedes Bauelement eine Fehlerwahrscheinlichkeit $F_i(t) < 1$ und eine Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) $R_i(t) < 1$.

In diesem Fall müssen alle Widerstände ausfallen, damit kein Strom mehr fließt, bzw. nur einer muß überleben, damit das System noch funktioniert.

Daher gilt für die Gesamtwahrscheinlichkeit des Versagens bei einer Exponentialverteilung

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t))$$

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t))$$

Im Fall von zwei parallelen Widerständen gleicher Ausfallrate gilt:

$$R_s(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$

$$R_s(t) = 2 \cdot \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)$$

$$MTTF = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda}$$

MTTF: Mean time to failure. Die korrekte deutsche Bezeichnung für MTTF ist: „Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit“.

Die Parallelschaltung gleicher Funktionselemente zur Erhöhung der Funktionswahrscheinlichkeit nennt man **Redundanz**. Prinzipielle Typen von Redundanz:

Heiße (aktive oder parallele) Redundanz

- Alle Elemente erfüllen die Funktion gleichzeitig voll und sind auch gleich belastet.
- Sie weisen im Reservezustand und im aktiven Zustand die gleiche Ausfallrate auf.
- Ersatzelement ist sofort verfügbar

Warme (leicht belastete) Redundanz

- Die Redundanzelemente sind im nicht aktiven Zustand einer geringeren Belastung als im aktiven Zustand ausgesetzt.
- Sie weisen im Reservezustand geringere Ausfallrate als im aktiven Zustand auf.
- Relativ schnell einsatzbereit

Kalte (unbelastete) Redundanz

- Die Redundanzelemente sind im Standby-Zustand keiner Belastung ausgesetzt („Reserverad“).
- Man kann daher eine Ausfallrate gleich Null definieren ($\lambda \equiv 0$).
- Erst mit relativ langer Zeitverzögerung bereit.

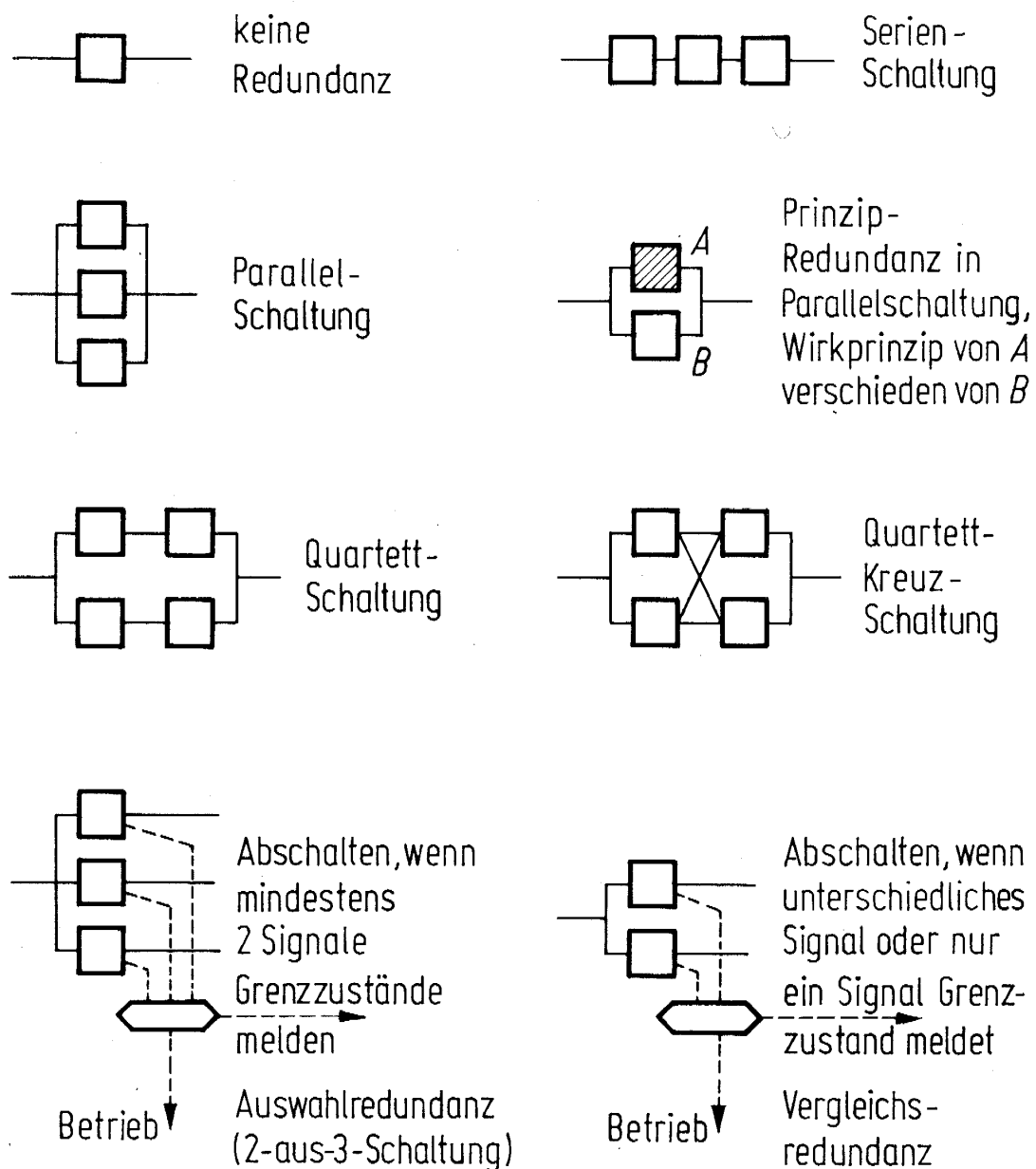


Bild 4: Redundante Anordnungen von Systemfunktionen bzw. Systemelementen in Funktions-Blockdiagrammen.

Bei der 2-aus-3-Redundanz (2 von 3 müssen funktionieren) gilt:

$$R_s = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i}$$

Beispiel: $F=10^{-3}$ Fehlerwahrscheinlichkeit des Einzelementes

$$R_s = \binom{3}{2} 0,999^2 \cdot (0,001)^1 + \binom{3}{3} 0,999^3 (0,001)^0 = 2,99 \cdot 10^{-3} + 0,9970 = 0,999997$$

$$F_s = 1 - 0,999997 \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ Fehlerwahrscheinlichkeit System}$$

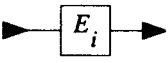
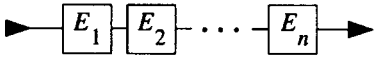
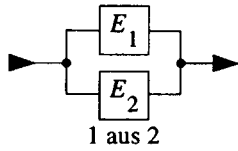
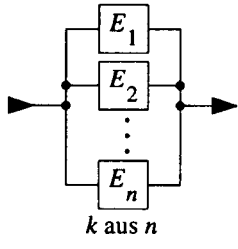
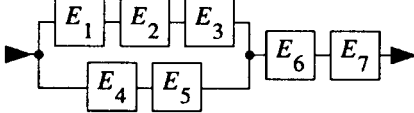
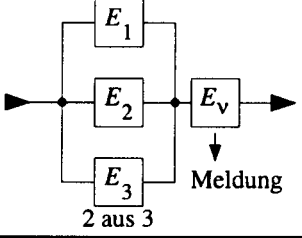
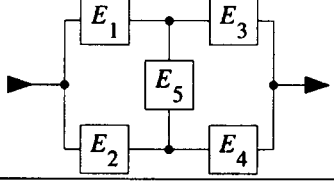
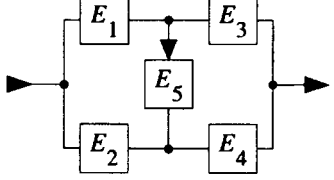
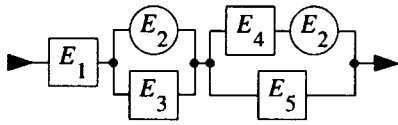
Zuverlässigkeitsblockdiagramm	Zuverlässigkeitsfunktion ($R_S = R_S(t)$, $R_i = R_i(t)$)	Bemerkungen
	$R_S = R_i$	Einzelelement, für $\lambda(t) = \lambda \rightarrow R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$
	$R_S = \prod_{i=1}^n R_i$	Serienmodell $\lambda_S(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t)$
	$R_S = R_1 + R_2 - R_1 R_2$	Redundanz 1 aus 2, für $R_1(t) = R_2(t) = e^{-\lambda t}$ gilt $R_S(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
	$R_1 = \dots = R_n = R$ $R_S = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i}$	Redundanz k aus n, für $k=1$ gilt $R_S = 1 - (1-R)^n$
	$R_S = (R_1 R_2 R_3 + R_4 R_5 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) R_6 R_7$	Serien-/Parallelstruktur
	$R_1 = R_2 = R_3 = R$ $R_S = (3R^2 - 2R^3)R_v$	Majoritäts-Redundanz (allgemeiner Fall $n+1$ aus $2n+1$)
	$R_S = R_5 (R_1 + R_2 - R_1 R_2) (R_3 + R_4 - R_3 R_4) + (1 - R_5) (R_1 R_3 + R_2 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4)$	Brückenschaltung mit Zweiwegverbindung
	$R_S = R_4 (R_2 + R_1 (R_3 + R_5 - R_3 R_5) - (R_1 R_2) (R_3 + R_5 - R_3 R_5)) + (1 - R_4) R_1 R_3$	Brückenschaltung mit gerichteter Verbindung
	$R_S = R_2 R_1 (R_4 + R_5 - R_4 R_5) + (1 - R_2) R_1 R_3 R_5$	das Element E_2 erscheint zweimal im Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Bild 5: Typische Teil-Strukturen von Zuverlässigkeits-Blockdiagrammen und zugehörige Zuverlässigkeitsfunktionen. (Quelle: Birolini, Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen).

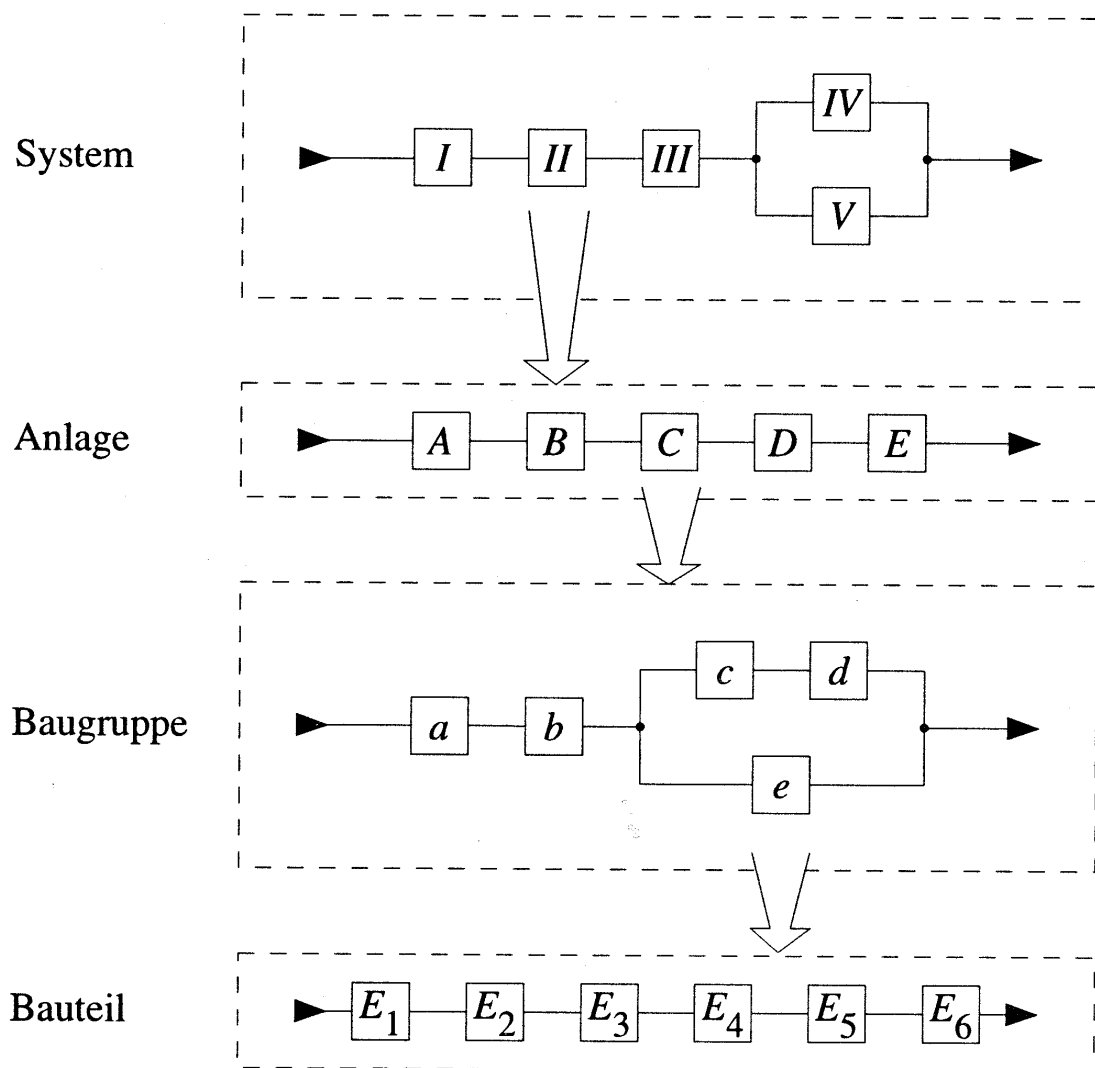


Bild 6: Top-down Aufstellung des Zuverlässigkeits-Blockdiagrammes eines komplexen Systems. (Quelle: Birolini, Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen).

Fehlerbaum-Analyse FTA (Ausfallarten-Analyse und Ausfallraten-Analyse)

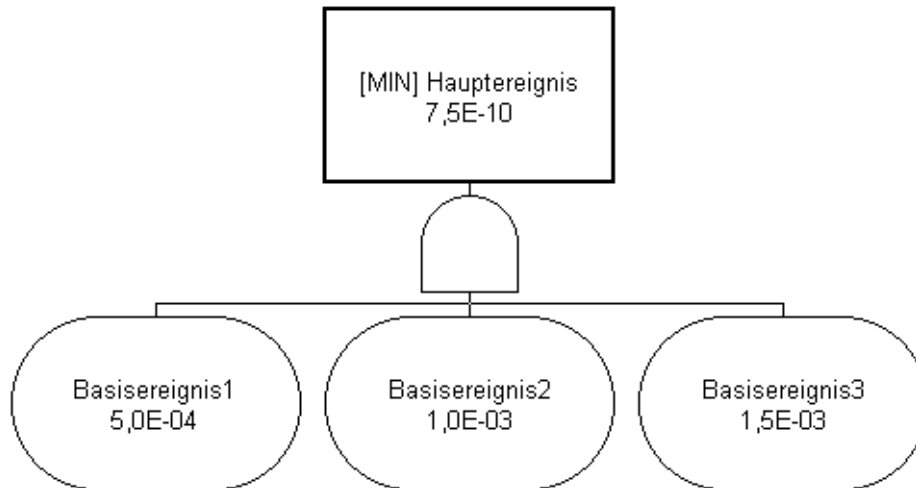


Bild 7: Verknüpfung mehrerer Fehlerereignisse über eine Boolesche UND Verknüpfung. Das Hauptereignis tritt ein, wenn alle Basisereignisse stattfinden.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Fehlerereignisses F_s berechnet sich wie beim Zuverlässigkeits-Blockdiagramm für Parallelschaltung (Redundanz).

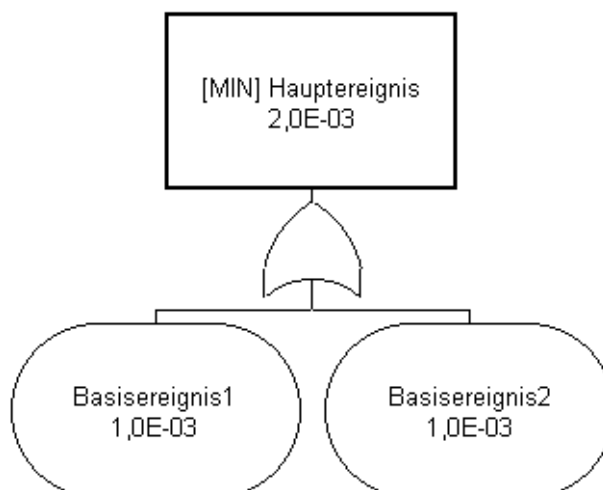


Bild 8: Verknüpfung zweier Fehlerereignisse über eine ODER Verknüpfung. Das Hauptereignis tritt ein, wenn eines der Basisereignisse stattfinden.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Fehlerereignisses F_s berechnet sich wie beim Zuverlässigkeits-Blockdiagramm für Serienschaltung.

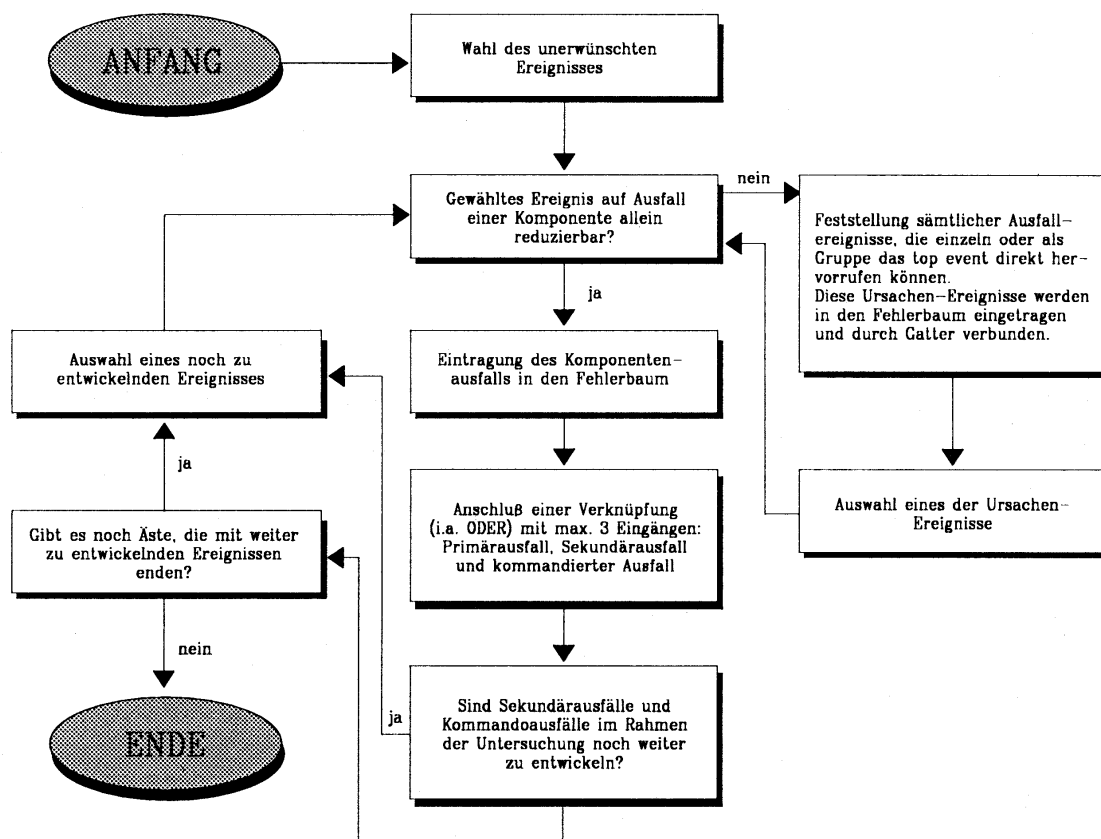


Bild 9: Schema zum Aufstellen von Fehlerbäumen. (Quelle: VDA, System-FMEA).

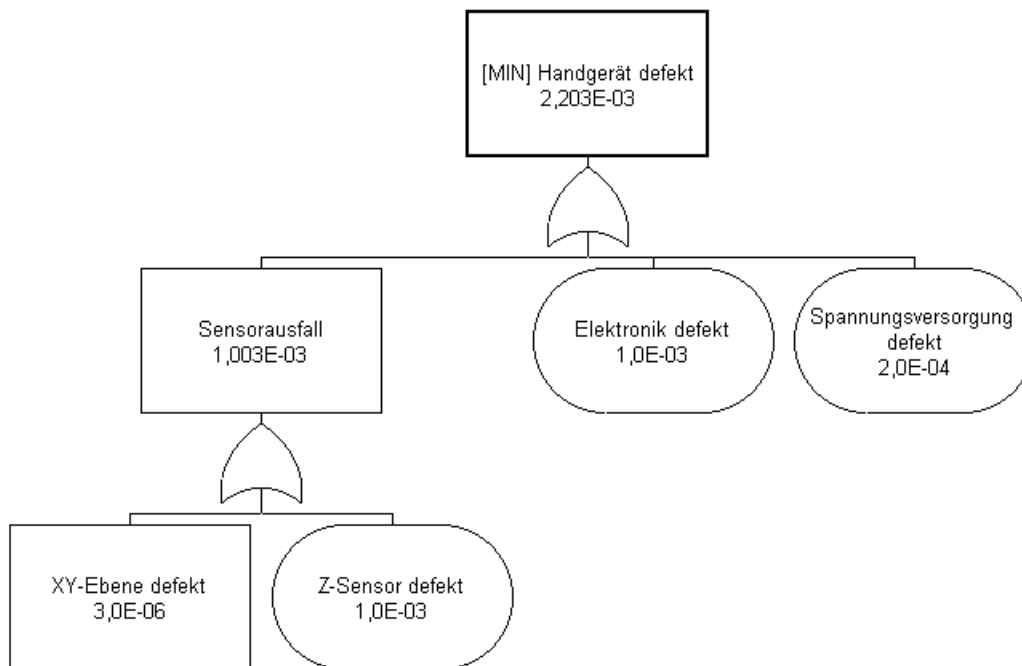


Bild 10: Vorschlag für den Fehlerbaum für das Handeingabegerät. Der Fehler „XY-Ebene defekt“ soll detaillierter modelliert werden.

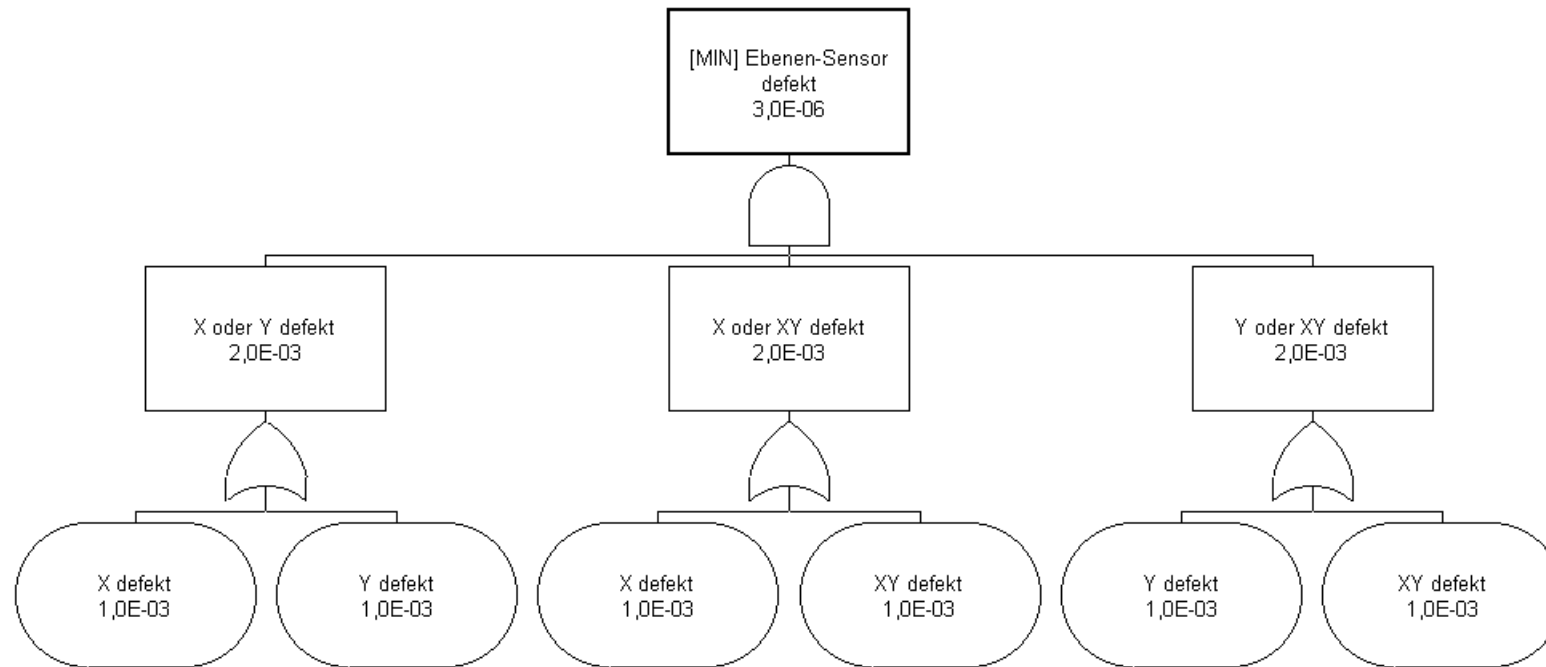


Bild 11: Modellierung des Fehlerbaumes für den Sensor für die Bewegung in der XY-Ebenen mit 2-aus-3-Redundanz. Die Grundidee ist folgende. Der Sensor mißt Bewegungen in X, Y, und XY-Richtung. Wenn eine der drei Richtungen ausfällt, so errechnet er sich die Bewegungen aus den beiden anderen, d. h. aus X und Y oder X und XY oder Y und XY. Bei der k-aus-n-Redundanz müssen k von n funktionieren!

FMEA Failure Mode and Effects Analysis (Ausfallarten-Analyse)

Dieses Kapitel wurde weitgehend folgender Quelle entnommen:

N. N.: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, Teil 2. 1. Aufl.
Frankfurt: Verband der Automobilindustrie 1996. (System-FMEA)

System-FMEA ist eine integrierte, entwicklungs- und planungsbegleitende Risikoanalyse. Entwicklung in der sechziger Jahren bei der Nasa für die Apollo-Mission. Später breite Anwendung in der Kfz-Industrie

Früher:

1. Konstruktions-FMEA auf Bauteilebene
 - Wechselwirkung der Bauteile wurde nicht betrachtet
2. Prozeß-FMEA auf Einzel-Prozeßebene
 - Untersuchung möglicher Fehler in einzelnen Prozeßschritten
 - Keine systematische Gesamt-Prozeßanalyse

Jetzt:

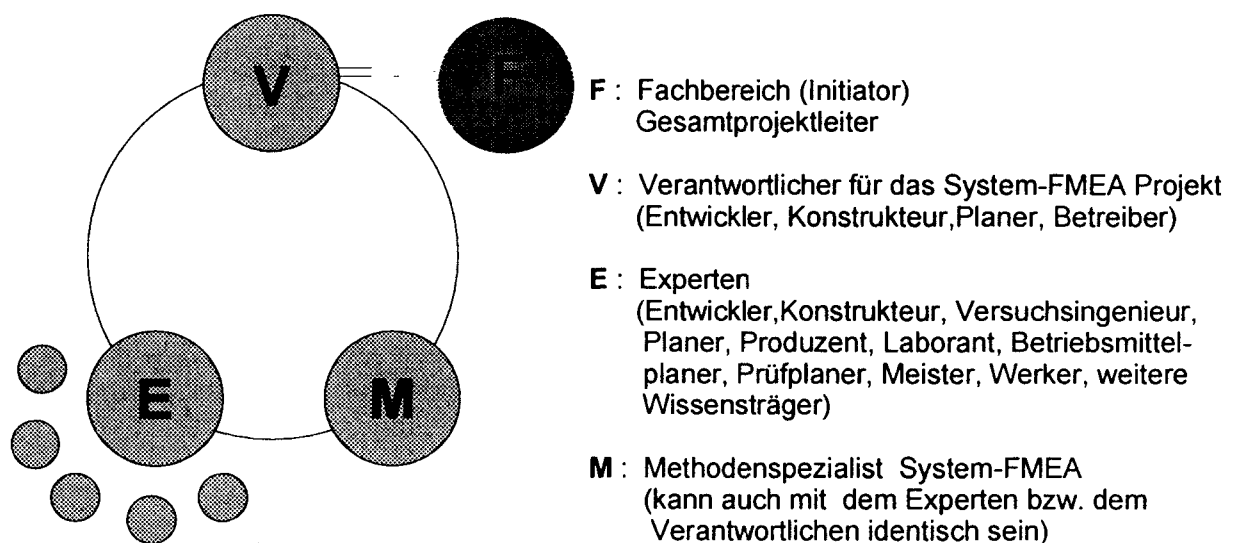
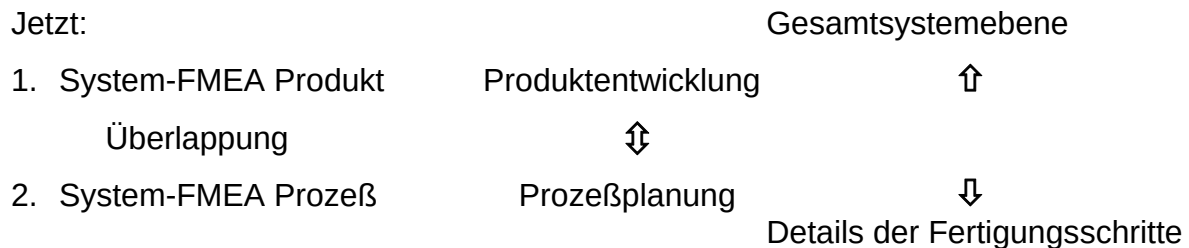


Bild 12: Zusammensetzung des FMEA-Teams.

Definition der System-FMEA

System-FMEA =

- + Strukturierung des Systems in Systemelemente und Darstellung deren funktionaler Zusammenhänge
- + Ableiten denkbarer Fehlfunktionen der Systemelemente aus den zuvor beschriebenen Funktionen
- + Logische Verknüpfung der Fehlfunktionen unterschiedlicher Systemelemente

Wichtige Größen

F: Fehler

FF: Fehlerfolge

FU: Fehlerursache

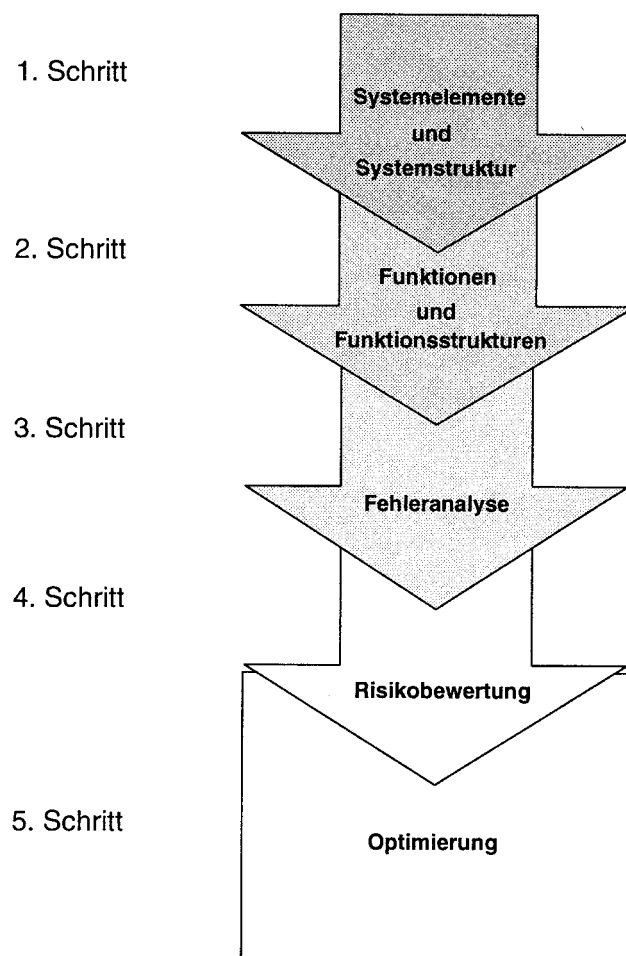


Bild 13: Die Teilschritte der System-FMEA. Produkt-FMEA und Prozeß-FMEA.

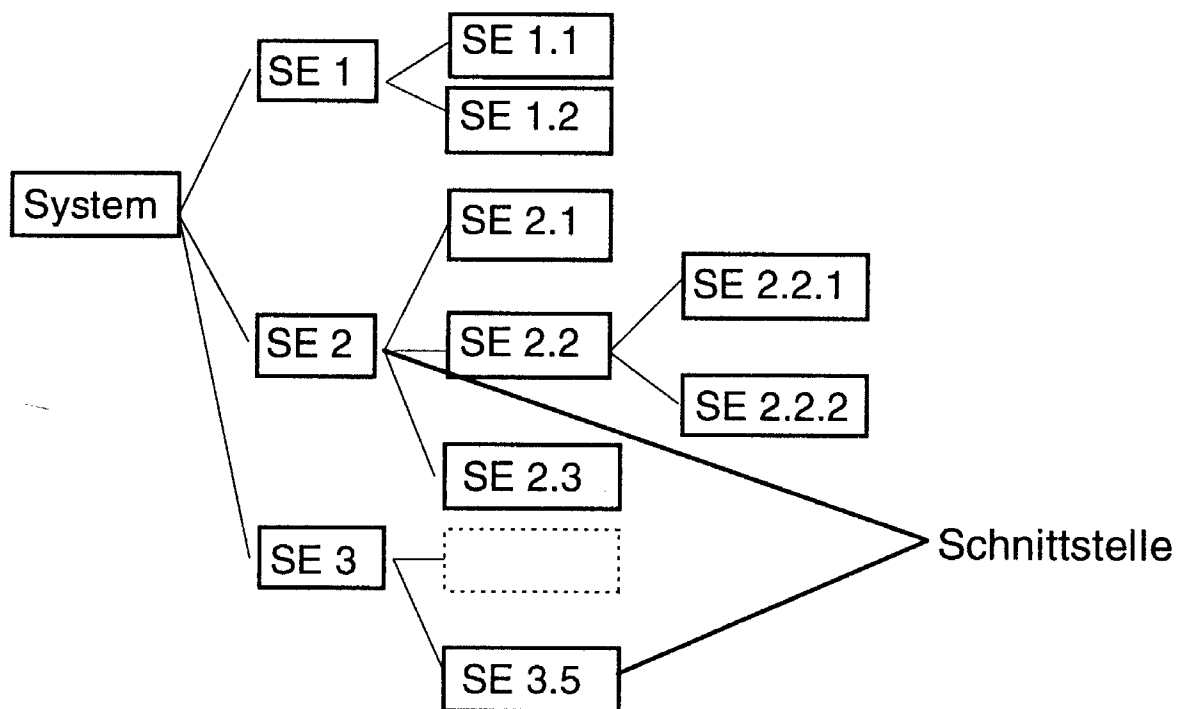


Bild 14: Erster Teilschritt der System-FMEA (Produkt-FMEA): Darstellung des Systems und der Systemstruktur.

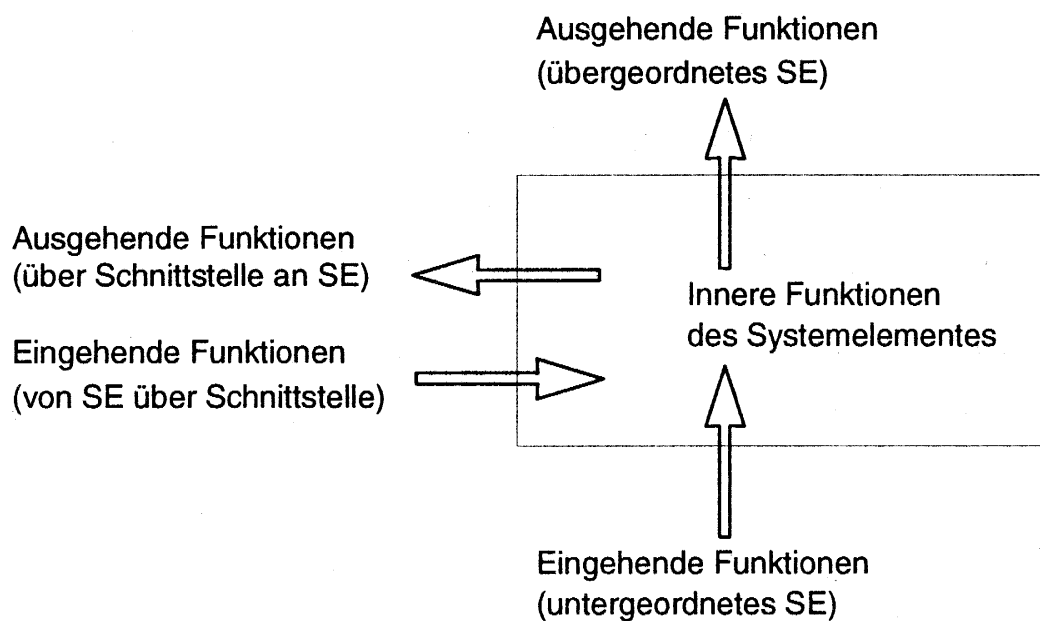


Bild 15: Zweiter Teilschritt der System-FMEA (Produkt-FMEA). Zuordnung von Funktionen und Schnittstellen zu den Systemelementen.

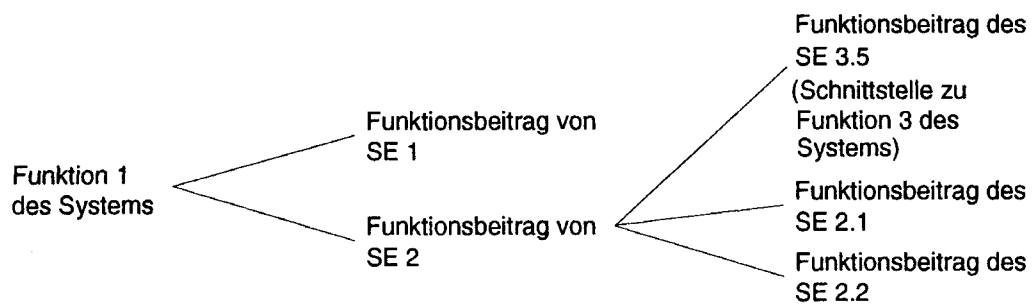


Bild 16: Zweiter Teilschritt der System-FMEA (Produkt-FMEA). Darstellung der Funktionsstruktur des Systems.

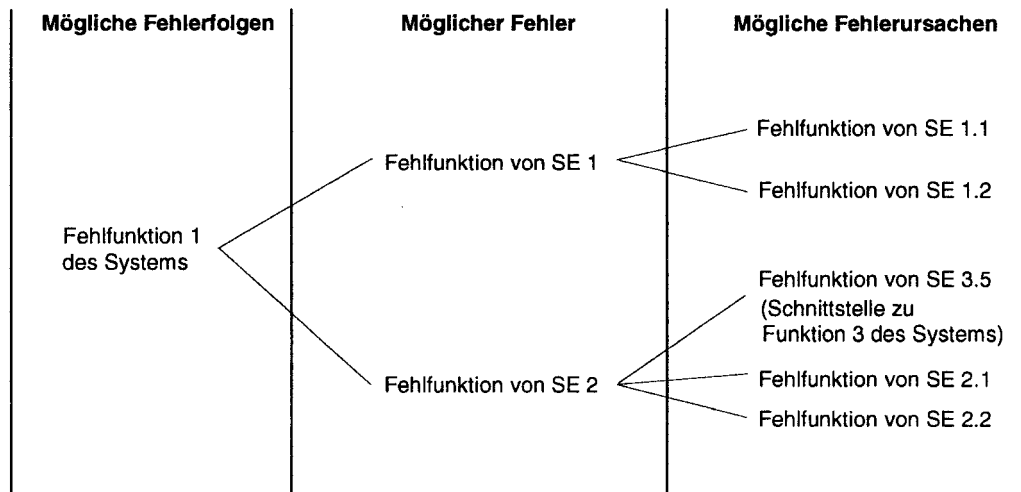


Bild 17: Dritter Teilschritt der System-FMEA (Produkt-FMEA): Ableitung der Fehlfunktionsstruktur aus der Funktionsstruktur des Systems. Zuordnung von Fehlerfolgen und Fehlerursachen zu Fehlern der zweiten Systemebene.

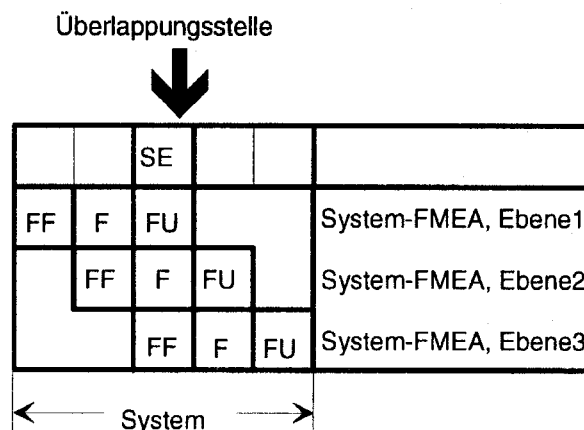


Bild 18: Überlappung der System-FMEA unterschiedlicher Systemebenen.

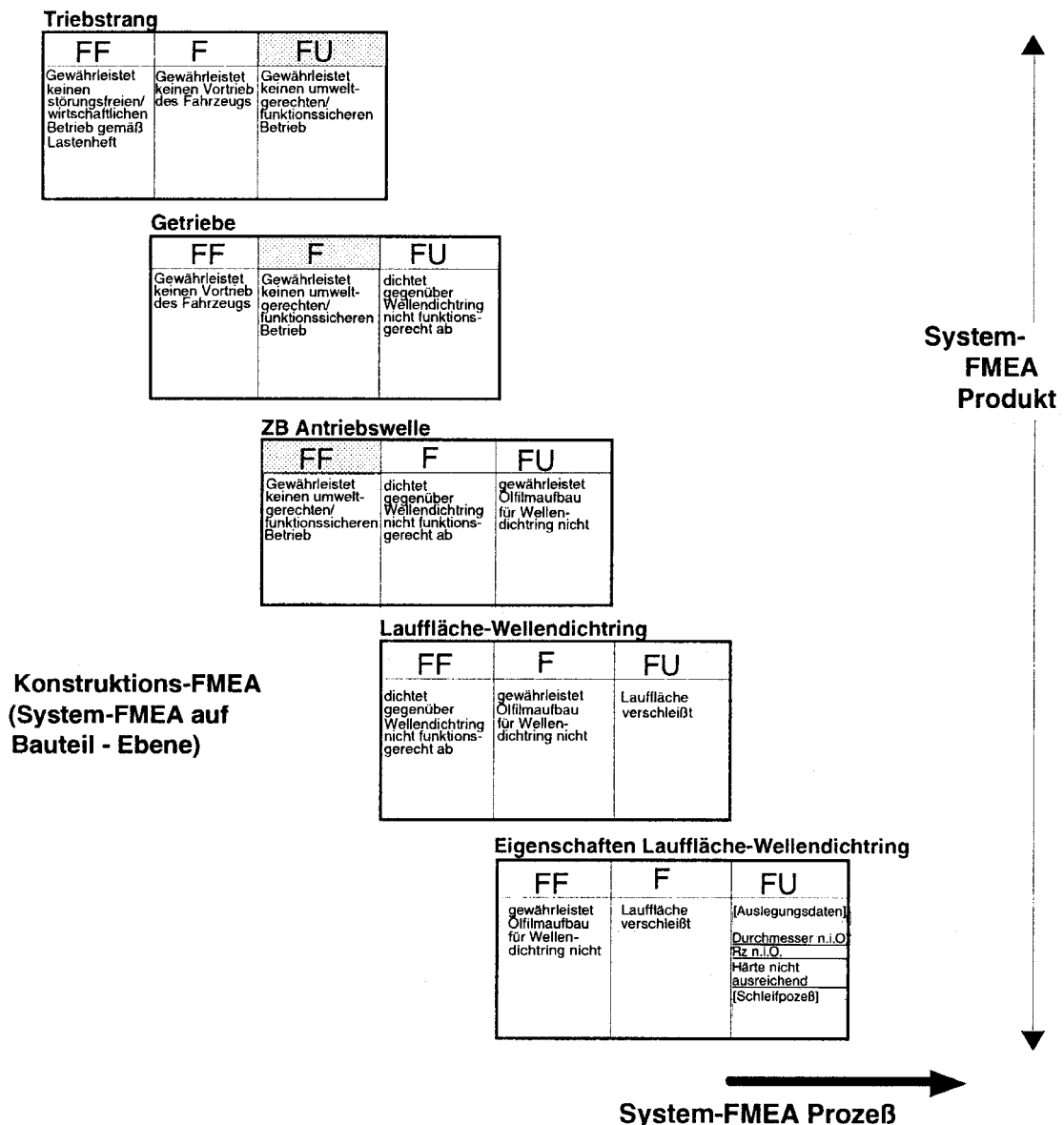


Bild 19: Überlappung der System-FMEA Produkt über mehrere Systemebenen mit der System-FMEA Prozeß am Beispiel des Antriebsstranges eines Fahrzeugs.

Bottom-up-Vorgehen

				Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse				FMEA-Nr.:	
				☐ System-FMEA Produkt ☐ System-FMEA Prozeß				Seite von	
Typ/Modell/Fertigung/Charge:				Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:	
				Änderungsstand:		Firma:		Datum:	
System-Nr./Systemelement:				Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:	
Funktion/Aufgabe:				Änderungsstand:		Firma:		Datum:	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	V/T

B = Bewertungszahl für die Bedeutung A = Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit
 V = Verantwortlichkeit T = Termin für die Erledigung

E = Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit
 Risikoprioritätszahl $RPZ = B \cdot A \cdot E$

Bild 20: Formblatt zur System-FMEA nach VDA.

Bewertungszahl Bedeutung B	Bewertungszahl Auftretens wahrscheinlichkeit A	Fehler in ppm	Bewertungszahl Entdeckungswahr- scheinlichkeit E	
Sehr hoch 10, 9 Sicherheitsrisiko Nicht-Erfüllen von Vorschriften Liegenbleiben	Sehr hoch 10, 9 Sehr häufiges Auftreten der Fehlerursache unbrauchbares, ungeeignetes Konstruktionskonzept	500.000 100.000	Sehr gering 10, 9 Entdecken der aufgetretenen Feh- lerursache ist unwahrscheinlich Zuverlässigkeit der Konstruktions- auslegung wurde nicht oder kann nicht nachgewiesen werden Nachweisverfahren sind unsicher	90 %
Hoch 8, 7 Funktionsfähigkeit stark eingeschränkt Sofortiger Werkstattaufenthalt zwingend Funktionsbeeinträchtigung wichtiger Teilsysteme	Hoch 8, 7 Fehlerursache tritt wiederholt auf problematische unausgereifte Konstruktion	50.000 10.000	Gering 8, 7 Entdecken FU ist weniger wahr- scheinlich Zuverlässigkeit ... kann wahr- scheinlich nicht nachgewiesen werden Nachweisverfahren sind unsicher	98 %
Mäßig 6, 5, 4 Funktionsfähigkeit eingeschränkt Sofortiger Werkstattaufenthalt nicht zwingend Funktionsbeeinträchtigung wichtiger Bedienungs- und Komfortsysteme	Mäßig 6, 5, 4 Fehlerursache tritt gelegentlich auf geeignete, im Reifegrad fortgeschrittene Konstruktion	5.000 1.000 500	Mäßig 6, 5, 4 Entdecken FU ist wahrscheinlich Zuverlässigkeit ... könnte vielleicht nachgewiesen werden Nachweisverfahren sind relativ sicher	99,7 %
Gering 3, 2 Geringe Funktionsbeeinträchtigung Beseitigung beim nächsten planmäßigen Werkstattaufenthalt Funktionsbeeinträchtigung von Bedien- und Komfortsystemen	Gering 3, 2 Auftreten der Fehlerursache ist gering bewährte konstruktive Auslegung	100 50	Hoch 3, 2 Entdecken FU ist sehr wahrschein- lich, durch mehrere unabhängige Nachweisverfahren bestätigt	99,9 %
Sehr gering 1 Sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung, nur von Fachpersonal erkennbar	Sehr gering 1 Auftreten der Fehlerursache ist unwahrscheinlich	1	Sehr hoch 1 Aufgetretene Fehlerursache wird sicher entdeckt	99,99 %

Schritt 4 der System FMEA: Risikobewertung

	Kriterium	Bewertung
A:	Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache	1 bis 10
B:	Bedeutung der Fehlerfolge	1 bis 10
E:	Entdeckungswahrscheinlichkeit	10 bis 1

Risiko-Prioritätszahl RPZ

$$RPZ = A * B * E$$

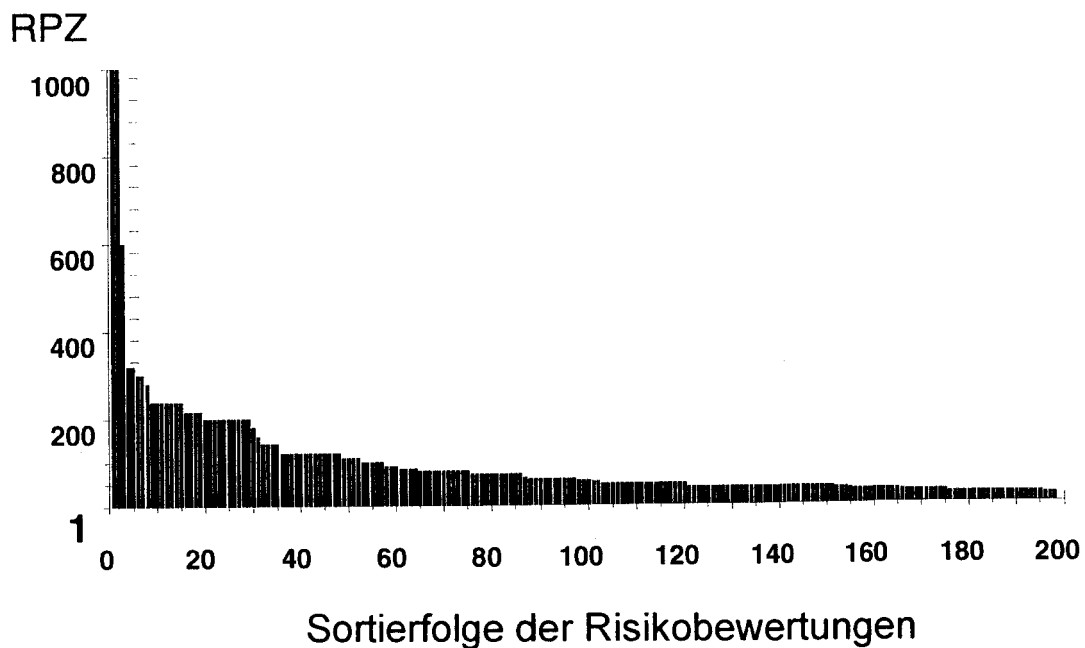


Bild 21: Pareto-Darstellung der Risiko-Prioritätszahl RPZ bei der System-FMEA.

Schritt 5 der System FMEA: Optimierung

Prioritäten der durchzuführenden Maßnahmen (hohe RPZ zuerst!)

1. Konzeptänderung
 - schließt Fehlerursache aus (Wahrscheinlichkeit = 0)
 - Fehlerfolge hat geringere Bedeutung
2. Erhöhung der Konzeptzuverlässigkeit
 - minimiert Auftreten der Fehlerursache (Wahrscheinlichkeit)
3. Wirksamere Entdeckung von Fehlerursachen