

# Tragwerk - FMEA

## Leitfaden

Leitfaden zur Analyse der Fehlerzustandsart- und –  
auswirkungsanalyse (FMEA) für Tragwerke

Werner Seim, Tobias Vogt  
FG Bauwerkserhaltung und Holzbau, Universität Kassel  
Stand: 18.11.2010



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Vorbemerkungen . . . . .	1
1.2	Begriffe . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise Tragwerk–FMEA</b>	<b>5</b>
2.1	Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen . . . . .	5
2.2	Tragwerksentwurf und Vorbemessung . . . . .	9
2.3	Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen . . . . .	9
2.4	Einordnung des Bauwerks in FMEA–Klassen . . . . .	11
2.5	Darstellung des globalen Lastabtrags . . . . .	13
2.6	Fehleranalyse . . . . .	16
2.7	Risikobewertung . . . . .	17
2.8	Optimierung . . . . .	20
2.9	Dokumentation der Ergebnisse . . . . .	20
2.10	Begleitung der weiteren Planung und Ausführung . . . . .	22
2.11	Fehlerkategorien und Fehlerursachen . . . . .	22
2.12	Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen . . . . .	22
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>27</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Vorbemerkungen

Im Bauwesen wird durch Normen und Richtlinien die Vorgehensweise bei der Erstellung von statischen Berechnungen festgelegt. Durch vorgeschriebene Lastannahmen wird außerdem vorgegeben, in welcher Weise die Einwirkungen auf ein Gebäude berücksichtigt werden müssen. Die notwendigen Sicherheiten werden durch das semi-probabilistische Sicherheitskonzept geregelt. Diese beziehen sich allerdings nur auf die Unsicherheiten seitens der Einwirkungen und der Bauteilwiderstände. Bei der Kontrolle von statischen Berechnungen hinsichtlich der Richtigkeit der Anwendung der Normen und Richtlinien sowie der Fehlerfreiheit des Tragkonzepts und der Berechnungen verlässt man sich auf die Prüfung durch einen qualifizierten Prüfsachverständigen oder bei kleineren Bauvorhaben auf nicht näher spezifizerte, interne Qualitätssicherungsmechanismen. Diese Prüfung erfolgt allerdings ohne allgemeingültige Systematik und ist oftmals nicht hinreichend nachvollziehbar. Außerdem werden die Fehler auf diese Weise erst zu einem späten Zeitpunkt aufgefunden, wodurch die Behebung oftmals zeitaufwendig und kostenintensiv ist.

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wird angewendet, um die Qualität von Produkten sicherzustellen. Es sollen mögliche Fehler in einem frühen Stadium erkannt werden, um diese bereits im Vorfeld zu vermeiden bzw. deren Folgen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Sie findet im Bereich des Maschinenbaus, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie, bereits seit einigen Jahrzehnten Anwendung und hat sich seitdem vielfach bewährt. Mittlerweile bildet sie dort, gerade in der Entwicklungsphase, eine wichtige Grundlage aller Projekte. Für Automobilkonzerne beispielsweise ist die Durchführung einer FMEA in ihren Zulieferbetrieben Voraussetzung für eine gemeinsame Zusammenarbeit. Auch Versicherungen setzen eine FMEA zunehmend voraus bzw. vergeben deutlich bessere Konditionen an Betriebe die eine solche durchführen.

Weitere Gründe für die Notwendigkeit einer optimierten Qualitätssicherung werden im Artikel *Die Rolle des Prüfsachverständigen im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr* von Dressel [Dre09] genannt. Ein guter grundlegender Überblick zum Stand der Technik bzgl. der FMEA ist im Heft *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse* [Var04] zu finden.

Im vorliegenden Leitfaden werden erstmals Regeln zur Durchführung einer FMEA im Bauwesen formuliert. Dabei werden der Schwierigkeitsgrad und die Robustheit eines Tragwerks als diejenige Parameter definiert aus denen sich der Umfang der FMEA ableiten lässt.

## 1.2 Begriffe

### FMEA–Arten Maschinenbau/Luft- und Raumfahrtindustrie

- **System–FMEA:** Sie betrachtet das Zusammenwirken von Systemen bzw. Systemkomponenten und sorgt für eine Transparenz des Gesamtsystems.
- **Konstruktions–FMEA:** Sie geht eine Ebene tiefer und analysiert das System detaillierter. Die Fehlerursachen in der System–FMEA werden hier als Fehlerarten betrachtet und deren Ursachen verfolgt.
- **Prozess–FMEA:** Sie befasst sich mit den Fehlern, die bei der Produktherstellung entstehen können.

### FMEA–Arten Bauwesen

- **Tragwerk–FMEA:** Sie wird nach der Vor- und Entwurfsplanung (Leistungsphasen 2 und 3) durchgeführt und dient zur Vermeidung grundlegender Fehler in einem frühen Stadium.
- **Konstruktions–FMEA:** Sie erfolgt nach der Genehmigungs- und Ausführungsplanung und zielt auf eine Sicherstellung der Richtigkeit der endgültigen statischen Berechnungen und der Konstruktionszeichnungen.
- **Ausführungs–FMEA:** Sie soll die richtige Ausführung gewährleisten und Fehler in dieser Phase vermeiden.
- **Nutzungs–FMEA:** Sie hat die Aufgabe in der Nutzungsphase kritische Bereiche zu überwachen und die Dauerhaftigkeit von Gebäuden sicherzustellen.

### Ablauf System–FMEA

- **Strukturanalyse:** Alle Systemelemente sowie deren Schnittstellen (Verbindungen, Zusammenhänge und Abhängigkeiten) werden erkannt, analysiert und dokumentiert. Es erfolgt eine Darstellung in geeigneter Form.
- **Funktionsanalyse:** Die jeweiligen Funktionen der Systemelemente werden analysiert und diesen auf verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet.

- **Fehleranalyse:** Ein Fehler ist definiert als „Nichterfüllung einer Funktion“. Somit kann für jede Funktion ein möglicher Fehler formuliert werden. In diesem Schritt werden außerdem deren Ursachen und Folgen beschrieben. Die Analyse erfolgt heuristisch, d.h. intuitiv und auf Erfahrung basierend.
- **Risikobewertung:** Um eine Abschätzung für das tatsächliche Risiko vorzunehmen, werden in der verbreitetsten Form der Risikobewertung jeweils 3 verschiedene Kriterien mit Zahlenwerten zwischen 1 und 10 bewertet. Dies sind die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache sowie die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache. Die Risikoprioritätszahl (RPZ) gibt das Risiko an, welches von einem Fehler ausgeht und errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen, also:

$$RPZ = B * A * E.$$

Je größer die RPZ, desto wichtiger ist es für diesen Fehler eine Optimierung durchzuführen, d. h. desto höher ist die *Priorität* diesen Fehler zu betrachten. Die möglichen Ergebnisse liegen zwischen 1 (kein bzw. sehr geringes Risiko) und 1000 (sehr hohes Risiko).

- **Optimierung:** Auf dieser Grundlage können dann im Team für die erkannten Risiken geeignete Maßnahmen zur Entdeckung bzw. Vermeidung der Fehler erarbeitet werden. Die festgelegten Maßnahmen werden dann bei der Bewertung der Kriterien berücksichtigt und führen zu einer Reduzierung der RPZ.





## 2 Vorgehensweise Tragwerk–FMEA

In Abbildung 2.1 ist der Gesamtablauf einer Tragwerk–FMEA als Flussdiagramm dargestellt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in Abbildung 2.2 kurz erläutert. Außerdem findet ein Verweis auf die zugehörigen Abschnitte, Abbildungen und Tabellen statt.

### 2.1 Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen

Das Bauwerk wird anhand der Honorarzone (vgl. Tab. 2.1) und der Consequence Class (vgl. Abb. 2.3) in die entsprechende Gefährdungsklasse eingeordnet (vgl. Abb. 2.4).

Honorarzone	Planungsanforderungen
HZ I	sehr gering
HZ II	gering
HZ III	durchschnittlich
HZ IV	überdurchschnittlich
HZ V	sehr hoch

Tabelle 2.1: Honorarzonen nach HOAI

### Vorgehen Tragwerk-FMEA (Gesamtablauf)

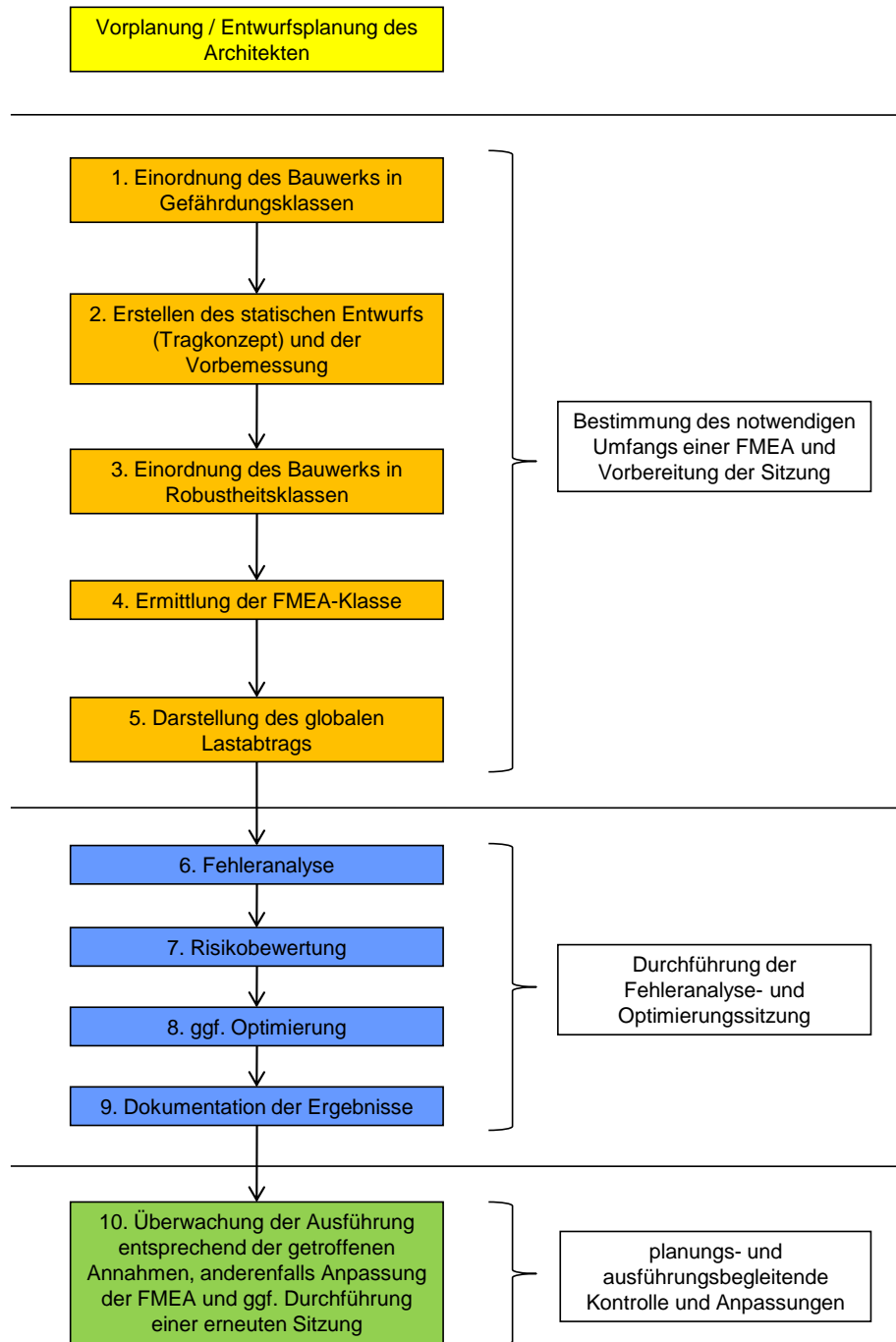


Abbildung 2.1: Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Gesamtablaufs einer Tragwerk-FMEA

## 2.1 Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen

Zeile	Bearbeitungsschritt	Zweck	Beteiligte	zugehörige Informationen
1	Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen	Ermittlung der notwendigen Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung bei der Durchführung der FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt 2.1
				Abb. 2.3, 2.4
				Tab. 2.1
2	statischer Entwurf und Vorbemessung	Ermittlung eines geeigneten Tragkonzepts und der notwendigen Bauteilabmessungen	Tragwerksplaner	
3	Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen	Ermittlung der notwendigen Anzahl zu erfassender Elemente bei der Durchführung der FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt 2.3
				-
				Tab. 2.3, 2.4
4	Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen	Ermittlung des notwendigen Umfangs einer durchzuführenden FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt 2.4
				Abb. 2.5, 2.6
				Tab. 2.5, 2.6
5	Darstellung des globalen Lastabtrags	Unterstützung bei der Ermittlung der Auswirkung von Fehlern auf weiterführende Bauteile (Propagierung der Fehler)	Tragwerksplaner	Abschnitt 2.5
				Abb. 2.7, 2.8
				-
6	Fehleranalyse	Auffinden möglicher Fehler, sowie der entsprechenden Ursachen und Folgen	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.6
				-
				Tab. 2.6, 2.9, 2.10
7	Risikobewertung	Feststellung, ob das vorhandene Risiko die vorgegebenen Grenzen einhält	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.7
				Abb. 2.9, 2.10, 2.11
				Tab. 2.8
8	Optimierung	Reduzierung des Risikos, wenn die vorgegebenen Grenzen nicht eingehalten sind	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.8
				-
				Tab. 2.9, 2.11
9	Dokumentation der Ergebnisse	Festhalten der wichtigen Informationen und Weiterverwendung dieser in den weiteren Phasen	Protokollführer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6, Bestätigung durch Teilnehmer	Abschnitt 2.9
				Abb. 2.12
				-
10	Begleitung der weiteren Planung und Ausführung	Überwachung, ob zugrundegelegte Kriterien eingehalten werden und ggf. Anpassung der FMEA an neue Gegebenheiten	Festlegung eines Verantwortlichen, z.B. Prüfsingenieur	Abschnitt 2.10
				-
				-

Abbildung 2.2: Erläuterungen und Verweise bzgl. Flussdiagramm

## 2 Vorgehensweise Tragwerk-FMEA

Schadens- folgeklasse	Merkmale	Gebäudetypen und exponierte Bauteile	Beispielhafte Bauwerke
CC 3 Kategorie 1 gemäß [1]	hohe Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für sehr viele Men- schen, große Um- weltschäden)	insbesondere: Versammlungsstätten für mehr als 5000 Personen	Stadien, Kongresshallen, Mehrzweckarenen
CC 2 Kategorie 2 gemäß [1]	mittlere Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für viele Menschen, spürbare Umwelt- schäden)	bauliche Anlagen mit über 60 m Höhe Gebäude und Gebäudeteile mit Stützweiten größer 12 m und/oder Auskragungen größer 6 m sowie großflächige Überda- chungen  exponierte Bauteile von Gebäu- den, soweit sie ein besonderes Gefährdungspotenzial beinhalten	Hochhäuser, Fernsehtürme  Bürogebäude, Industrie- und Gewerbe- bauten, Kraftwerke, Produktionsstätten, Bahnhofs- und Flughafengebäude, Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Museen, Krankenhäuser, Kinos, Theater, Schulen, Diskotheken, Sporthallen aller Art, z. B. für Eislauf, Reiten, Tennis, Radfahren, Leichtathletik  große Vordächer, angehängte Balkone, vorgehängte Fassaden, Kuppeln
CC 1	geringe Folgen (Sach- und Vermö- genschäden, geringe Umwelt- schäden, Risiken für einzelne Menschen)	robuste und erfahrungsgemäß unkritische Bauwerke mit Stütz- weiten kleiner 6 m  Gebäude mit nur vorübergehen- dem Aufenthalt einzelner Men- schen	Ein- und Mehrfamilienhäuser landwirtschaftlich genutzte Gebäude

Abbildung 2.3: Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Bei-  
spielen [e.V08]

		Honorarzonen nch HOAI		
		HZ I/II	HZ III	HZ IV/V
Consequence Classes	CC 1	1	1	2
	CC 2	1	2	3
	CC 3	2	3	3

Abbildung 2.4: Ermittlung der Gefährdungsklasse

## 2.2 Tragwerksentwurf und Vorbemessung

Entsprechend der Anforderungen aus der Gefährdungsklasse (vgl. Tab. 2.2) wird ein Tragkonzept entwickelt und die Vorbemessung durchgeführt.

Gefährdungsklasse	notwendiger Umfang der Vorbemessung
GK 1/2	Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung in üblicher Weise
GK 3	Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall).

Tabelle 2.2: Umfang der Vorbemessung in Abhängigkeit der Gefährdungsklasse

## 2.3 Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen

Anhand von Tabelle 2.3 erfolgt die Einteilung des Bauwerks in Robustheitsklassen. Die Robustheitszahl wird nach Tabelle 2.4 bestimmt.

Robustheitsklasse	Robustheitszahl
1	$< -10$
2	$-10$ bis $+10$
3	$> +10$

Tabelle 2.3: Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen

Merkmale	Aussage	trifft zu:				$RZ_i$
		gar nicht	wenig	mittel	viel absolut	
Redundanz Tragwerk	Alternative Lastpfade sind vorhanden	-4	-2	0	+2	+4
	Es liegt ein statisch unbestimmtes Tragwerk vor	-2	-1	0	+1	+2
	lokale Schwächen haben keine großen Auswirkungen	-4	-2	0	+2	+4
Redundanz Verbindungen	Die Verbindungen tragen auch wenn einzelne Verbindungsmittel ausfallen	-4	-2	0	+2	+4
	Die Verbindungen können auch Lasten aufnehmen, die durch das Anspringen alternativer Lastpfade hervorgerufen werden	-4	-2	0	+2	+4
	Die Bauteile haben eine ausreichende Duktilität, so dass ein Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden kann	-8	-4	0	+4	+8
Sicherheit der Bauteile	Es sind keine Bauteile vorhanden, bei denen mit einer erhöhten Ausfallgefährdung zu rechnen ist	-8	-4	0	+4	+8
Wartungs-freundlichkeit	Wartungsrelevante Bauteile und Anschlüsse sind gut zugänglich und gut überwachbar	-6	-3	0	+3	+6
					Robustheitszahl $RZ = \sum RZ_i$	

Tabelle 2.4: Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken

## 2.4 Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen

In Abhängigkeit der Gefährdungsklasse und der Robustheitsklasse erfolgt die Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen (vgl. Abb. 2.5). Diese legen den Umfang fest, mit dem eine FMEA durchgeführt werden muss (vgl. Tab. 2.5 und 2.6). Eine schematische Darstellung der Ermittlung der Klassen eines Bauwerks ist in Abbildung 2.6 gegeben.

		Robustheitsklasse		
		RK 3	RK 2	RK 1
Gefährdungsklasse	GK 1	1	2	3r
	GK 2	2	2	3r
	GK 3	3g	3g	4

Abbildung 2.5: Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklassen

FMEA-Klasse	Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung	Anzahl zu erfassender Elemente
1	–	–
2	gering	gering
3g	hoch	gering
3r	gering	hoch
4	hoch	hoch

Tabelle 2.5: Beschreibung der FMEA-Klassen

---

<b>Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung</b>	
gering:	Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, andere Projektbeteiligte können mit einbezogen werden. Normale Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung, Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragelemente. Mittlere Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ).
hoch:	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis, möglichst unter Einbeziehen des Architekten, Prüfsingenieurs, des Bauleiters der ausführenden Firma und evtl. des Bauherrns. Umfangreiche Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bereits im Vorfeld der Sitzung Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall). Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung aller Tragelemente. Niedrige Grenze für Risikoprioritätszahl RPZ.

---

<b>Anzahl zu erfassender Elemente</b>	
gering:	Beschränkung auf kritische Bauteile
hoch:	alle wesentlich am Lastabtrag beteiligten Bauteile berücksichtigen

---

Tabelle 2.6: Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“



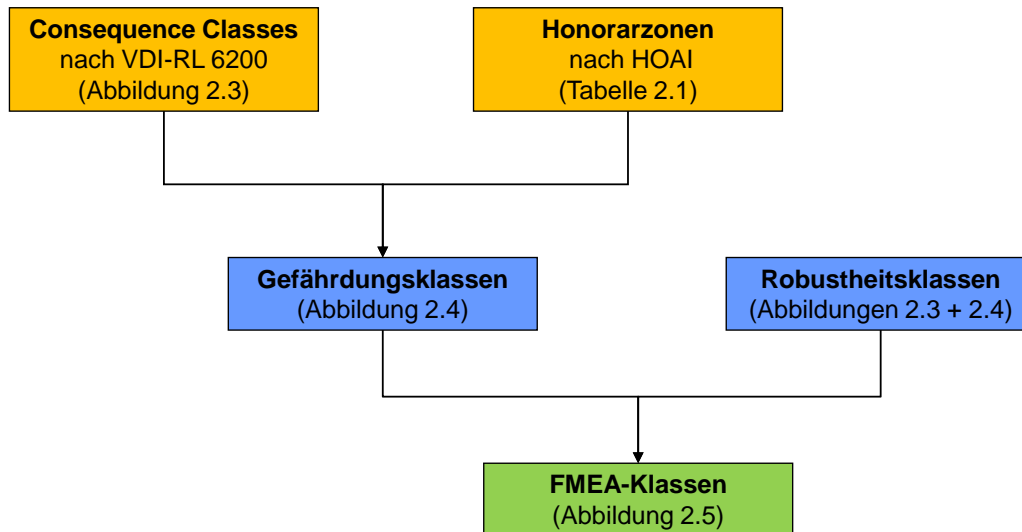


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Klassen eines Bauwerks

## 2.5 Darstellung des globalen Lastabtrags

Entsprechend den Anforderungen aus der FMEA-Klasse werden entweder alle oder nur die wesentlichen Elemente des Tragwerks in einer „Dartellung des globalen Lastabtrags“ dargestellt. Darin wird der Lastfluss innerhalb eines Tragwerks von Bauteil zu Bauteil durch Pfeile visualisiert. Anhand dieser soll die Auswirkung von Fehlern auf weiterführende Bauteile und somit die Bedeutung der Fehler auf Tragwerksebene sichtbar gemacht werden. Ein Beispiel hierfür ist in den Abbildungen 2.7 und 2.8 gegeben.

## 2 Vorgehensweise Tragwerk-FMEA

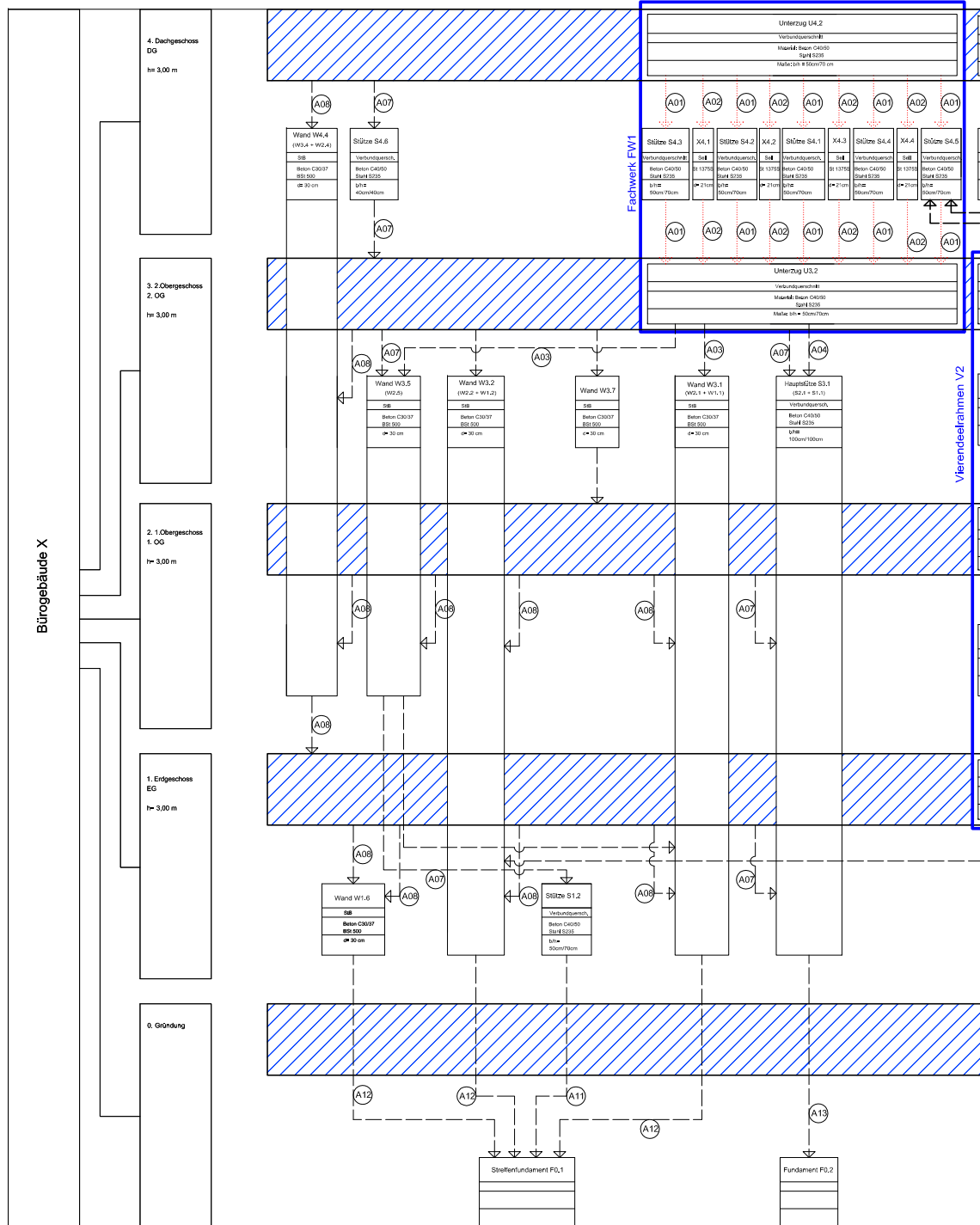


Abbildung 2.7: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph[Vog09]

## 2.5 Darstellung des globalen Lastabtrags

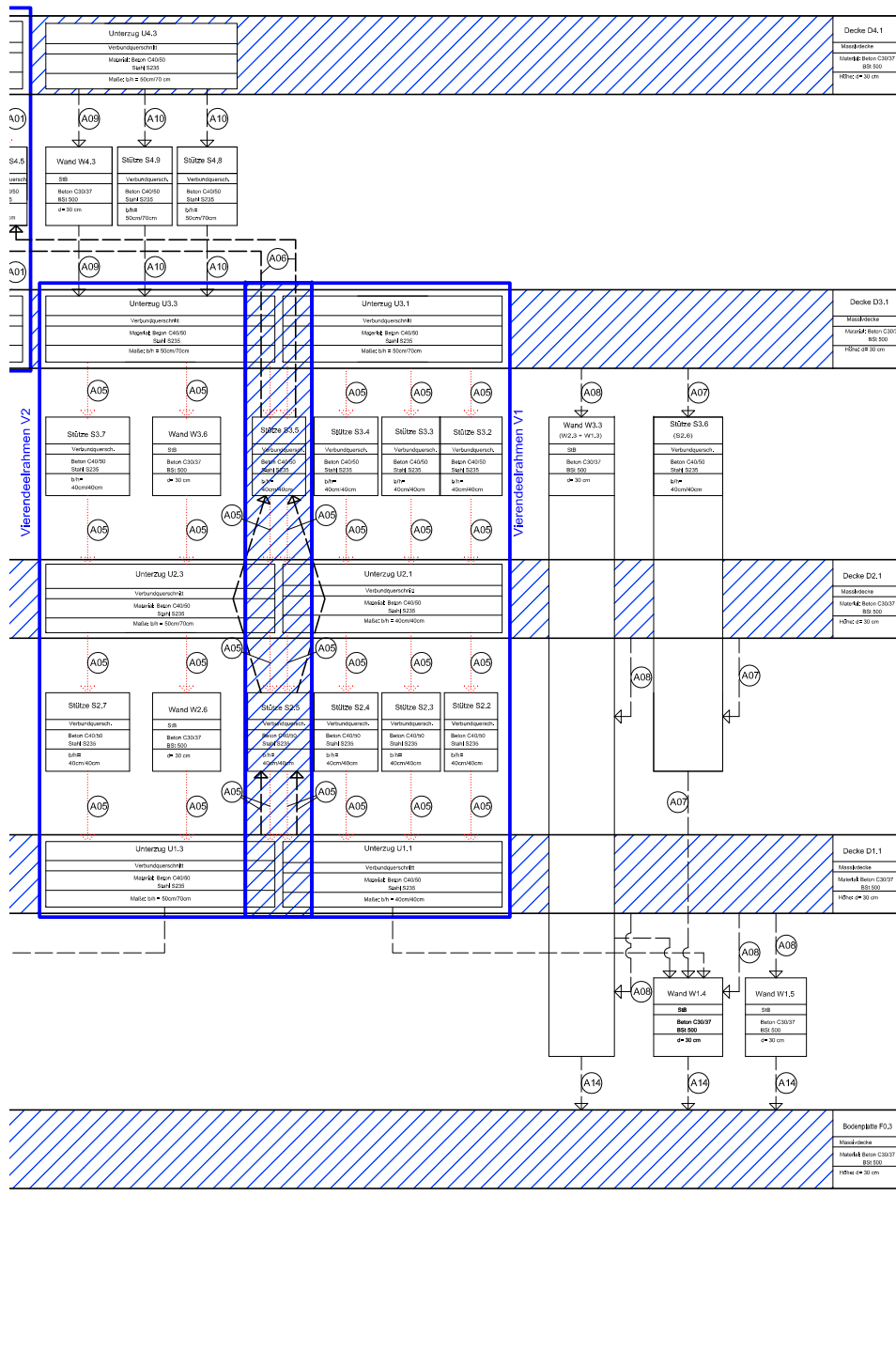


Abbildung 2.8: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph (Fortsetzung) [Vog09]

## 2.6 Fehleranalyse

Im Rahmen einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung werden das Tragwerk und die einzelnen Bauteile und Anschlüsse auf mögliche Fehler, die auftreten können, untersucht.

Die Sitzung findet, entsprechend den Anforderungen aus der FMEA-Klasse, entweder bürointern oder in einem erweiterten Teilnehmerkreis statt (vgl. Tab. 2.6). In Tabelle 2.7 werden die beiden genannten Teilnehmerkreise genauer definiert.

Für die aufgefundenen möglichen Fehler (Fehlerarten) werden mögliche Fehlerursachen sowie Fehlerfolgen gesucht und dokumentiert. Zur Unterstützung dieses Prozesses werden in den nächsten Abschnitten Hilfsmittel in Form von Fehlerkategorien, Beispielen für Fehlerursachen und einem Fehlerkatalog vorgestellt.

---

### **bürointerner Teilnehmerkreis**

---

- Tragwerksplaner, der statischen Entwurf erstellt und Vorbemessung durchgeführt hat
  - Verantwortlicher des Projekts (Vorgesetzter des Tragwerksplaners)
  - Konstrukteur
  - andere bürointern am Projekt Beteiligte
- 

### **zusätzlich im erweiterten Teilnehmerkreis**

---

- Prüfsingenieur
  - Architekt
  - Bauleiter der ausführenden Firma
  - andere am Projekt Beteiligte (z.B. Bodengutachter)
  - evtl. Bauherr
- 

Tabelle 2.7: Definition des bürointernen und erweiterten Teilnehmerkreises an einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

## 2.7 Risikobewertung

Die Bewertung des Risikos, welches durch mögliche Fehler hervorgerufen wird, erfolgt durch die Teilnehmer der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im Konsens. Das vorhandene Risiko wird durch die Risikoprioritätszahl (RPZ) beschrieben, die sich aus folgenden drei Bewertungskriterien zusammensetzt:

- **Bedeutung der Fehlerfolge** nach Tabelle 2.8
- **Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache**  
Wird anhand der vorhandenen Erfahrung der Beteiligten mit einem bestimmten Bauteil und der erwarteten Bauteilqualität in Abhängigkeit des Herstellungsortes wird eine Bauteilkategorie nach Abbildung 2.9a bestimmt. Zusammen mit dem errechneten Ausnutzungsgrad des Bauteils ergibt diese eine bauteilbezogene Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit nach Abbildung 2.9b. Diese ermittelte Zahl entspricht einem „Tendenzwert“, eine genaue Festlegung erfolgt durch die Sitzungsteilnehmer.
- **Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers bzw. der Fehlerursache**  
In Abhängigkeit der Honorarzone und der ermittelten FMEA-Klasse wird eine tragwerksbezogene Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit ermittelt (vgl. Abb. 2.10). Auch diese entspricht einem „Tendenzwert“, eine genaue Festlegung erfolgt durch die Sitzungsteilnehmer.

Die Bewertung erfolgt durch Zahlen zwischen 1 („geringes Risiko“ bzw. „gut“) und 5 („hohes Risiko“ bzw. „schlecht“). Die RPZ errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen, also  $RPZ = B \cdot A \cdot E$ . Sie liegt somit im Bereich zwischen 1 und 125. Eine schematische Darstellung des Bewertungssystems kann Abbildung 2.11 entnommen werden.

Beschreibung der Fehlerfolgen	Bewertungszahl
-Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5
- große Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet, - keine (wirtschaftliche) Instandsetzung durchführbar	4
- mittlere Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Tragfähigkeit ist eingeschränkt, - Instandsetzung zur Gewährleistung der Tragfähigkeit mit mittlerem Aufwand verbunden	3
- geringe Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Tragfähigkeit kaum beeinträchtigt - kleinere Instandsetzungsmaßnahmen notwendig	2
keine Beeinträchtigung des Tragwerks oder eines Teilsystems	1

Tabelle 2.8: Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers

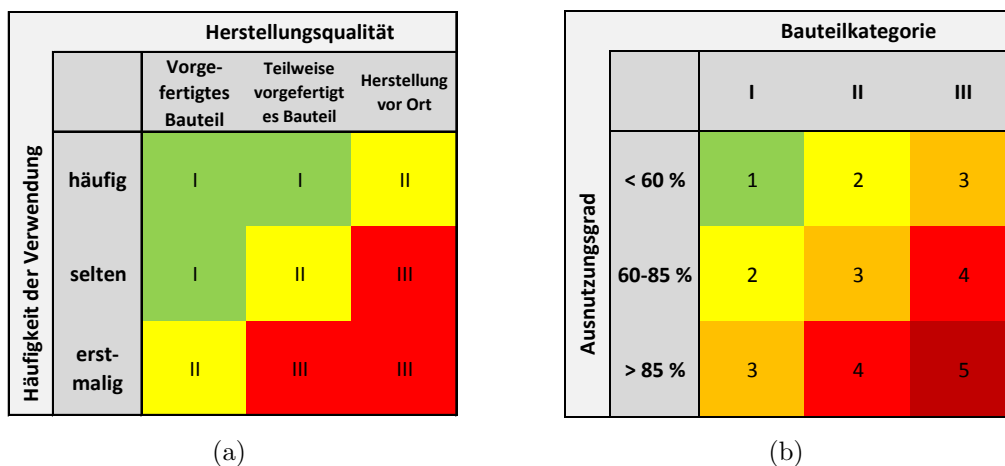


Abbildung 2.9: (a) Ermittlung der Bauteilkategorie; (b) Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

		FMEA-Klasse		
		4	3g/r	2/1
Honorarzone	HZ I/II	1	2	3
	HZ III	2	3	4
	HZ IV/V	3	4	5

Abbildung 2.10: Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

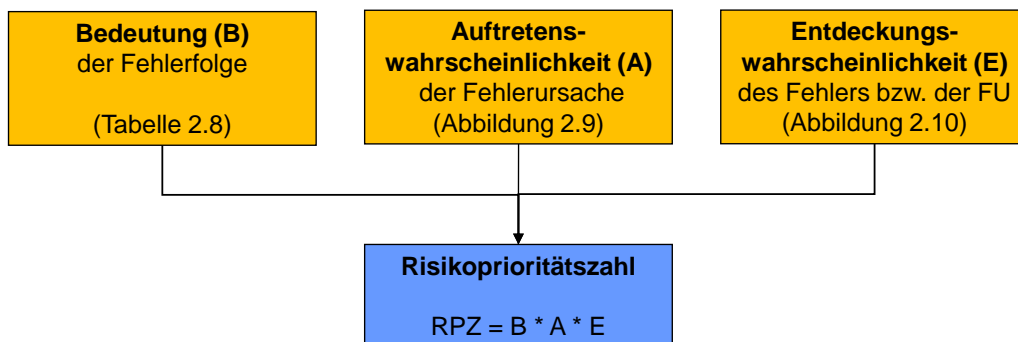


Abbildung 2.11: Ermittlung der Risikoprioritätszahl in Abhängigkeit der Bewertungszahlen

## 2.8 Optimierung

Wenn eine ermittelte RPZ eine vorgegebene Risikoschranke überschritten hat, wird eine Optimierung durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen erforderlich. Dies können zum einen Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache und zum anderen Maßnahmen zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache sein. Durch das Ergreifen von Maßnahmen wird daraufhin, je nachdem welcher Bereich verbessert wurde, die zugehörige Bewertungszahl reduziert. Wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden können oder die festgelegten Maßnahmen nicht ausreichen, so kann der Wert RPZ auch durch ein verändertes Tragwerkskonzept reduziert werden. Eine Auswahl möglicher Entdeckungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Fehlerkategorien ist in Tabelle 2.11 gegeben.

## 2.9 Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Optimierung werden sorgfältig in Formblättern (vgl. Abb. 2.12) dokumentiert. Für jede der festgelegten Maßnahmen wird ein Verantwortlicher bestimmt, der für die Umsetzung zuständig ist. Auch ein Termin für die Durchführung ist festzulegen.

Wenn in der Sitzung wichtige Punkte festgestellt wurden, die in den nachfolgenden Projektphasen beachtet werden sollten, sind diese in Form von *Hinweisen für nachfolgende Projektphasen* zu dokumentieren. Diese Hinweise sowie *Informationen über kritische Stellen* werden dann den für die Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie den für die Bauausführung zuständigen Ingenieuren ausgehändigt, damit diese weiter verfolgt werden können.



<b>Bauteil / Anschluss</b>										
<b>Funktion</b>										

**Bewertung der Fehler:**  
 - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)  
 - Bedeutung der Fehlerfolge (B)  
 - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin

Abbildung 2.12: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]

## 2.10 Begleitung der weiteren Planung und Ausführung

Während des Planungs- und Ausführungsprozesses treten häufig Änderungen auf, sei es durch Planungsänderungen des Architekten oder die Umsetzung von Alternativvorschlägen der ausführenden Firma. Wenn solche Änderungen auftreten, müssen diese nachträglich in die FMEA eingearbeitet werden. Ab einem gewissen Umfang ist eine erneute Fehleranalyse- und Optimierungssitzung erforderlich. Darüber hinaus muss überwacht werden, ob die getroffenen Annahmen und Vorgaben in entsprechender Art und Weise umgesetzt werden.

## 2.11 Fehlerkategorien und Fehlerursachen

Um das Auffinden von Fehlern und deren Ursachen zu unterstützen, erfolgt eine Einteilung möglicher Fehlerursachen in Kategorien. Diese beschränken sich derzeit auf die Bereiche Berechnung, Bemessung und Entwurf (vgl. Tab. 2.9).

## 2.12 Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen

Für eine Auswahl typischer Bauteile im üblichen Hochbau wird in Tabelle 2.10 ein Fehlerkatalog mit möglichen Fehlerarten vorgestellt. Dieser kann als Grundlage für die Erstellung von firmeninternen oder auch frei zugänglichen Fehlerkatalogen verwendet werden.

Tabelle 2.11 enthält mögliche Entdeckungsmaßnahmen, die ebenfalls auf die erstellten Fehlerkategorien aufbauen.

<b>Fehlerkategorie</b>	<b>Mögliche Fehlerursachen</b>
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versteckte Kinematiken im Tragkonzept</li> <li>- Unzureichende Aussteifung des Gebäudes</li> <li>- Mangelnde Robustheit, d.h. unzureichende Reserven bei kleineren Bauteilversagen und Sensitivität gegenüber unplanmäßigen Störungen wie nicht eingeplante Anpralllasten oder Explosionen</li> </ul>
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falsch ermittelte Lasten</li> <li>- Nichtberücksichtigung einer maßgebenden Einwirkung</li> <li>- Nichtberücksichtigung der maßgebenden Lastfallkombination</li> </ul>
Fehler in Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fehler bei der Eingabe des Modells</li> <li>- Das Modell entspricht nicht der Realität (z.B. Momentengelenk statt Rotationsfeder,...)</li> </ul>
Fehler in Berechnung und Bemessung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt</li> <li>- Der Tragwiderstand wurde falsch berechnet</li> </ul>
Fehler bei Anschlüssen und Details	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt</li> <li>- Die Details sind nicht ausführbar</li> </ul>

Tabelle 2.9: Mögliche Fehlerursachen (beispielhaft)

<p><b>1. Stütze</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabilitätsversagen (Knicken) [s]</li> <li>- Druckversagen [d/s]</li> <li>- Zugversagen (Zugstütze) [d]</li> <li>- Biegeversagen [d/s]</li> <li>- zu starke Verformungen [d]</li> <li>- wird verschieblich (selten) [d]</li> <li>- Schubversagen (z.B. kurze Stützen bei Erdbeben) [s]</li> </ul>	<p><b>2. Wandscheibe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Druckversagen (der Druckstrebe) [s]</li> <li>- Zugversagen (im Auflagerber.) [d/s]</li> <li>- zu starke Verformungen [d]</li> <li>- Versagen bei Öffnungen [d/s]</li> </ul>
<p><b>3. Unterzug</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biegeversagen [d/s]</li> <li>- Schubversagen [d/s]</li> <li>- zu starke Verformungen [d]</li> <li>- Versagen bei Öffnungen [d/s]</li> </ul>	<p><b>4. Deckenplatte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zu starke Verformungen [d]</li> <li>- Biegeversagen [d/s]</li> <li>- Schubversagen [d/s]</li> <li>- Versagen bei Öffnungen [d/s]</li> <li>- Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]</li> </ul>
<p><b>5. Wandartiger Träger</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Druckversagen (der Druckstrebe) [s]</li> <li>- Zugversagen (in Zugzone) [d]</li> <li>- Versagen bei Öffnungen [d/s]</li> </ul>	<p><b>6. Bodenplatte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zu starke Verformungen [d]</li> <li>- Schubversagen [d/s]</li> <li>- Versagen bei Öffnungen [d/s]</li> <li>- Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]</li> </ul>
<p><b>7. Fundament</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biegeversagen [d/s]</li> <li>- Schubversagen [d/s]</li> <li>- Versagen einer Zugverankerung (Einleitung der Kräfte) [d/s]</li> <li>- zu geringe Lagesicherheit [d/s]</li> <li>- bei Einzelfundament: Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]</li> </ul> <p>(den Boden betreffende Fehler, wie Grundbruch, werden hier nicht berücksichtigt)</p>	
<p>d = duktileres Materialverhalten s = sprödes Materialverhalten</p>	

Tabelle 2.10: Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Stahlbetonbauteile (beispielhaft)

<b>Fehlerkategorie</b>	<b>Mögliche Entdeckungsmaßnahmen</b>
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	statischen Entwurf auf globaler Ebene auf Tragfähigkeit überprüfen (1. Schritt der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung)
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	Lastermittlung und Lastfallkombinationen überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Checkliste mit allen Einwirkungen</li> <li>- Kontrolle der maßgebenden Lastfallkombinationen, insbesondere an kritischen Stellen</li> </ul>
Fehler in Modellierung	Modell nach Eingabe überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>- erneute Eingabe (Vergleich)</li> <li>- Kontrolle jedes Knotens und Elements</li> <li>- 2. Ingenieur (bürointern)</li> </ul>
Fehler in Berechnung und Bemessung	Schnittgrößenermittlung und Bemessung überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2. Programm oder einfache Handrechnung</li> <li>- 2. Ingenieur (bürointern)</li> <li>- Checkliste mit allen notwendigen Nachweisen</li> </ul>

Tabelle 2.11: Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung (beispielhaft)



# Literaturverzeichnis

- [DIN06] *DIN EN 60812:2006; Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. 2006.
- [Dre09] DRESSEL, B.: *Die Rolle des Prüfindgenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr*. Stahlbau 78, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag:214–220, 2009.
- [e.V08] E.V., VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Herausgeber): *Entwurf der VDI-Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung*. VDI-Gesellschaft Bautechnik, 2008.
- [Var04] VARWIG, J.: *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ), Frankfurt; Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [Vog09] VOGT, T.: *Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien. Projektarbeit*. Universität Kassel, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau (als Download unter [www.tragwerk-fmea.de](http://www.tragwerk-fmea.de)), 2009.