

**Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe  
der modellbasierten Fehlermöglichkeits- und  
Einflussanalyse (FMEA)**

von

**cand. Ing. Dominik Liening**

**Matr.-Nr. 15169019**

betreut von

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Falk**

(Hochschule Ostwestfalen-Lippe)

**Dr.-Ing. Alexander Steffens**

(WTM Engineers)

Diese Diplomarbeit wurde erstellt mit freundlicher Unterstützung von:



WTM Engineers GmbH  
Beratende Ingenieure im Bauwesen

Ballindamm 17, 20095 Hamburg

und

**Hochschule Ostwestfalen-Lippe**  
*University of Applied Sciences*

Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Fachbereich Bauingenieurwesen

Emilienstraße 45, 32756 Detmold



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Hamburg, den 13. August 2009

---

(Unterschrift)

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1</b>	<b>Einführung..... 2</b>
1.1	Stand der Technik ..... 2
1.2	Ziele der Arbeit ..... 3
<b>2</b>	<b>Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)..... 4</b>
2.1	Geschichtliche Entwicklung ..... 4
2.2	Zielsetzung ..... 4
2.3	Erläuterung der Methode ..... 4
2.3.1	System-FMEA..... 5
2.3.2	Konstruktions-FMEA..... 6
2.3.3	Prozess-FMEA..... 6
2.4	Durchführung einer Fehleranalyse ..... 6
2.4.1	Organisation/Team ..... 6
2.4.2	Strukturierung und Funktionsanalyse ..... 8
2.4.3	Ausfallarten, Ausfallursachen und Ausfallwirkungen ..... 10
2.4.4	Risikoanalyse und Risikobeurteilung..... 12
2.4.5	Verbesserungen in System einbinden und erneute Risikoanalyse ..... 21
2.5	FMEA-Formblatt ..... 22
<b>3</b>	<b>Anwendung der FMEA auf das „Bürogebäude X“ ..... 25</b>
3.1	Allgemeine funktionale Beschreibung ..... 25
3.1.1	Positionspläne ..... 26
3.2	Funktionsanalyse..... 29
3.3	Systembaum..... 29
3.3.1	Schritte zur Erstellung des Systembaumes..... 32
3.4	Ausfallanalyse ..... 35
3.4.1	Liste möglicher Fehlerarten ..... 37
3.4.2	Bewertung..... 38
3.4.3	Auswertung..... 52
3.4.4	Beurteilung der Robustheit..... 53
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung ..... 54</b>
<b>5</b>	<b>Fazit..... 55</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Stand der Technik

Wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen stellen heutzutage immer höhere Ansprüche an die Konstruktionen im Bauwesen. Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und die Ästhetik von Tragwerken stehen dabei oftmals in Konkurrenz zum höher werdenden Kosten- und Zeitdruck. Dadurch hat der Einsatz von EDV-Berechnungen in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Komplexität des Computermodells und die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse scheinen dabei nur noch von der Rechenleistung der Computer abhängig zu sein. (1) Diese Entwicklung bringt aber nicht nur Vorteile, sondern auch einige Nachteile mit sich. So nimmt das Verständnis für das Tragverhalten ganzer Konstruktionen ab und die Größe der Ergebnisdatenbanken nimmt unüberschaubare Ausmaße an. Fehler in der Systemeingabe und der dadurch entstehenden Fehler in den Ergebnissen sind immer schwieriger zu finden.

Mit dem „Vieraugenprinzip“ hat der Gesetzgeber in den Landesbauordnungen (2) ein Modell der Qualitätssicherung verankert mit dem Fehler in der Planungsphase aufgedeckt und behoben werden sollen. Mangelnde oder nicht ausreichende Selektion von Daten erschwert dem Prüfstatiker jedoch die Arbeit. Statische Annahmen, Bewertung des Statikers, die Eingabe des Systems und die Ergebnisse können aus Zeitgründen oft nur mittels einfacher Hilfssysteme kontrolliert werden. Die Einflüsse komplexer Systeme und deren vielseitige Wechselwirkungen werden nur vereinfacht dargestellt.

Aber nicht nur für die Standsicherheit, sondern auch für die Baukosten, ist das frühzeitige Erkennen von Fehlern wichtig! Dabei ergeben sich die größten Einsparpotenziale dadurch, dass die Fehler in der Wertschöpfungskette so früh wie möglich erkannt und abgestellt werden. Dieser Sachverhalt wird in der bekannten „10er Regel“ (siehe Abb. 1.1) dargestellt. Diese Erfahrungsregel aus dem Qualitätsmanagement besagt, dass die Kosten der Fehlervermeidung bzw. der Fehlerbehebung von Wertschöpfungsgrenze zu Wertschöpfungsgrenze um den Faktor 10 steigt. So sind z. B. die entstehenden Kosten zur Fehlervermeidung zehnmal höher, wenn Fehler in der Entwicklungsphase gemacht, aber erst in der Arbeitsvorbereitung entdeckt werden (3).

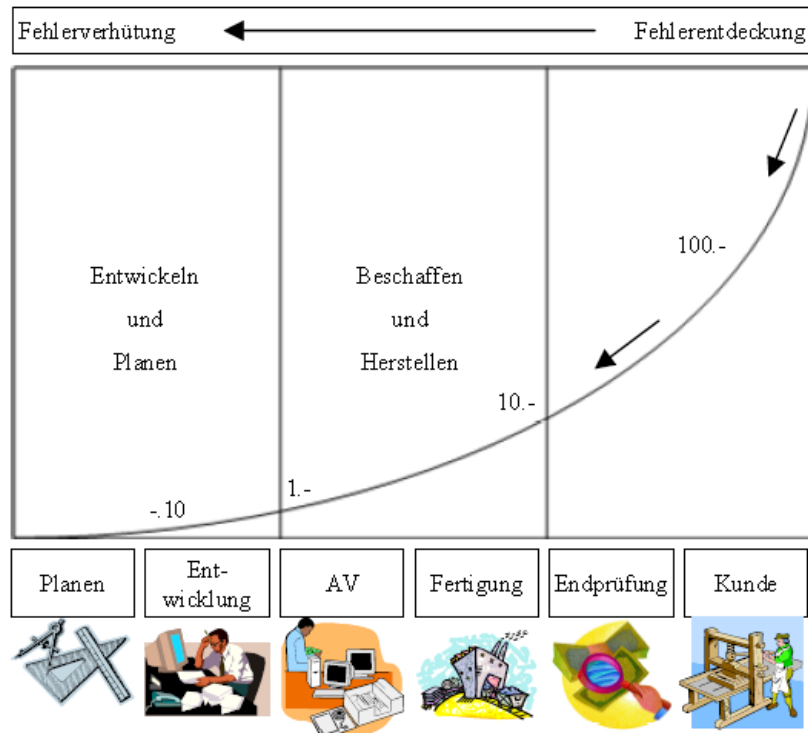


Abb. 1.1: Zusammenhang zwischen Phasen der Fehlerverursachung und den Fehlerkosten (aus (3))

### 1.2 Ziele der Arbeit

Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Problematik bringt das Bedürfnis nach einer neuen oder modifizierten Art der Qualitätssicherung im Bauwesen. Ein in vielen Industriezweigen bekanntes und erfolgreich angewendetes Mittel zur Vermeidung von Fehlern bereits in der Planungsphase stellt die „Failure Mode and Effects Analysis“, im deutschen Sprachgebrauch als Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) bekannt (die offizielle Bezeichnung aus der DIN EN 60812 lautet: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse), dar.

Mit dieser Diplomarbeit soll die Anwendbarkeit einer System-FMEA auf Tragwerke im Konstruktiven Ingenieurbau nach dem Vorbild der DIN EN 60812 geprüft werden, die die DIN 25448:1990-05 ersetzt. Dabei soll nicht nur eine mögliche Form der FMEA theoretisch erarbeitet, sondern deren praktische Durchführbarkeit auch an einem Tragwerk untersucht werden.

## 2 Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)

### 2.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Geschichte der FMEA beginnt, wie viele andere Systeme die heute in den verschiedensten Bereichen Anwendung finden, in den Entwicklungsabteilungen der NASA. Diese erkannte das Potenzial der FMEA und verwendete sie in den 1960er Jahren zur Erhöhung der Sicherheit in den Apollo-Raumfahrtprogrammen. (3) Gerade in Bereichen mit hohem Sicherheitsniveau, wie in der Luft- und Raumfahrt Industrie, dem Automobilbau, der Medizin, der Chemie- oder der Kernenergie fand die Methode bald darauf Anwendung. (4) Heute kommt die FMEA in modifizierter Form in vielen Bereichen des Produzierenden Gewerbes und des Dienstleistungssektors zum Einsatz. 1980 wurde die Methode als „Ausfalleffektanalyse“ zum ersten Mal in die DIN 25448 übernommen. (3)

### 2.2 Zielsetzung

- Umfassende Analyse des Tragwerks, der Systemteile und ihrer funktionalen Zusammenhänge und Robustheit
- Erkennung von Fehlerpotenzialen und Risikobereichen schon in der Entwicklungs- und Planungsphase
- Vermeidung von Wiederholungsfehlern
- Wichtung der Risikopotenziale
- Verbesserung der Qualität und Erhöhung der Standsicherheit
- Strukturierte Dokumentation des Systems zur einfacheren Änderung der Konstruktion
- Senkung der Planungs-, Bau- und Gewährleistungskosten, da Fehler im Tragwerk schon in der Planungsphase erkannt werden
- Vermeidung von Imageverlust

### 2.3 Erläuterung der Methode

Die Fehlzustandsart- und –auswirkungsanalyse (FMEA) ist ein systematisches Vorgehen bei der Analyse eines Systems, um mögliche Fehlzustandsarten, ihre Ursachen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten zu ermitteln (5). Der Grundgedanke wird für die Ingenieure im Bauwesen nicht gänzlich neu sein. Die Methode soll vielmehr eine Hilfe sein, die Gedankengänge und Bewertungen der Planer, die sie auch jetzt schon in ihrer täglichen Arbeit begleiten, zu strukturieren und

in geeigneter und nachvollziehbarer Art und Weise zu dokumentieren. Gerade das kann nicht nur erfahrenen Ingenieuren Zeit ersparen, da sie sich nicht jedes Mal aufs neue in ein System hinein denken müssen. Besonders für Jungingenieure kann es eine große Hilfe darstellen, Systeme und ihr Tragverhalten zu verstehen, was sich wiederum positiv auf die Erkennung möglicher Risikobereiche niederschlägt.

Der FMEA-Anwendung geht eine hierarchische Zerlegung des Systems (...) in seine wichtigsten Grundbestandteile voraus (5). Dabei werden aus dem Tragwerk Teilsysteme gebildet, die dann wieder die Grundlage für eine weitere Zerlegung in Elemente darstellt. Durch eine schematische Analyse des Tragwerks kann so eine Ursache-Wirkungs-Kette von der untersten Ebene des Systems bis zur obersten Ebene erstellt werden. Eine allgemeingültige Aussage zu treffen, wie die Teilsysteme aussehen, wird im Bauwesen nicht möglich sein. Die Vielfalt der Tragsysteme und ihrer Wechselwirkungen ist dafür zu groß. Daher ist es die Aufgabe des Ingenieurs sinnvolle Zusammenhänge zu erkennen und die Teilsysteme dementsprechend zu bilden.

Die Durchführung von FMEA's erfolgt in Teamarbeit, da nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit alle anforderungsrelevanten Aspekte berücksichtigt werden können (5). Die Verantwortlichen jeder Arbeitsgruppe bilden zusammen ein Kernteam, welches bei Bedarf durch Experten aus anderen Bereichen erweitert werden kann. Die Treffen des Kernteams werden von einem erfahrenen Moderator geleitet. Aufgabe des Kernteams ist es, die Systemschnittstellen und Beanspruchungen zu vereinbaren, Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgruppen zu präsentieren, sowie In- und Output der verschiedenen Systeme weiter zu reichen.

Abhängig von den verschiedenen Planungs- und Ausführungsphasen eines Bauvorhabens können verschiedene Arten der FMEA eingesetzt werden, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen und aufeinander aufbauen.

### **2.3.1 System-FMEA**

Bei der System-FMEA wird das Zusammenwirken verschiedener Teilsysteme auf ein übergeordnetes System untersucht. Besonderer Augenmerk liegt dabei auf der Wechselwirkung von Systemteilen und potenzieller Schwachstellen an den Systemschnittstellen. Dabei wird keine genauere Untersuchung geführt, aus welchen Gründen das Bauteil versagt. So werden beim Ausfall eines Auflagers, z. B. in Form einer Stütze unter einem mehr feldrigen Betonbalken, die Auswirkungen des Ausfalls auf die anderen Auflager und den Balken selber untersucht.

### 2.3.2 Konstruktions-FMEA

Die Konstruktions-FMEA verfolgt das Ziel, die Teilsysteme hinsichtlich der Erfüllung ihrer Funktion zu untersuchen. Dabei wird gezielt nach möglichen Ausfallarten und Ausfallursachen des Teilsystems gesucht. Eine zu gering gewählte Bewehrung eines Balkens aus Beton kann u. a. vom Verlust der Gebrauchstauglichkeit bis hin zum Ausfall des Bauteils führen.

### 2.3.3 Prozess-FMEA

Bei der Prozess-FMEA wird nicht mehr das Tragwerk in seiner Funktion untersucht sondern welche Fehler bei der Herstellung der Teilsysteme oder Elemente entstehen können. Im Bauwesen kann z. B. ein nicht korrekt verdichteter Beton zur Entmischung der Bestandteile und damit zu einer verminderten Tragfähigkeit führen.

Letztlich ergeben alle FMEA's eines betrachteten Systems, gemäß der systematischen Gliederung des Verlaufs, ein zusammenhängendes Gebilde (4).

## 2.4 Durchführung einer Fehleranalyse

### 2.4.1 Organisation/Team

Eine FMEA sollte entwurfsbegleitend durchgeführt werden, um die Entwicklungsschritte des Tragwerks nachvollziehbar zu Dokumentieren und Planungsfehler von Anfang an zu minimieren. Es bietet sich an, die erste Sitzung des FMEA-Teams nach Fertigstellung der Entwurfsphase durchzuführen. Zu diesem Zeitpunkt steht das erste statische Konzept und es liegen erste Erkenntnisse über das Tragverhalten des Systems vor. Die Betrachtungstiefe sollte dabei sinnvoll an den aktuellen Planungsstand angepasst werden. In der ersten Entwurfsphase, in der das grobe Design und das Tragsystem festgelegt werden, wird es nicht zielführend sein, eine vollständige Konstruktions-FMEA zu erstellen. An kritischen Systemteilen kann sie aber durchaus helfen das Risiko, welches von dem betrachteten Systemelement ausgeht, genauer zu bestimmen um frühzeitig Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos vorzunehmen.

Die Durchführung einer FMEA erfolgt in Teamarbeit. Das FMEA-Team setzt sich dabei aus Mitarbeitern der verschiedenen Fachgebiete, die das Bauwerk betreffen zusammen. Nur dadurch kann sicher gestellt werden, dass alle Planungsrelevanten Risiken betrachtet werden. Jedes Team ernennt einen Verantwortlichen aus ihren Reihen der einem Kernteam angehört. Dabei kann es bei Bedarf zusätzlich von

externen Experten unterstützt werden die weitere Erfahrungen in das Team einbringen können und fachspezifische Fragen klären. (4)

Die Sitzungen des Kernteams werden von einem Mitarbeiter geleitet, der die Kunst der Moderation beherrscht (z. B. der Projektleiter) der u. a. die Aufgabe hat die Teamsitzungen soweit vorzubereiten, dass diese zügig und reibungslos abgehalten werden können, zudem koordiniert er die Arbeit der verschiedenen Teams untereinander. Zusätzlich ist er für die „Termin- und Ergebnisplanung incl. Fortschrittsverfolgung“ (4) verantwortlich und stellt die Dokumentation der Ergebnisse sicher. Das Kernteam hat die Aufgabe wichtige Parameter zur Durchführung der FMEA festzulegen. Darunter zählen die Belastungen, die auf das System wirken, die klare Festlegung von Systemgrenzen inkl. aller Randbedingungen, die das betrachtete Teilsystem betreffen, und Schnittstellen welche die verschiedenen Teilsysteme miteinander verbinden.

Zu Beginn der ersten Teamsitzung in einem Projekt sollte der Ersteller des Tragwerksmodells eine kurze Einführung in die Systemstruktur geben, um den anderen Teammitgliedern einen leichteren Einstieg in die Funktionsweise des Systems zu geben. Dann sollte dieser das Wort an den Moderator übergeben. Auch wenn es zu Beginn sinnvoll erscheint, dass der Ersteller der Systemstruktur auch die Moderation der Teamsitzung übernimmt, da dieser sich eingehend mit dem System auseinandergesetzt hat, wird an dieser Stelle davon abgeraten. Würden Fehler im System gefunden würde dieser von Natur aus eine sich verteidigende Haltung annehmen. Übergibt er die Aufgabe der Moderation an eine andere Person, fällt es ihm leichter, sich selbst noch einmal kritisch mit dem System auseinanderzusetzen. Dadurch wird zudem einem allgemeinen Problem der Ingenieure entgegengewirkt, die eigene Fehler lieber verschweigen als sich Fehler einzugestehen, und diese in einem Team zu reflektieren.

Um einen reibungslosen Ablauf der Teamsitzungen sicher zu stellen, erfordert es einer gründliche Vorbereitung der Teammitglieder. Ergebnisse der Arbeit sollten klar strukturiert und nachvollziehbar dokumentiert werden. Das erleichtert die Präsentation der Ergebnisse und die Weitergabe von Ergebnissen an die anderen Arbeitsgruppen.

### 2.4.2 Strukturierung und Funktionsanalyse

#### 2.4.2.1 Strukturbeschreibung

Die Systemstruktur spiegelt die Funktionsweise des gesamten Systems wieder. Es ist wichtig, die Gliederungsebenen in dem System, das für eine Analyse verwendet wird, festzulegen. Beispielsweise können Systeme nach Funktion oder in Teilsysteme, austauschbare Einheiten oder einzelne Bauteile zergliedert werden (5). Bei der Wahl der Struktur werden daher die Weichen für die weitere Betrachtungsweise gestellt. Es ist wichtig, sich am Anfang der Planungsphase genau mit dem System und dem Tragverhalten auseinanderzusetzen. Es kann sinnvoll sein, die Systemstruktur nach dem Verlauf der Kräfte im System zu bilden, da dadurch eine Ursache-Wirkungs-Kette mit direkten Auswirkungen auf die nächst höhere Betrachtungsebene dargestellt werden kann. Die Systemstruktur sollte durch logische Verknüpfungen zwischen den sich beeinflussenden Bestandteilen dargestellt werden. Um die Bedeutung der einzelnen Systembestandteile in der gesamten Systemstruktur zu erkennen, können neben den Charakteristika (z. B. Materialeigenschaften) auch die Funktionen und Leistungen beschrieben und definiert werden, die übernommen werden sollen. Dabei kann es sich um die Weiterleitung von Normalkräften in die nächste Systemebene oder die Aufnahme und Weiterleitung von Schub durch Windbelastungen in einer Wandscheibe handeln. Diese Betrachtungsweise hilft, die einzelnen Systemteile im Zusammenspiel mit anderen einzuordnen und nachzuvollziehen, welche Auswirkungen ein Ausfall einer bestimmten Funktion auf die nächst höhere Systemebene haben kann. Dafür ist es wichtig, die Eingangs- und Ausgangsschnittgrößen zu kennen und diese anzugeben. Zudem kann es sinnvoll sein, das Redundanzniveau anzugeben. Für die Ausfallwirkung und die Ausfallfolge ist es wichtig zu wissen, wie hoch Bauteile ausgelastet sind, da der Ausfall eines Systemteils bei hoch ausgelasteten Bauteilen zu einem progressiven Versagen des gesamten Systems führen kann, falls es nicht ausreichend Reserven besitzt. Im Bauwesen können zudem Einflüsse aus verschiedenen Bauzuständen maßgebend für das Systemverhalten werden. Da es wichtig ist alle Bauzustände und die veränderten Systemstrukturen zu berücksichtigen können verschiedene Darstellungen erforderlich sein.

#### 2.4.2.2 Systembegrenzung

Die Systembegrenzung bildet die physikalische und funktionale Schnittstelle zwischen dem System und seiner Umgebung, einschließlich anderer Systeme, mit denen sich das betrachtete System gegenseitig beeinflusst (5). Sie definiert dabei den Bereich, der in der Analyse betrachtet werden soll und verschärft die Konzentration darauf. Zu eng

Gesetzte Systemgrenzen können die Gefahr mit sich bringen, dass wichtige Einflüsse und Teilsysteme nicht Berücksichtigt werden. Daher ist es sehr wichtig, die Schnittstellen zwischen den Systemen genau zu definieren und Einflüsse aus anderen Systemen zu beschreiben. Zudem sollte „ausdrücklich festgehalten werden, dass sie von der jeweiligen Untersuchung ausgeschlossen sind.“ (5)

### **2.4.2.3 Ebenen der Analyse**

Die Analyseebenen sind ein Anhaltspunkt für die Detailgenauigkeit mit der man ein System betrachtet und richtet sich u. a. nach der Art der FMEA, die gerade untersucht wird, und den Anforderungen an die Ergebnisse. Die höchste Ebene des Systems wird vom Entwurfskonzept und den festgelegten Forderungen an das Ergebnis bestimmt (5). Je nach Art der FMEA kann dies das Tragwerk an sich sein (System-FMEA), ein Bauteil (Konstruktions-FMEA) oder ein ganzer Arbeitsgang (Prozess-FMEA).

Die Wahl der niedrigsten Ebene hängt von verschiedenen Faktoren ab. Eine natürliche Grenze setzt dabei die letzte Ebene, für die eine ausreichende Anzahl von Festlegungen von Definitionen und Beschreibungen von Funktionen vorhanden sind. (5)

Aufgrund des Arbeitsaufwandes muss es aber nicht zwingend zielführend sein, ein System bis in die niedrigste Ebene zu betrachten. Abhängig vom Planungsstand ist es Aufgabe des Ingenieurs sinnvolle Annahmen zu treffen.

### **2.4.2.4 Darstellung**

Für das Verständnis eines Systems kann es hilfreich sein, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Teilsystemen und Systemebenen sowie die Funktionsstrukturen grafisch darzustellen. Dafür sehr gut geeignet ist die Darstellung in einem Systembaum, da bei dieser Form die Ursache-Wirkungs-Kette nachvollziehbar visualisiert werden kann. Verbindungslinien stellen dabei die Beziehungen zwischen den Teilsystemen und Systemebenen dar. (5)

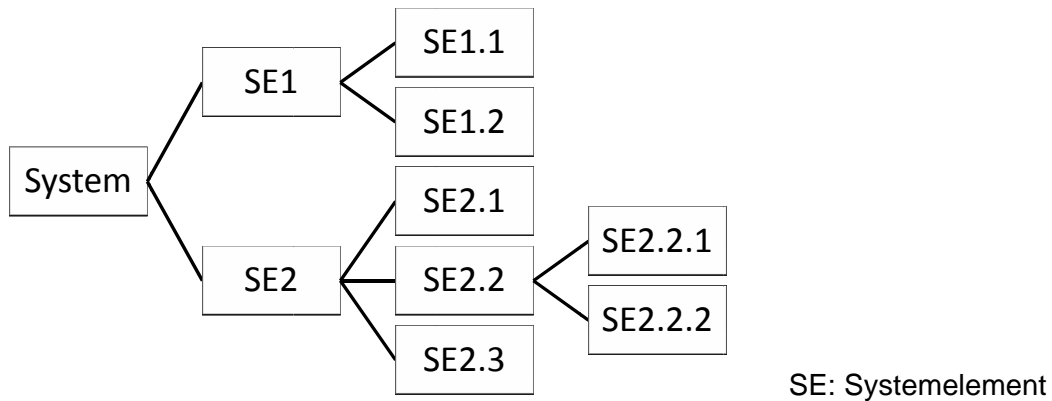


Abb. 2.1: Systembaum (FMEA - FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS: Methodenblatt )

Da die Analyse des Systems in Teamarbeit erfolgt, kann es eine große Hilfe sein, Eingangs- und Ausgangsgrößen der Systemelemente im Systembaum anzugeben.

### 2.4.3 Ausfallarten, Ausfallursachen und Ausfallwirkungen

Ein erfolgreicher Betrieb eines gegebenen Systems hängt von der Leistung kritischer Systemelemente ab. Der Schlüssel zur Beschreibung der Systemleistung ist das Erkennen kritischer Elemente (5). Zwei Fragestellungen können bei der Identifikation dieser Elemente helfen:

- 1) **Was** kann **wie** (Ausfallart), **wo** und **warum** (Ausfallursache) ausfallen?
- 2) **Welche** Auswirkungen hat der Ausfall für das System?

In der FMEA hängt die Definition von Ausfallarten, Ausfallursachen und Ausfallwirkungen von der Ebene der Analyse und von den Systemausfallkriterien ab. Mit Fortschreiten der Analyse können die auf niedriger Ebene festgestellten Ausfallwirkungen auf höherer Ebene Ausfallarten bedingen. Die Ausfallarten auf niedriger Ebene können zu Ausfallursachen auf höherer Ebene werden und so weiter. Wenn ein System in seine Bestandteile zergliedert worden ist, führen die Auswirkungen einer oder mehrerer Ursachen einer Ausfallart zu dieser Ausfallart, die umgekehrt eine Ursache einer Auswirkung auf höherer Ebene, eines Bauteilausfalls, ist. Der Bauteilausfall ist dann die Ursache eines Modulausfalls (Auswirkung), welcher selbst die Ursache für einen Ausfall des Teilsystems ist. Die Auswirkung einer Ursache in einer Systemebene wird so eine Ursache einer anderen Auswirkung auf einer höheren Ebene. Es wird darauf hingewiesen, dass eine gegebene Ausfallart mehrere Ursachen haben kann (5).

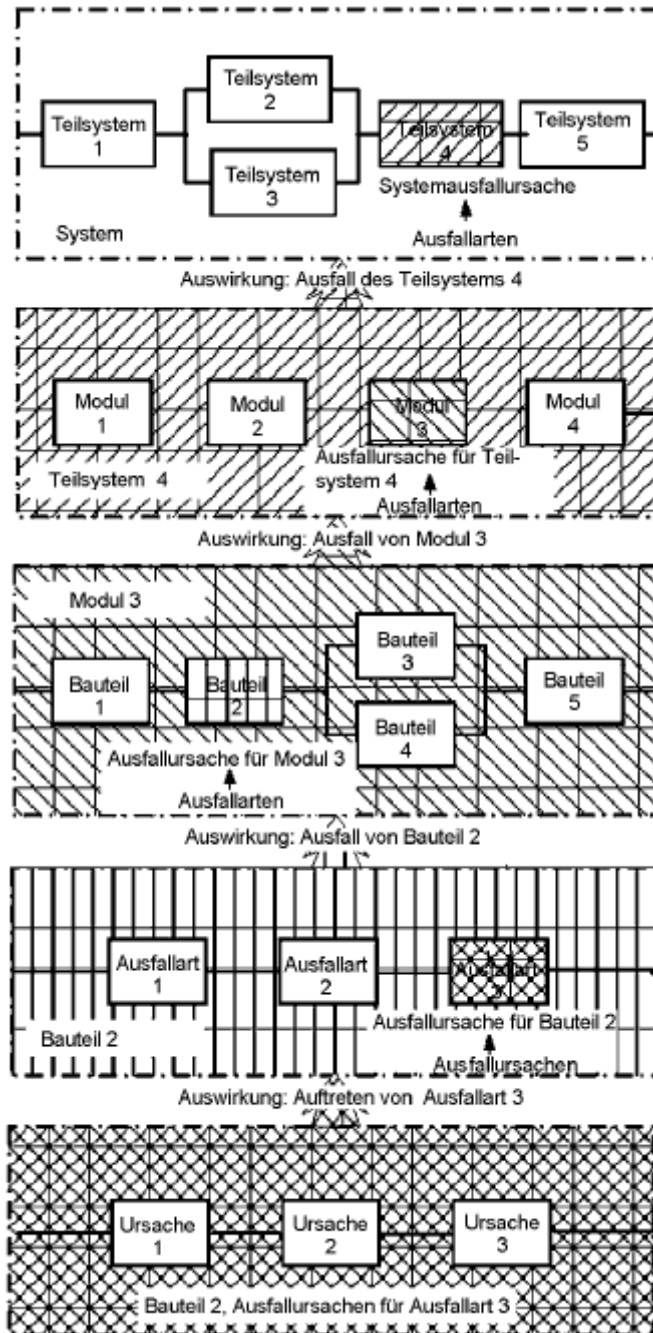


Abbildung 2.2: Zusammenhang zwischen Ausfallarten und Ausfallwirkungen in einer Systemhierarchie (aus DIN EN 60812:2006)

### 2.4.4 Risikoanalyse und Risikobeurteilung

Die Risikoanalyse bildet den Kern einer FMEA. Hierbei wird eine Bewertung der Bedeutung der Auswirkung einer Ausfallart auf den Betrieb der Einheit (5) vorgenommen.

Die Bedeutung erfolgt anhand der 3 Bewertungskriterien:

- Auftreten (A), bei der die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer potenziellen Fehlerursache geschätzt wird
- Bedeutung (B), bei der die Bedeutung der Fehlerfolge für den Kunden oder das System bewertet wird
- Entdeckung (E), bei der die Wahrscheinlichkeit bewertet wird, mit der ein Fehler frühzeitig entdeckt wird, bevor das (Bau-)Teil den Kunden erreicht.

Den drei Bewertungskriterien wird jeweils ein Wert aus einem vorher fest definierten Wertebereich zugewiesen. In der Praxis wird häufig eine Skala von 1-10 verwendet. Bei den Bewertungskriterien Auftreten und Bedeutung heißt „1“, dass die Fehlerursache nicht auftritt, oder dass ein tatsächlich aufgetretener Fehler keine Bedeutung für das System hat. Im Umkehrschluss bedeutet eine „10“, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit sehr hoch ist bzw. ein aufgetretener Fehler äußerst schwerwiegende Auswirkungen auf das System hat. Vorsicht ist bei der Bewertung der Entdeckbarkeit geboten, da diese reziprok zu den beiden anderen Bewertungskriterien vorgenommen wird. So bedeutet die „1“ hier, dass eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, den aufgetretenen Fehler zu entdecken, die „10“ bedeutet wiederum, dass es für die Fehlerart (-ursache) keine Kontrollmöglichkeit gibt somit auch nicht entdeckt wird.

Durch die DIN EN 60812 werden jedoch keine bindenden Vorgaben an den Wertebereich der Skalen gemacht. So werden in der Automobilindustrie oft Zahlenwerte von 1 bis 10 verwendet, es sind aber auch Skalen von 1 bis 4 oder 5 möglich. (5)

Ein großer Wertebereich setzt jedoch sehr genaue Kenntnisse über die einzelnen Kriterien voraus. Bei Massenfertigungen, wie sie z. B. in der Automobilindustrie oder dem Maschinenbau üblich sind, können aufgrund der hohen Stückzahlen mehr und vor allem auch genauere Daten über ein und dasselbe Bauteil ermittelt werden. Ein hoher Grad an maschineller Fertigung wirkt sich positiv auf die Streuungen in der Bauteilqualität aus. Dadurch lassen sich genauere Erkenntnisse über Ausfallursachen,

-wahrscheinlichkeiten, deren Bedeutungen und deren Erkennungswahrscheinlichkeiten ermitteln.

Aufgrund der beschriebenen Problematik ist nur eine subjektive Bewertung der drei Kriterien möglich und sinnvoll. Um dabei eine vorgetäuschte Genauigkeit zu vermeiden, wird an dieser Stelle ein Wertebereich von 1 bis 5 vorgeschlagen.

Es ist darauf zu achten, gleiche Wertebereiche bei den drei Kriterien A, B und E zu verwenden, da es sonst zu einer ungewollten Wichtung und somit zu einer Verfälschung der Prioritätenliste kommt.

### 2.4.4.1 Ausfallwahrscheinlichkeit

Im Ingenieurbau sind die Tragwerke in der Regel Unikate. Erkenntnisse, die bei einem Tragsystem gesammelt werden, können nicht ohne Weiteres auf andere Projekte übertragen werden. Ausfallwahrscheinlichkeiten lassen sich nur auf Grundlage von Baustoffkenngrößen berechnen. In der Erläuterung zur DIN 1055-100 wird an verschiedenen Beispielen gezeigt, wie (mit Hilfe von Baustoffkenngrößen und der Standardnormalverteilung nach Gauß) Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet werden können. (6) Für einzelne Bauteile unter einer Lastkonfiguration ist der Rechenaufwand überschaubar. Tragwerke werden jedoch sowohl durch ständige als auch unterschiedlichste veränderliche Lasten beansprucht. Zudem spielt der Faktor „Mensch“ in der Bauindustrie eine bei Weitem größere Rolle als im Maschinenbau, da eine maschinelle Fertigung von Bauteilen eher die Ausnahme ist. Dieser Einfluss wird in den Berechnungen der Erläuterung zur DIN 1055-100 nicht berücksichtigt und lässt sich nur sehr schwer (und für eine Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit in unzureichender Weise) berechnen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils kann also nur subjektiv bewertet werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass die Bewertungen zum einen zu stark von der Risikobereitschaft des einzelnen abhängen und zum anderen nicht immer nachvollziehbar sind. Erstgenannte Problematik lässt sich dadurch entschärfen, dass die Bewertungen im FMEA – Team besprochen werden und so ein Mittel aller Einzelbewertungen entsteht. Trotzdem muss der Gesetzgeber Rahmenbedingungen schaffen, um Bewertungen zu vereinheitlichen und die Nachvollziehbarkeit zu verbessern.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils hängt besonders von drei Faktoren ab:

**1. Dem Ausnutzungsgrad des Bauteils**

Je höher ein Bauteil ausgenutzt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Planungs- oder Ausführungsfehler zum Überschreiten der zulässigen Beanspruchung führt.

**2. Den Erfahrungen aller Beteiligten mit der Bauteilart**

Je öfter ein Bauteil geplant und gefertigt wird, desto mehr Kenntnisse haben die Beteiligten über mögliche Schwachstellen. (Problem: Steigende Erfahrung kann aber auch zu Nachlässigkeiten und damit zu einem erhöhten Fehleraufkommen führen.)

**3. Von der Art und dem Ort der Herstellung**

Bauteile, die in einem Werk gefertigt werden, haben i. d. R. ein höheres Qualitätsniveau und eine geringere Streuung der Festigkeiten als auf der Baustelle gefertigte Bauteile.

Die Bewertung zur Ausfallwahrscheinlichkeit könnte z. B. wie folgt vereinheitlicht durchgeführt werden:

1. Schritt: Ermittlung einer Bauteilkategorie

Häufigkeit der Verwendung abnehmend ---^	erstmalig	II	III	V	V
	selten	II	III	IV	IV
	häufig	I	II	III	IV
	quasi ständig	I	II	II	III
		Katalog Bauteil	Fertigteil	Halbfertigteil	Ortbauweise
		Herstellungsqualität abnehmend --->			

Abb. 2.3: Matrix zur Ermittlung der Bauteilkategorie

Zu Beginn wird eine Bauteilkategorie ermittelt. Diese ist sowohl von der Häufigkeit, mit der ein Bauteil geplant wird, und von der Herstellungsqualität abhängig und reicht von I

bis V. I bedeutet dabei, dass dieses Bauteil von sich aus ein hohes Qualitätsniveau haben dürfte, da die Materialstreuungen recht klein sind und man dieses Bauteil auch häufig verwendet, wodurch ausreichend Erfahrungen vorhanden sind. In die Bauteilkategorie V ist ein Bauteil einzuordnen, das auf der einen Seite eine relativ hohe Materialstreuung aufweist und der Planer zudem wenig Erfahrungen mit einem Bauteil in dieser Form gemacht hat.

Die Häufigkeit der Verwendung ist nicht genau definiert, da dies ganz von den Beteiligten abhängig ist.

Die einen haben sehr viel Erfahrung mit der Fertigung in Ortbauweise, die anderen dafür bei der Verwendung von Fertigteilen, noch andere verwenden überwiegend Halbfertigteile.

Die Abstufung ist jedoch so gewählt, dass eine Einteilung in die vier verschiedenen Kategorien trotzdem relativ leicht vorgenommen werden kann.

Unter Katalogbauteile fallen Massenprodukte wie Stahlträger und diverse Verbindungsmittel. Bei diesen Bauteilen ist die Streuung der Eigenschaften aufgrund der Massenfertigung und der Materialeigenschaften sehr gering. Zudem werden die Produkteigenschaften durch werksseitige Qualitätsüberprüfungen genau bestimmt. Bauteile, die nicht den Anforderungen entsprechen, werden sofort aussortiert. Die Qualität ist dementsprechend hoch. Fertigteile sind z. B. im Werk gefertigte Stahlbeton- oder Spannbetonbauteile, deren Materialeigenschaften zwar eine höhere Streuung als die der Katalogbauteile aufweisen, durch die Herstellung im Werk aber besondere Anforderungen, z. B. an die Nachbehandlung, als erfüllt angesehen werden können. Qualitätsdefizite treten bei diesen Bauteilen häufig an den Schnittstellen zu anderen Bauteilen auf. Unter Halbfertigteile fallen u. a. sogenannte „Doppelwand - Elemente“ aus (Stahl-) Beton, die auf der Baustelle mit Beton verfüllt werden. Durch das Einbringen des Betons auf der Baustelle kann es zu Lufteinschlüssen kommen, welche durch die werksseitig hergestellten Außenschalen nicht direkt gesehen werden können. Die letzte Kategorie bilden die Bauteile in Ortbauweise, also all denen, die direkt auf der Baustelle gefertigt werden. Hier sind die Eigenschaften des fertigen Produktes am weitesten gestreut. Zu den Fehlern in der Verarbeitung des Materials können zusätzlich größere Maßtoleranzen entstehen, als bei der Herstellung im Werk.

Diese Form der qualitativen Abstufung findet man heute in den verschiedenen Normen durch die Verwendung unterschiedlicher Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite in Form der  $\gamma$ -Werte. So darf nach DIN 1045-1 5.3.3 (7) z. B. bei Fertigteilen mit einer werksmäßigen und ständig überwachten Herstellung (...) der Teilsicherheitsbeiwert für Beton auf  $\gamma_c = 1,35$  (i. d. R.  $\gamma_c = 1,5$ ) verringert werden,

## Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

wenn durch eine Überprüfung der Betonfestigkeit am fertigen Bauteil sichergestellt wird, dass Fertigteile mit zu geringer Betonfestigkeit ausgesondert werden. Die in diesem Fall notwendigen Maßnahmen sind durch die zuständigen Überwachungsstellen festzulegen (7).

### 2. Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit

Ausnutzungsgrad	> 98 %	5	5	4	4	3
	95-98 %	5	4	4	3	2
	90-95 %	4	3	3	2	2
	75-90 %	3	2	2	1	1
	< 75 %	2	1	1	1	1
		V	IV	III	II	I

Bauteilkategorie

Abb. 2.4: Matrix zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit

Nach der Ermittlung der Bauteilkategorie erhält man, unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades, einen Bezugswert der Ausfallwahrscheinlichkeit zwischen 1 und 5. Dabei gibt dieser Wert nicht an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Bauteil ausfällt. Er ist nur ein Richtwert, welche Kritizität verschiedene Bauteile bei unterschiedlicher Herstellungsweise, den eigenen Erfahrungen und den Ausnutzungsgraden haben.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit nimmt mit steigendem Zahlenwert zu.

Die Einteilung der Bauteilkategorien I bis V und die Verteilung der Richtwerte für die Ausfallwahrscheinlichkeiten sind vorerst intuitiv vorgenommen worden.

Eine weitere Verbesserung der Matrizen sollte durch die wissenschaftliche Auswertung von Bauschadensbanken vorgenommen werden. Diese können einen genaueren Aufschluss darüber geben, welche Bauteile als besonders kritisch einzuordnen sind.

### 2.4.4.2 Bedeutung

Die Ausfallbedeutung bezieht sich immer auf die nächsthöhere Ebene im System. So wird die Bedeutung eines Ausfalls eines Elementes für das Teilsystem und in einem weiteren Schritt dessen Ausfallbedeutung für das Gesamtsystem betrachtet.

In die Beurteilung der Bedeutung eines Ausfalls gehen sowohl Aspekte der Tragsicherheit, als auch der Gebrauchstauglichkeit ein.

Die Wahl des statischen Systems beeinflusst, z. B. durch den Grad der statischen Unbestimmtheit:

- Das Redundanzniveau
- Die Möglichkeit der Lastumlagerung
- Das vorhanden sein alternativer Lastpfade
- Die Verformung

und hat somit Einfluss auf beide Aspekte.

Zudem werden durch die Normen Anforderungen an die Verformungen gestellt. Dabei wird zum einen auf das Sicherheitsempfinden des Nutzers Rücksicht genommen. Zum anderen können durch die Wahl von Materialien und Systeme für den Innenausbau oder der Gestaltung der Außenfassade Grenzverformungen vorgegeben werden.

Als dritter Gradmesser sind das subjektive Empfinden des Nutzers (zum Teil durch die Normen berücksichtigt), als auch seine Nutzungsansprüche entscheidend. Daher sollten die Kriterien für die Beurteilung der Bedeutung in Absprache mit dem Kunden definiert werden.

## Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

In Anlehnung an M. Schubert (4) könnte eine Bewertung wie folgt vorgenommen werden:

Ausfall führt zu	Erläuterung	Bewertung
Versagen der nächst höheren Ebene oder eines Elementes der gleichen Ebene	führt zum Betriebsausfall der nächst höheren Ebene oder beeinträchtigt möglicherweise die Sicherheit und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften	5
Verlust der Gebrauchstauglichkeit	löst große Verärgerung des "Kunden" aus	4
große Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit	löst Unzufriedenheit beim "Kunden" aus. Der "Kunde" fühlt sich belästigt oder ist verärgert. Er wird die Beeinträchtigung des Systems bemerken	3
geringe Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit	Die Auswirkung ist unbedeutend, und der "Kunde" wird sich nur geringfügig betroffen fühlen. Er wird wahrscheinlich nur eine geringe Beeinträchtigung des Systems bemerken	2
keine Auswirkungen	Der "Kunde" wird den Fehler wahrscheinlich nicht bemerken	1

Abb. 2.5: Bedeutung von Fehlern (nach M. Schubert; FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, Leitfaden)

### 2.4.4.3 Entdeckung

Die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu entdecken, bevor das Bauteil an den Kunden übergeben wird, ist die schwierigste. Während sich die Ausfallwahrscheinlichkeit anhand der Bauteilkategorie und des Ausnutzungsgrades nachvollziehbar abschätzen lassen, und die Bedeutung eines Ausfalls anhand der Nutzungsansprüche und vorhandenen Redundanzen klassifiziert werden kann, ist die Einschätzung der Entdeckung nur schwer zu fassen.

Dass jemandem ein Fehler unterlaufen ist, wird meist erst dann sichtbar, wenn die Fehlerursache eine Fehlerwirkung erzeugt hat. Sind die Redundanzen in einem System so groß, dass ein vorhandener Fehler in einem Teilsystem oder einem Systemelement keine Folgen hat, bleibt dieser meist unentdeckt. Dies hat zu Folge, dass die Datenbasis für eine wissenschaftliche Aussage darüber fehlt, mit welcher Grundgesamtheit ein Fehler gemacht wurde, und in welchem Verhältnis dieser entdeckt oder unentdeckt blieb. Zudem wird bisher nicht, oder nur in unzureichender Weise, reflektiert und dokumentiert, welcher Fehler in welchem Stadium der Planung

aufgetreten bzw. entdeckt wurde. Dieses Wissen ist zumeist allein in den persönlichen Erfahrungsbereich der Ingenieure geflossen. Eine Weitergabe dieser Informationen stellt sich zudem als problematisch heraus, wenn man berücksichtigt, dass erfahrene Ingenieure Zeit ihrer Tätigkeit in einer gewissen Konkurrenz zu anderen Ingenieuren stehen. Eine Weitergabe des vorhandenen Wissens birgt immer die Gefahr, seinen eigenen Marktwert zu mindern. Zudem tun sich Ingenieure schwer, eigene Fehler vor anderen Personen preiszugeben.

Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu entdecken von folgenden Punkten abhängig ist:

### **1. Der Phase, in der ein Fehler entsteht**

Die Planung eines Bauwerks durchläuft im Allgemeinen die 3 Planungsphasen (Vor-) Entwurf, Genehmigungsplanung inkl. der statischen Prüfung sowie die Ausführungsplanung. Jede dieser Phasen bildet die Grundlage für die nächste Phase. Daher lässt sich i. d. R. sagen, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fehler entdeckt wird, sinkt, um so später dieser gemacht wird, da die Anzahl der Kontrollinstanzen geringer wird.

### **2. Der Komplexität des Systems**

Je komplexer ein System ist, desto schwieriger ist es, Fehler zu entdecken.

### **3. Dem vorhanden sein und der Qualität der Prüfmechanismen**

Fehler können nur dann entdeckt werden, wenn entsprechend effektive und unabhängige Prüfmechanismen vorhanden sind.

Statische Berechnungen werden zumeist auf zwei verschiedene Arten auf Fehler untersucht:

- a) Die Selbstkontrolle durch den Ersteller der Statik
- b) Durch den Prüfstatiker, der als unabhängige Prüfinstanz arbeitet

Dabei kann die Untersuchung der Berechnungen unterschiedlich durchgeführt werden. Zum einen kann eine Kontrolle der Ergebnisse durch eine separate, unabhängige Berechnung durchgeführt werden, um Wiederholungsfehler oder das Kopieren von Fehlern zu vermeiden. Kommt es dabei zu Unstimmigkeiten zwischen der ersten Berechnung und der Kontrollrechnung ist klar, dass eine der beiden Rechnungen fehlerhaft sein muss. Als nächsten Schritt können dann die Eingabedaten in das

Berechnungsprogramm überprüft werden. Ein Umkehren beider Kontrollschritte ist für die Selbstkontrolle eher ungeeignet, da eigene Eingabefehler nur schwer erkannt werden.

Um der Abschätzung einer Entdeckungswahrscheinlichkeit eine wissenschaftliche Basis zu geben, sollte in naher Zukunft damit begonnen werden, in jeder Phase der Planung zu dokumentieren, wann welcher Fehler durch welche Maßnahme entdeckt wurde.

An dieser Stelle wird, aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten und der noch nicht ausreichenden Erfahrung, auf eine Abschätzung der Entdeckungswahrscheinlichkeit und einer differenzierten Bewertung verzichtet. Beim Bürogebäude X wird allgemein von einer mittleren Entdeckungswahrscheinlichkeit ausgegangen. Daher erhalten alle Bauteile eine Bewertung mit 3 Punkten.

### 2.4.4.4 Risikoprioritätszahl

Nachdem die drei Kriterien Auftreten (A), Bedeutung (B) und Entdeckbarkeit (E) bewertet worden sind, wird durch Multiplikation der 3 Zahlenwerte die Risikoprioritätszahl RPZ ermittelt. (4)

$$\text{RPZ} = \text{A} \times \text{B} \times \text{E}$$

Die Größe des Maximalwertes der Risikoprioritätszahl hängt somit von der Höhe der Einzelfaktoren ab. Durch eine Beschränkung des Wertebereiches auf 1 bis 5 ergibt sich somit eine maximale Risikoprioritätszahl von:

$$\text{RPZ} = \text{A} \times \text{B} \times \text{E} = 5 \times 5 \times 5 = \mathbf{125}$$

Sie dient als Orientierungsgröße und zur Schwerpunktbildung (Rangfolge) der Fehlerrisiken. Eine Verbesserung der Situation ist vorrangig für solche Fehlerursachen vorzuschlagen, die eine hohe Prioritätszahl erhalten haben und/oder hohes Auftreten bzw. hohe Bedeutung haben (4). Die RPZ sollte aber nie alleiniges Entscheidungskriterium sein, sondern immer im Zusammenhang mit den Einzelbewertungen stehen! So sollten hohe Einzelbewertungen  $\text{A/B} \geq 4$  immer vermieden werden. (4)

#### Beispiel 2.1:

1. Ausgeglichene Einzelbewertung:  $\text{RPZ} = 3 \times 3 \times 3 = 27$
2. Eine hohe Einzelbewertung:  $\text{RPZ} = 1 \times 5 \times 3 = 15$

Bei alleiniger Betrachtung der Risikoprioritätszahl würde man zuerst die erste Möglichkeit mit durchschnittlicher Einzelbewertung untersuchen und verbessern. Eine Bewertung der Bedeutung mit 5 Punkten „führt zum Betriebsausfall der nächsthöheren Ebene oder beeinträchtigt möglicherweise die Sicherheit und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften“ (siehe 2.4.4.2 Abb. 2.7) und ist somit nicht akzeptabel. Daher sollte die Risikoprioritätszahl immer in Verbindung mit der Bewertung der Schwere betrachtet werden.

Da die Bewertung der einzelnen Faktoren A, B und E, trotz des Versuches, einheitliche Beurteilungskriterien zu schaffen, von der subjektiven Einschätzung der Teammitglieder abhängig bleibt, sollte die Bewertung in einem Projekt immer von denselben Personen durchgeführt werden, um unterschiedliche Grundeinschätzungen zu vermeiden. (4)

### **2.4.5 Verbesserungen in System einbinden und erneute Risikoanalyse**

Eine FMEA ist nur dann effektiv, wenn aus den Bewertungsergebnissen die richtigen Schlüsse gezogen werden und im Sinne des „Null-Fehler-Gedankens“ das System verbessert wird (4).

Verbesserungsvorschläge sollten immer erst dann diskutiert werden, wenn die Bewertung der Einzelfaktoren A, B und E für alle zu betrachtenden Bauteile abgeschlossen ist. Dies verhindert, dass die FMEA-Sitzung durch Betrachtung vermeintlich „kleiner“ Fehler in die Länge gezogen wird, und für die Verbesserung der als riskant eingestuft Bauteile nicht genügend Zeit eingeräumt werden kann.

Dabei sollten für die in 2.4.4 als riskant erachteten Bauteile Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet und in die Systemstruktur übernommen werden. Durch eine erneute FMEA-Sitzung ist dann der Erfolg der Änderungen zu kontrollieren. Die Betrachtungstiefe ist von der Art der Verbesserungsmaßnahme und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem oder Teilsysteme abhängig und sollte für jeden Einzelfall neu definiert werden.

Eine Erfolgskontrolle ist daher wichtig, da Änderungen, z. B. in der Systemstruktur, vorher nicht in Betracht gezogene, negative Auswirkungen auf andere Bereiche des Systems haben können.

Eine FMEA stellt somit einen iterativen Prozess da. Die Entscheidung, wie oft die FMEA – Sitzung wiederholt werden muss, ist zum einen davon abhängig, wie effektiv die erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen waren und zum anderen, welches Risiko der Verantwortliche, z. B. die Geschäftsleitung, als annehmbar erachtet.

Die alte Risikoanalyse darf nicht gelöscht werden, da sie als Datenbasis für spätere Projekte dienen soll und der Nachvollziehbarkeit der Arbeits- und

Verbesserungsschritte dient. Zudem gilt die FMEA als Nachweis, dass eine kritische Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Bauteil stattgefunden hat, und leistet somit einen Beitrag zum Qualitätsmanagement des Unternehmens.

### **2.5 FMEA-Formblatt**

Die Dokumentation der Ursache-Wirkungs-Kette (FU-FA-FF) erfolgt in FMEA-Formblättern. Diese werden meist in Anlehnung an die Formblätter vom Verband der Autoindustrie (VDA) erstellt (4). Sie sollten aber den Anforderungen des jeweiligen Büros und der Bauprojekte angepasst und ergänzt werden. So kann es für Bauprojekte auch wichtig sein, eine Bewertung von monetären Einflüssen zu berücksichtigen. Auf diesen Punkt wird in dieser Arbeit jedoch verzichtet.

Das Grundkonzept, des in dieser Arbeit verwendeten Formblattes, stammt von Dipl.-Ing. Tobias Vogt. Dieses wurde jedoch überarbeitet und ergänzt.

Das Formblatt ist in die vier Hauptbereiche Formularkopf, Fehlerbeschreibung, Risikobewertung und Empfehlung für Verbesserungen unterteilt.

#### **Formularkopf**

Im Bereich Formularkopf werden die wichtigsten Angaben eingetragen, die zu einer schnellen Zuordnung zu einem System, Teilsystem oder Element benötigt werden. So sollte angegeben werden:

- Bezeichnung des betrachteten Systems / Teilsystems / Elementes
- Funktion
- Bauteilkategorie
- Ersteller (verantwortlich)
- Datum

Zudem kann es hilfreich sein anzugeben, auf welcher Zeichnungsnummer und in welchem Systembaum des Bauteil zu finden ist, um Wechselwirkungen des Elementes mit anderen Elementen auf derselben Systemebene oder einer höheren Systemebene besser nachvollziehen zu können.

#### **Fehlerbeschreibung**

An dieser Stelle ist jeder denkbare Fehler im Sinne der Ursache-Wirkungs-Kette aufzulisten, der im System auftreten kann. Um diesen Schritt zu vereinfachen, kann in jedem Büro eine Datenbank angelegt werden, in der neue Erkenntnisse über Fehlerarten für verschiedene Bauteile eingetragen werden. Da bei der System-FMEA

## **Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse**

---

nur auf die Planungsphase Bezug genommen wird, werden Fehler, die bei der Herstellung der Bauteile entstehen können, nicht explizit aufgezählt.

### **Risikobewertung**

Die Risikobewertung wird nach den Kriterien aus 2.4.4 durchgeführt. Diese sollte während der FMEA-Sitzung für jedes zu untersuchende Bauteil durchgeführt werden, bevor eine Empfehlung für Verbesserungen abgegeben wird. Die Bewertung erfolgt dabei kollektiv im FMEA-Team.

### **Empfehlung für Verbesserungen**

Anhand der Risikobewertung sind Empfehlungen zur Minderung des Risikos durch das FMEA-Team abzugeben und an dieser Stelle zu dokumentieren. Dieser Punkt dient sowohl der Verbesserung der Bewertung, als auch dem Nachweis, dass ein Risiko erkannt und sich aktiv Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet wurden.

Der Formularkopf und die Fehlerbeschreibung sollte schon vor der FMEA-Sitzung vom Verantwortlichen ausgefüllt werden, um einen reibungslosen Ablauf sicher zu stellen. Natürlich kann die Fehlerbeschreibung während der Sitzung noch ergänzt werden, sollte diese unvollständig sein.

## FMEA - Formblatt

Bauteil:	Erstellt von:	Plan-Nr:
Funktion	Erstellt am:	
	Bauteilkategorie:	

Bewertungskriterien:  
 (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache  
 (B) Bedeutung der Fehlerfolge  
 (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache  
 (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungs- maßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin

Abb. 2.6: FMEA-Formblatt (vgl. (8))

### 3 Anwendung der FMEA auf das „Bürogebäude X“

Die System-FMEA soll im folgenden Kapitel auf ein Bürogebäude angewendet werden, welches von den „Eisfeld Engel Architekten“ aus Kassel entworfen wurde. Diese stellen auch das 3D-Computer-Modell zur Verfügung, welches für die Berechnungen mit dem FEM-Programm SOFiSTiK verwendet wird. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass eine Kontrolle der Eingabedaten bzgl. der Systemdaten und der Lastfälle durch den Ersteller des Modells stattgefunden hat.

#### 3.1 Allgemeine funktionale Beschreibung

Das betrachtete Modell ist ein viergeschossiges Bürogebäude aus Stahlbeton. Das Gebäude hat im Grundriss die Abmessungen 16 x 14 m. Jedes Geschoss hat die Höhe von 3 m, die Gesamte Höhe beträgt somit 12 m. Der Grundriss des 1. und 2. OG ist rechteckig, die von EG und DG sind rechtwinklige Dreiecke, die das halbe Flächeninhalt von den Regelgeschossen aufweisen. Das besondere an diesem Gebäude ist, dass die oberen drei Geschosse zur Hälfte in der Luft schweben, d.h. sie gehen über das Erdgeschoss hinaus und werden nicht gestützt.

Die Decken sind aus Stahlbeton C30/37 und BSt500 Bewehrung ausgeführt. Die Dicke der Decken beträgt 30 cm. Die frei hängenden Teile der Decke im 1 und 2 OG werden als Cobiaxdecken ausgeführt, was zum Gewichtsersparnis führt, wobei die Tragfähigkeit nicht maßgebend abgemindert ist. Alle Stützen und die Unterzüge werden als Verbundquerschnitte aus C40/50 und S235 ausgeführt. Die Wände sind aus Beton C30/37 in der Dicke  $d = 30$  cm. Die Zugdiagonalen im DG sind als Seile ausgeführt. Die Unterzüge sind auch Verbundquerschnitte. Die Hauptstütze hat den Vollquerschnitt 100 x 100 cm.

Die wesentlichen Tragelemente sind die Decken, Wände, Unterzüge und (Pendel-) Stützen. Aus diesen Bauteilen ist das Tragwerkskonzept entworfen. Diese bilden in Verbindung miteinander verschiedene Systeme.

Das Gebäude ist hauptsächlich durch innere und äußere Wände ausgesteift, die sich in den oberen Geschossen fast ausschließlich im Bereich des Treppenhauses befinden. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Hauptstütze, die sich in der Mitte des Gebäudes befindet und durch alle Geschosse durchgeht. Die Geschosse sind durch zusätzliche Tragelemente ausgesteift.

Im 3. OG sind folgende Elemente zur Aussteifung angesetzt worden: Außenwand, Stützen, Unterzüge. Als wesentlich, ist in diesem Geschoss das Fachwerk zu bezeichnen. Es besteht aus vertikalen Pendelstützen und den Zugdiagonalen, die als Seile ausgeführt sind. Dieses System ist von primärer Bedeutung für das Tragkonzept

des Gebäudes. Vor allem ist die äußere Diagonale über dem abgehängtem Teil, und die Hauptstütze in der Mitte des Hauses sehr stark auf Normalkraft beansprucht. Dieses verhindert eine übermäßige Absenkung der Auskragung und leitet deren Last als Normalkraft in die Hauptstütze.

Im 1. Und 2. OG ist besonders der Vierendeel-Rahmen zu erwähnen. Der Rahmen geht über zwei Geschosse und hat drei Felder. Sowohl Stützen als auch die Unterzüge sind rechteckige Verbundquerschnitte, die biegesteif aneinander angeschlossen sind. Der Vierendeel-Rahmen dient auch dem Abfangen des auskragenden Gebäudeteils. Im Gegensatz zum Fachwerk im obersten Geschoss trägt der Rahmen die Belastung nicht durch Normalkraft, sondern überwiegend durch Biegung ab. Die größten Momente entstehen in den Stützen im Bereich der Anschlüsse.

Das Erdgeschoss wird durch Außenwände und die Hauptstütze ausgesteift.

### 3.1.1 Positionspläne

#### Schnittführung Positionspläne

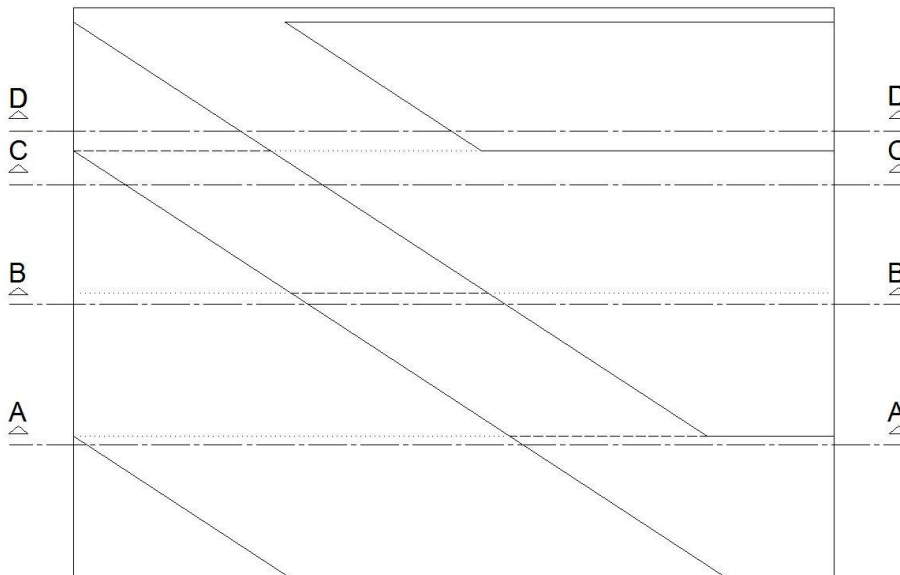
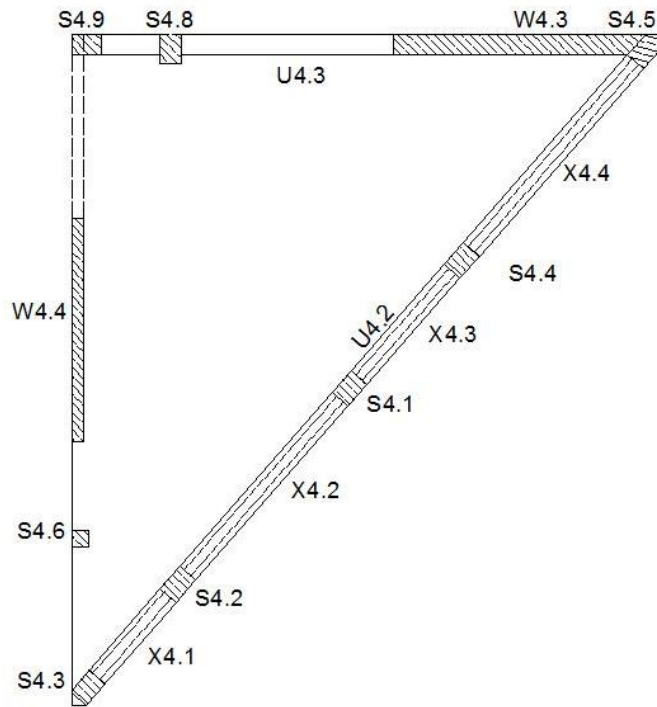
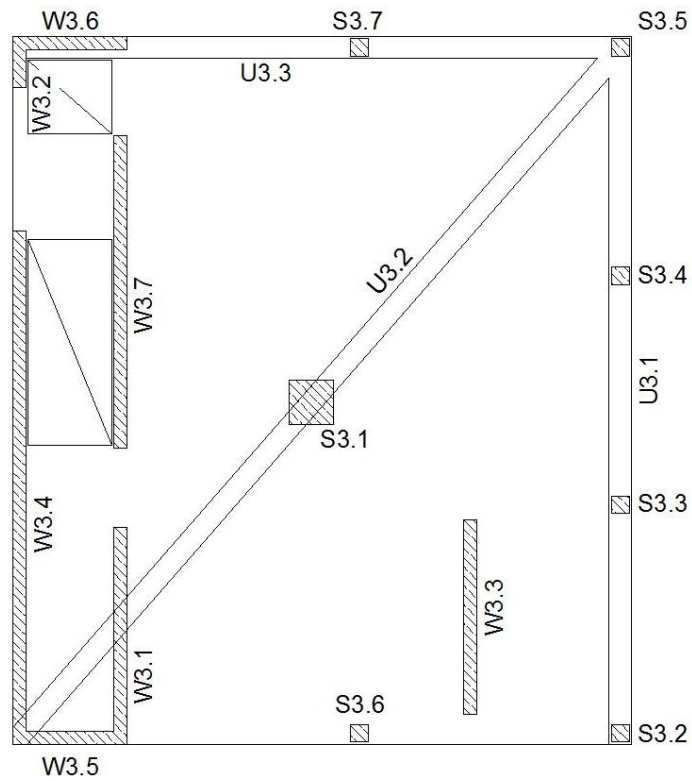


Abb. 3.1: Schnittführung der Positionspläne

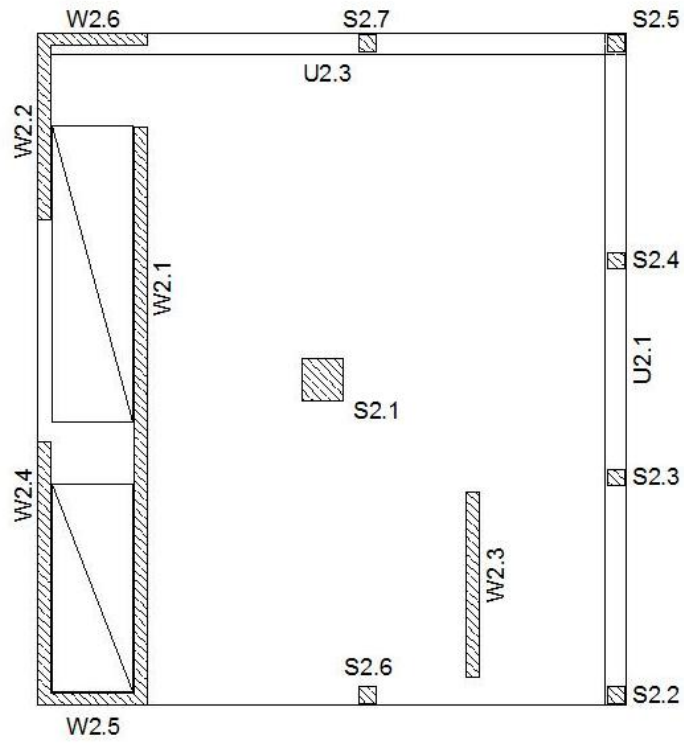
Positionsplan Dachgeschoss  
Schnitt D-D



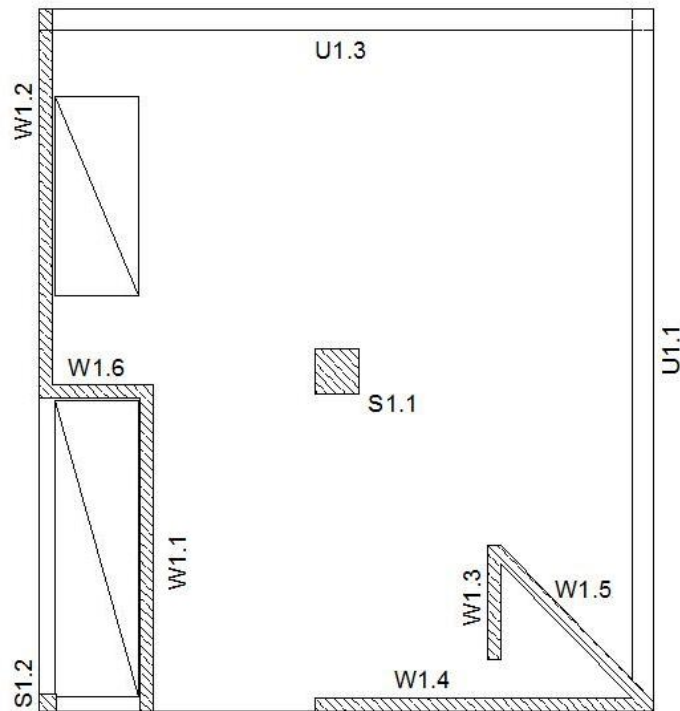
Positionsplan 2. Obergeschoss  
Schnitt C-C



Positionsplan 1. Obergeschoss  
Schnitt B-B



Positionsplan Erdgeschoss  
Schnitt A-A



### 3.2 Funktionsanalyse

Um die Kritizität eines Bauteils richtig einschätzen zu können, ist es wichtig, das Tragverhalten eines Systems zu kennen. Es ist also erforderlich, sich eingehend mit dem System und den Zusammenhängen der verschiedenen Elemente und Teilsysteme auseinanderzusetzen. Die Funktionsanalyse verfolgt dabei zwei Ziele:

1. Darstellen, welche Bauteile direkt miteinander verbunden sind
2. Analysieren, über welche Lastpfade die Bauteile ihre Lasten in die Gründung einleiten.

Das zu untersuchende „Bürogebäude X“ ist in seiner Funktion im vertikalen Lastabtrag klar strukturiert und weist i. d. R. nur einen Lastpfad auf. Im nicht auskragenden Bereich sind Wände und Stützen meist direkt untereinander angeordnet, und nur durch wenige Wandscheiben (W2.5, W2.3 und W1.6) in Querverbindungen miteinander verbunden, die einen alternativen Lastpfad unter bestimmten Bedingungen zulassen. Dazu gehört z. B. eine ausreichende Schubtragfähigkeit. Die Lasten werden in diesem Bereich, vom Dachgeschoss ausgehend, direkt in das jeweils darunter liegende Geschoss weiter abgetragen.

Im auskragenden Bereich nehmen, wie schon erwähnt, die beiden Vierendeelrahmen und der Fachwerkrahmen im Dachgeschoss eine zentrale Rolle im Lastabtrag ein. Beide Vierendeelrahmen haben durch die Wand W1.2 und dem Schnittpunkt der Wände W1.4 und W1.5 im Erdgeschoss jeweils ein Auflager. Ein weiteres, gemeinsames Auflager bildet die Zugdiagonale X4.4 im Fachwerkrahmen in die sich die Vierendeelrahmen über die Eckstützen S2.5 und S3.5 hängen. Der Fachwerkrahmen verteilt die Lasten dann weiter auf die Wände 3.1 und W3.5 sowie auf die Zentrale Stütze S3.1, die den Großteil des Lastabtrages übernimmt.

### 3.3 Systembaum

Die Schwierigkeit der Darstellung der Systemstruktur des zu untersuchenden Bauwerkes in einem Systembaum liegt in seiner Komplexität. Für die Systemstruktur dieses Bauwerkes erscheint es mir sinnvoll, das Tragwerk entsprechend der Etagen untereinander anzuordnen. Die Bauteile werden dabei erst einmal abstrakt als Rechtecke dargestellt. Eine Etage besteht aus der Decke über dem Geschoss und den damit verbundenen Unterzügen sowie den Wänden und Stützen. Durch diese Form der Darstellung können die Beziehungen der einzelnen Bauteile in ihrer Lastabtragenden Funktion untereinander dargestellt werden. Dabei muss es nicht zwingend erforderlich

sein, die Bauteile, die im Tragwerk nebeneinander stehen, auch im Systembaum nebeneinander darzustellen, wenn sie keine direkte funktionale Bindung haben. So stehen die Stützen S4.3 und S4.6 im Tragwerk zwar direkt nebeneinander, können im Systembaum aber getrennt voneinander dargestellt werden.

Nicht alle Bauteile in diesem Beispiel tragen ihre Lasten, wie oft üblich, in die Bauteile der darunter liegenden Etage ab. Wie in 3.1 beschrieben sind die Vierendeelrahmen VR1 und VR2, sowie der Fachwerkträger FW1 hierbei besonders zu erwähnen. Der Vierendeelrahmen VR1 besteht dabei aus den 3 Unterzügen des Erdgeschosses sowie des 1. und 2. Obergeschosses (U1.1, U2.1, U3.1) und den angebundenen Stützen des 1. und 2. Obergeschosses (S2.2 bis S2.5 und S3.2 bis S3.5). Dieser liegt im Erdgeschoss nur auf dem Schnittpunkt der Wandscheiben W1.4 und W1.5 auf. Der auskragende Teil hat im Erdgeschoss kein Auflager. Um die Lasten aus den Decken trotzdem abtragen zu können, hängt sich dieser in den Fachwerkträger im Dachgeschoss, welcher sich auf der zentralen Stütze und den Wandscheiben W3.1 und W3.5 auflagert. Von dort aus können die Lasten dann in den Baugrund abgetragen werden.

Jedes Bauteil erhält eine Positionsbezeichnung. Die Bezeichnungen der Positionen sind so gewählt, dass anhand der Nummerierung oft schon ein Zusammenhang zwischen Bauteilen verschiedener Etagen abgeleitet werden kann. So trägt die Stütze S4.1, als Teil des Fachwerkträgers im Dachgeschoss, ihre Lasten in die Stütze S3.1 im 2. Obergeschoss ab, welche diese Lasten dann an die Stütze S2.1 im 1. Obergeschoss weiter leitet usw. Da die Positionierung der Bauteile im Erdgeschoss begonnen wurde, bedingt diese Vorgehensweise, dass keiner der beiden Unterzüge aus dem Dachgeschoss die Bezeichnung U4.1 erhalten hat. Zudem kann nicht immer sicher gestellt werden, dass ein eine Beziehung aufgrund der Bezeichnung angenommen werden kann.

Die Abkürzungen der Positionsbezeichnungen der Bauteile wurden zur einfachen Erkennung der Geometrie und des Standortes wie folgt gewählt:

### D4.1

<u>Art des Bauteils</u>	<u>Bezeichnung der Etage</u>	<u>Nummerierung</u>
D: Decke	4: Dachgeschoss	1: Bauteilnr.
U: Unterzug	3: 2. Obergeschoss	
W: Wand	2: 1. Obergeschoss	
S: Stütze	1: Erdgeschoss	
X: Fachwerkdiagonale	0: Fundament	
F: Fundament		

Da verschiedene Bauteile in Form von z. B. Fachwerkträgern oder Vierendeelrahmen funktional zusammenhängende Teilsysteme bilden, erhalten diese zusätzlich noch eine Teilsystembezeichnung:

### FW1

<u>Art des Bauteils</u>	<u>Nummerierung</u>
WS: Teilsystem-Wand	1: Nummerierung
SS: Teilsystem-Stütze	
FW: Fachwerk	
VR: Vierendeelrahmen	

Neben der Positionsbezeichnung ist u. a. angegeben, in welcher Bauweise das Bauteil gefertigt wird, aus welchen Materialien es besteht und welche Abmessungen für das Bauteil vorgesehen sind. Die Angabe dieser Informationen im Systembaum hat verschiedene Vorteile:

Durch Kenntnisse über die Bauweise lassen sich potenzielle Schwachstellen von Bauteilen oder Verbindungen verschiedener Bauteile im Systembaum erkennen. Als Beispiel sei hier wieder der Vierendeelrahmen genannt. Dieser soll aus Fertigteilen in Verbundbauweise hergestellt werden. Durch die Fertigung im Werk kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Bauteile den Anforderungen an die Stabilität entsprechen. Da der Vierendeelrahmen die Lasten durch Biegung abträgt, müssen die Stützen jedoch biegesteif mit den Unterzügen verbunden werden. Gerade dort liegt ein hohes Fehlerpotenzial.

Unterzug U3.3
Verbundquerschnitt
Material: Beton C40/50 Stahl S235
Maße: b/h = 50cm/70cm

Abb. 3.2: Beispiel für eine Bauteildarstellung eines Bauteils im Systembaum

Die Angaben über das Material kann besonders bei hoch belasteten Bauteilen, wie der Zentralen Stütze oder den Zugdiagonalen des Fachwerkträgers, wichtig sein. Werden dort bei der Planung zu hohe Festigkeiten angenommen oder bei der Herstellung zu geringe Festigkeiten eingebaut, kann es zum Versagen dieser Bauteile kommen.

Werden diese Angaben jedoch im Systembaum angegeben, ist ein schneller Vergleich mit den Eingabedaten in das Computersystem möglich. Zudem werden so wichtige Informationen Arbeitsgruppen übergreifend festgelegt.

Im Allgemeinen werden bei einem Bauvorhaben nicht zu viele verschiedene Baustoffe und Nennfestigkeiten verwendet um das Risiko, dass fälschlicherweise eine zu geringe Festigkeit eingebaut wird, zu vermeiden. Werden die Baustoffe im Systembaum angegeben, liegt eine übersichtliche und kompakte Vorlage vor, anhand derer man die Berechnungsunterlagen schnell prüfen kann.

### 3.3.1 Schritte zur Erstellung des Systembaumes

Der Systembaum des „Bürogebäude X“ wurde mithilfe des Zeichenprogrammes „Nemetschek Allplan“ erstellt. Dieses Programm ermöglicht verschiedene Bauteilgruppen auf unterschiedliche Teilbilder zu zeichnen, die später wie Folien eines Overheadprojektors übereinandergelegt werden können. Dadurch können, je nach Bedarf, verschiedene funktionale Bindungen ein- bzw. ausgeblendet werden, was den Arbeitsaufwand verkürzt und die Übersichtlichkeit verbessert.

In der Zukunft ist geplant, Funktionsbäume automatisch von Programmen erstellen zu lassen. Gerade bei komplexen oder großen Gebäuden mit vielen Bauteilen erleichtert dies die Arbeit. Der Systembaum muss danach aber noch einmal genau auf mögliche Fehler überprüft werden.

### 1. Einteilung des Tragsystems in die Geschosse

Zu Beginn wird das Tragwerk als Höchste Ebene in die einzelnen Geschosse als nächstkleinere Ebene aufgeteilt.

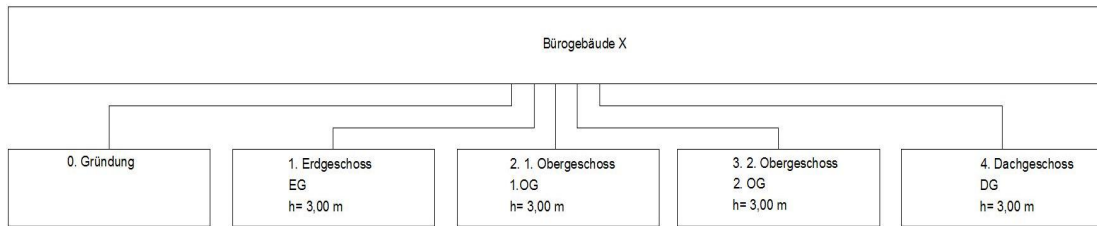


Abb. 3.3: Aufteilung des Gesamtsystems „Bürogebäude X“ in Teilsysteme

### 2. Darstellen der Decken und Unterzüge

Die Decken und Unterzüge werden wie in 3.3 beschrieben mit den Positionsbezeichnungen aus 3.1.1 in den Systembaum eingefügt.



Abb. 3.4: Darstellung der Decken und Unterzüge

### 3. Wände und Stützen

Die Wände, Stützen und Fachwerkdigonalen werden ihrer funktionalen Bindung untereinander nach angeordnet. Wie in 3.3 erwähnt, müssen Bauteile, die im Tragwerk nebeneinander liegen, im Systembaum nicht nebeneinander dargestellt werden, wenn sie keine funktionale Bindung haben.

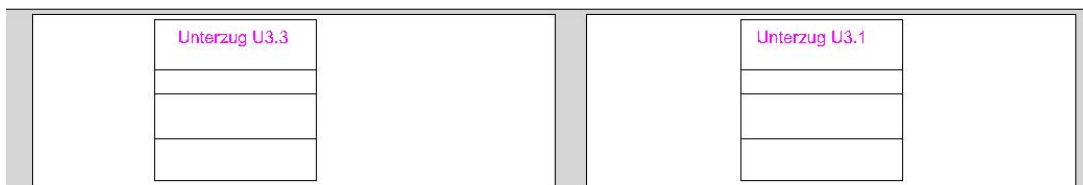


Abb. 3.5: Darstellung der Stützen, Fachwerkdigonalen und Wände am Beispiel Fachwerkträger

### 4. Systemgrenzen

Im Beispiel „Bürogebäude X“ übernehmen der Fachwerkträger im Dachgeschoss und die beiden Vierendeelrahmen im auskragenden Teil besondere Aufgaben, die sie nur im Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen dieses Teilsystems übernehmen können. Diese Teilsysteme werden im Systembaum durch eine gestrichelte Umrandung gekennzeichnet.

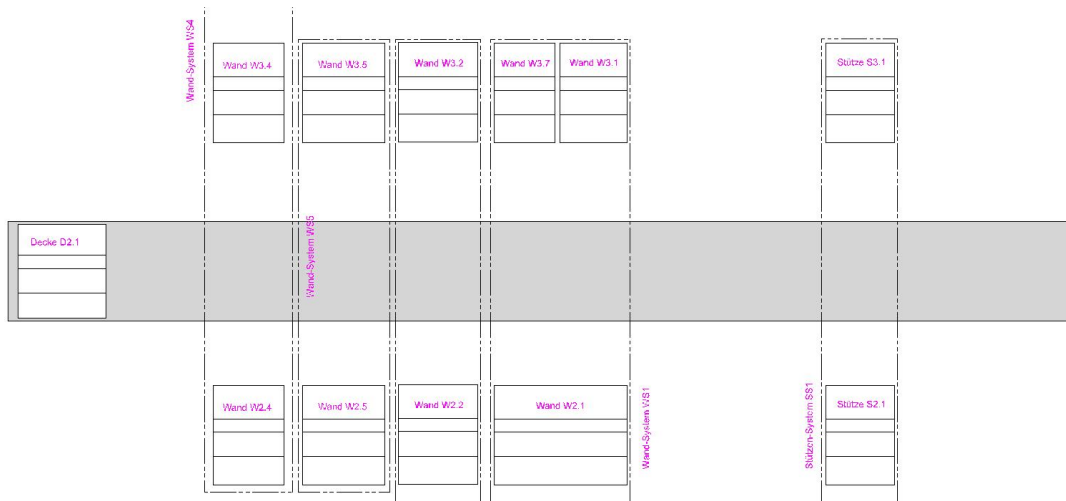


Abb. 3.6: Darstellung der Systemgrenzen

### 5. Funktionale Bindung

Die Darstellung der funktionalen Bindung zwischen verschiedenen Bauteilen beruht auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.2 und erfolgt über Verbindungslinien. Sie visualisiert, welche Bauteile direkt miteinander verbunden sind und stellt durch Pfeile dar, in welche Bauteile Lasten weiter geleitet werden. Die Pfeilrichtung gibt die Richtung des Lastabtrages an. Ist der Lastabtrag zwischen zwei Bauteilen nicht eindeutig oder wechselt seine Richtung bei verschiedenen Lastfällen kann der Pfeil auch in beide Richtungen zeigen. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, bietet es sich an, sowohl für den vertikalen als auch den horizontalen Lastabtrag separate Pläne zu verwenden. Kann ein Bauteil seine Lasten über unterschiedliche Lastpfade abtragen, sollten zwei separate Pfeile von dem jeweiligen Bauteil ausgehen, sofern die Übersichtlichkeit dadurch nicht erheblich beeinträchtigt wird.

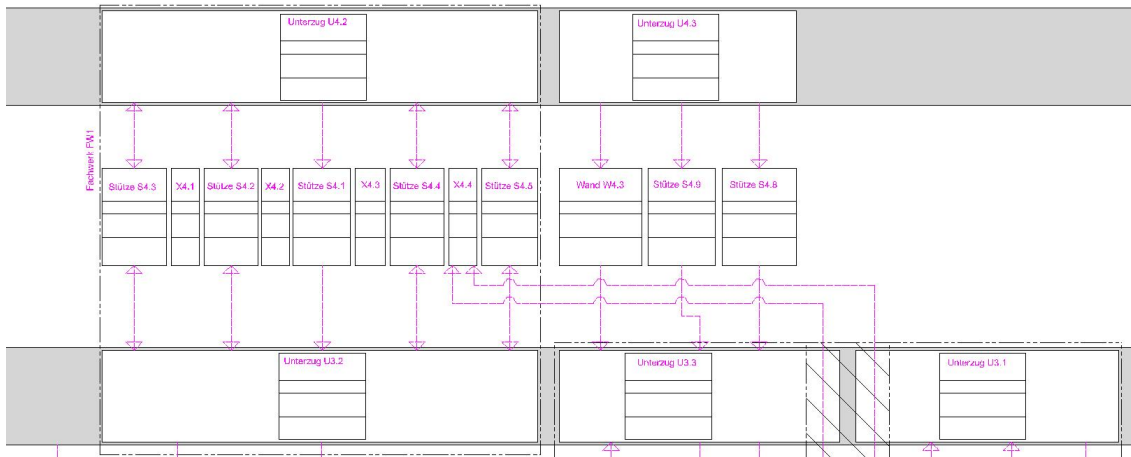


Abb. 3.7: Darstellung des Lastabtrages

### 3.4 Ausfallanalyse

Da Programme zur automatischen Betrachtung von Bauteilausfällen fehlen erfolgt die Analyse in diesem Beispiel händisch. Um den Aufwand, besonders bei großen Gebäuden, in einem vertretbaren Rahmen zu halten, sind Vorüberlegungen notwendig, welche Bauteilausfälle vorrangig untersucht werden sollten.

Zentrieren sich Lasten unterschiedlicher Elemente oder Teilsysteme in einem Bauteil ohne, dass alternative Lastpfade zur Verfügung stehen, hat der Ausfall dieses Bauteils eine größere Bedeutung für die Standsicherheit eines Systems als eines, welches nur durch ein anderes Bauteil belastet wird, oder die Lasten auf alternativen Pfaden durch das System geführt werden können.

Zwei Beispiele sollen dies am Tragwerk des Bürogebäude X diese Möglichkeiten verdeutlichen:

#### Beispiel 3.1: Beispiel für ein weniger kritisches Bauteil (W1.3)

Der Lastabtrag der Wandscheiben W2.3 und W3.3 inkl. ihrer Lasteinzugsbereiche aus den Decken über dem 1. und 2. Obergeschoss erfolgt zum größten Teil über die sich im Erdgeschoss befindende Wandscheibe W1.3, welche sich direkt unterhalb der beiden anderen Wände befindet. Ein Ausfall dieser Wandscheibe hätte vermutlich geringe Auswirkungen, da durch die zusätzliche Auflagerung von W2.3 auf die Wandscheiben W1.5 und W1.4 ein alternativer Lastpfad zur Verfügung steht.

### **Beispiel 3.2:** Beispiel für ein kritisches Bauteil (X4.4)

Als ein entscheidendes und sehr kritisches Bauteil kann die Zugdiagonale X4.4, die ein Element des sich im Dachgeschoss befindenden Teilsystems Fachwerk FW1 bildet, angesehen werden. Fällt dieses Bauteil aus, verlieren die Vierendeelrahmen jeweils eines der beiden Auflager. Da für den Lastabtrag kein alternativer Lastpfad zur Verfügung steht, würde dies wohl zum Versagen des kompletten, auskragenden Teils des Systems führen.

### 3.4.1 Liste möglicher Fehlerarten

#### Fehlerarten System FMEA

Projekt:	Forschungsprojekt FMEA	Datum:	21.07.2009
Projekt-Nr.:	11161	erstellt von:	Liening
Gebäude:	Musterhaus Bürogebäude X		

Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart
Fundament	F0.2; F0.1	große Setzungen
Hauptstütze	SS1 (S3.1; S2.1; S1.1)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Wände	WS1 (W3.7; W3.1; W2.1; W1.1) WS2 (W3.2; W2.2; W1.2) WS3 (W3.3; W2.3; W1.3) WS4 (W4.4; W3.4; W2.4) WS5 (W3.5; W2.5) W4.3; W1.6; W1.5; W1.4	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Stützen	S4.9; S4.8; S4.6; S3.6; S2.6; S1.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Gurt	FW1 (U4.2; U3.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Stütze	FW1 (S4.5; S4.4; S4.3; S4.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Diagonale	FW1 (X4.4; X4.3; X4.2; X4.1)	totales Versagen
Vierendeelrahmen - Riegel	VR1 (U3.3; U2.3; U1.3) VR2 (U3.2; U2.2; U1.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Vierendeelrahmen - Stütze	VR1 (S3.4; S3.3; S3.2; S2.4; S2.3; S2.2) VR2 (S3.7; S2.7; S3.5; S2.5)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Anschluss Vierendeelrahmen Riegel - Stütze		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Fachwerk Gurt - Stütze		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Fachwerk Gurt - Diagonale		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Decken		totales Versagen große Verformungen

Abb. 3.8: Mögliche Fehlerarten der System-FMEA (vgl. (8))

### 3.4.2 Bewertung

Die Untersuchung des Modells, und die Beurteilung der Robustheit des Tragwerks, beschränken sich an dieser Stelle auf die Untersuchung der Auswirkungen eines Totalausfalls (System-FMEA) von Bauteilen aus den Teilsystemen FW1, VR1 und VR2. Besonders interessant erscheinen dabei Ausfälle der Stützen S2.5 und S3.5 als Eckstützen der Vierendeelrahmen, S3.4 als Mittelstütze des Teilsystems VR1, die Stütze S4.1 sowohl als Teil des Fachwerkträgers als auch der zentralen Stütze und der Zugdiagonale X4.4. Unter Berücksichtigung der Lastpfade werden die Ausfälle der Bauteile in den Vierendeelrahmen nur für die jeweiligen Teilsysteme untersucht, da anzunehmen ist, dass der Ausfall der Eckstützen S2.5 und S3.5 auf den Fachwerkrahmen eher entlastend wirkt. Der Ausfall der Bauteile des Fachwerkträgers spielt für die Vierendeelrahmen hingegen eine entscheidende Rolle, da der Fachwerkträger als lastabtragendes Teilsystem für VR1 und VR2 diesen nachgeschaltet ist.

Zu Beginn wird für jeden Ausfall eines Bauteils eine Kopie der Systemdatei des Ausgangssystems erstellt und das betreffende Bauteil aus dem System gelöscht. Danach werden alle Systeme mit Hilfe von SOFiSTiK berechnet. Die Analyse erfolgt dann über einen Vergleich der Ausnutzungsgrade der Stützen, Unterzüge und der Zugdiagonalen sowie der Verformungen der Teilsysteme. Die Berechnung der Ausnutzungsgrade der Stützen und Unterzüge wird von SOFiSTiK automatisch durchgeführt. Die maximale anzusetzende Zugkraft  $F_{\max}$  der Zugdiagonalen wurde wie folgt angenommen (vgl. Anhang B, Beispiel Schrägkabel):

Bauart: Seil 210 HIAM-421-SE

$$\begin{aligned} A_S &= n \times \phi_{\text{nom}}^2 \times \pi/4 \\ &= 421 \times 0,7^2 \text{ cm} \times \pi/4 = 162 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{t,k} &= A_S \times f_{t,k} && \text{mit } f_{t,k} = 1570 \text{ N/mm}^2 \\ &= 162 \text{ cm}^2 \times 157,0 \text{ kN/cm}^2 = 25.434 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\max} &= 0,45 \times F_{t,k} \\ &= 0,45 \times 25.434 \text{ kN} = \mathbf{11.445 \text{ kN}} \end{aligned}$$

**Ausnutzungsgrad der Bauteile in den Teilsystemen**

Fachwerkr.: FW1

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U4.2	0,658	0,672	-	-	-	-	0,421	0,540
U3.2	0,847	0,857	-	-	-	-	1,960	0,676
S4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
S4.4	0,065	0,066	-	-	-	-	0,100	0,042
S4.1	0,239	0,245	-	-	-	-	-	0,231
S4.2	0,079	0,081	-	-	-	-	0,143	0,055
S4.3	0,013	0,297	-	-	-	-	0,000	0,000
X4.4	0,140	0,144	-	-	-	-	0,124	-
X4.3	0,162	0,017	-	-	-	-	0,000	0,199
X4.2	0,184	0,188	-	-	-	-	0,000	0,148
X4.1	0,136	0,140	-	-	-	-	0,153	0,098

Vierendeelr.: VR1

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.1	0,567	0,580	0,595	0,597	0,454	0,663	-	0,649
U2.1	0,691	0,646	0,654	0,736	0,735	0,698	-	0,783
U1.1	0,436	0,434	0,444	0,501	0,558	0,410	-	0,486
S3.5	0,486	0,479	0,569	0,391	0,546	-	-	0,837
S3.4	1,030	1,050	1,150	1,020	-	1,030	-	1,350
S3.3	0,978	1,210	0,945	1,000	0,908	1,030	-	1,090
S3.2	0,383	0,431	0,383	0,382	0,401	0,386	-	0,409
S2.5	0,213	0,212	0,131	-	0,188	0,588	-	0,420
S2.4	0,931	0,962	-	1,140	1,150	1,080	-	1,170
S2.3	1,180	-	1,190	1,180	1,200	1,190	-	1,300
S2.2	0,257	0,266	0,275	0,271	0,235	0,275	-	0,286

Vierendeelr.: VR2

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.5
U3.3	0,666	0,663	0,673	0,690	-	0,679	-	0,699
U2.3	0,411	0,409	0,413	0,444	-	0,373	-	0,469
U1.3	0,313	0,309	0,311	0,376	-	0,268	-	0,347
S3.5	0,486	0,478	0,569	0,392	-	-	-	0,837
S3.7	0,585	0,595	0,613	0,555	-	0,558	-	0,751
W3.6	-	-	-	-	-	-	-	-
S2.5	0,213	0,212	0,131	-	-	0,588	-	0,420
S2.7	0,611	0,613	0,603	0,823	-	0,732	-	0,807
W2.6	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 3.9: Ausnutzungsgrade von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich

## Anwendung der FMEA auf das „Bürogebäude X“

### Durchbiegung der Bauteile [mm]

Fachwerkr.: FW1

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U4.2	25,900	26,400	-	-	-	-	34,600	31,000
U3.2	25,800	26,400	-	-	-	-	34,500	31,000
S4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
S4.4	9,710	9,920	-	-	-	-	17,100	9,340
S4.1	1,140	1,160	-	-	-	-	-	1,070
S4.2	0,174	0,175	-	-	-	-	0,497	0,152
S4.3	-1,310	-1,330	-	-	-	-	-1,890	-1,380
X4.4	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.3	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.2	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.1	-	-	-	-	-	-	-	-

Vierendeelr.: VR1

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.1	26,500	27,100	27,100	25,800	27,300	25,000	-	31,900
U2.1	26,200	26,800	27,000	25,500	26,900	29,900	-	31,500
U1.1	26,300	26,900	27,000	34,800	27,100	29,800	-	31,700
S3.5	25,800	26,400	26,700	25,200	26,600	-	-	31,000
S3.4	19,400	20,300	19,200	19,500	-	19,700	-	21,700
S3.3	6,820	7,710	6,520	6,800	6,530	6,870	-	7,340
S3.2	0,238	0,249	0,241	0,239	0,245	0,241	-	0,251
S2.5	25,900	26,400	26,700	-	26,600	29,200	-	31,000
S2.4	19,400	20,400	-	19,600	20,400	19,800	-	21,700
S2.3	6,790	-	6,500	6,770	6,530	6,840	-	7,310
S2.2	0,166	0,172	0,169	0,167	0,199	0,196	-	0,176

Vierendeelr.: VR2

Bauteil	Ausgangssystem	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.3	26,500	26,400	26,800	25,800	-	25,000	-	31,900
U2.3	26,200	26,400	26,800	25,500	-	29,900	-	31,500
U1.3	26,300	26,500	26,700	34,800	-	29,800	-	31,700
S3.5	25,800	26,400	26,700	25,200	-	-	-	31,000
S3.7	19,300	19,600	19,800	19,600	-	19,600	-	21,500
W3.6	-	-	-	-	-	-	-	-
S2.5	25,900	26,400	26,700	-	-	29,200	-	31,000
S2.7	19,400	19,600	19,800	19,600	-	19,700	-	21,500
W2.6	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 3.10: Durchbiegung von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich

Die Ergebnisse der Berechnung des Ausgangssystems werden dann in oben stehende Tabellen eingetragen. Die maximalen Ausnutzungsgrade der meisten Bauteile weisen dabei einen niedrigen bis mittleren Wert auf. Besonders die im Durchmesser 21 cm starken Zugdiagonalen wirken überdimensioniert.

Die beiden Stützen S2.3 (118 %) und S3.4 (103 %) werden rechnerisch jedoch zu hoch ausgelastet. Unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte in der Berechnung wird eine Überschreitung der maximalen Ausnutzung von 3 % (S3.4) als noch akzeptabel angesehen. Eine Überschreitung von 18 % (S2.3) ist jedoch nicht mehr im Rahmen des Toleranzbereiches. Aufgrund dieses Ergebnisses wird der Kreis der weiter zu untersuchenden Bauteile um die Stütze S2.3 erweitert. Zudem soll auch ein Ausfall der zu 93 % ausgelasteten Stütze S2.4 erfolgen.

### 3.4.2.1 Ausfallwahrscheinlichkeit

Auf Basis der Ausnutzungsgrade am Ausgangssystem lassen sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten gemäß 2.4.4.1 einfach ermitteln.

Die Zugdiagonalen im Fachwerkträger, bestehend aus HIAM-421-SE Seilen, können als Katalogbauteile angesehen werden und werden bei WTM Engineers in Hamburg selten bis häufig eingesetzt. Aufgrund des sehr geringen Ausnutzungsgrades (maximal 18 %) ist eine genauere Unterscheidung nicht erforderlich, da die Ausfallwahrscheinlichkeit jeweils mit 1 angenommen werden kann.

Aus der allgemeinen funktionalen Beschreibung des Modells geht hervor, dass die Stützen und Unterzüge der Vierendeelrahmen und des Fachwerkträgers aus Verbundquerschnitten bestehen, die als Fertigteile angeliefert werden. Da solche Bauteile bei WTM Engineers häufig geplant werden, sind sie der Bauteilkategorie II zuzuordnen.

Unter Berücksichtigung der Ausnutzungsgrade ergeben sich daher folgende Ausfallwahrscheinlichkeiten:

Bauteil	Bauteil-kategorie	Ausnutzungs-grad [%]	Ausfallwahr-scheinlichkeit
S2.3	II	118,0	5
S2.4	II	93,1	2
S2.5	II	21,3	1
S3.4	II	103,0	5
S3.5	II	48,6	1
S4.1	II	23,9	1

Abb. 3.11: Zusammenstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit

### 3.4.2.2 Bedeutung

In die Bewertung der Bedeutung eines Bauteilausfalls fließen sowohl die Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (GZT), als auch des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ein.

Die Verteilung der Bewertungspunkte 2 bis 4 geschieht unter Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit. Die schärfsten Anforderungen an die Verformung des auskragenden Bereiches stellt die Außenfassade aus Glas. Um eine Beschädigung der Schreiben und der Aufhängung zu vermeiden, wird der in der DIN 1045-1 angegebene Grenzwert von  $l/500$  übernommen. Für die Nutzung als Bürogebäude wird die maximale Durchbiegung des Kragarms auf  $l/150$  begrenzt. Als Zwischenschritt wird der Grenzwert der Verformung für Platten und Balken mit  $l/250$  angenommen.

Führt der Ausfall eines Bauteils zu größeren Verformungen als  $l/150$ , oder zu einem Versagen weiterer Bauteile, ist die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften nicht mehr gewährleistet und erhält eine Bewertung mit 5 Punkten.

Die Bewertung der Bedeutung wird demnach wie folgt vorgenommen:

Ausfall führt zu	Erläuterung	VR1 (16 m) [cm]	VR2 (14 m) [cm]	Bewertung
Versagen der nächst höheren Ebene	Ausfall und/oder $u_z > l/150$	Ausfall und/oder $u_z > 10,7$	Ausfall und/oder $u_z > 9,3$	5
Verlust der Gebrauchstauglichkeit	$l/150 > u_z > l/250$	$10,7 > u_z > 6,4$	$9,3 > u_z > 5,6$	4
große Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit	$l/250 > u_z > l/500$	$6,4 > u_z > 3,2$	$5,6 > u_z > 2,8$	3
geringe Einschränkung d. Gebrauchstauglichkeit	$l/500 > u_z$	$3,2 > u_z$	$2,8 > u_z$	2
keine Auswirkungen				1

Abb. 3.12: Bewertung der Bedeutung für das Bürogebäude X

Die Bemessung des Ausgangssystems und die Ermittlung der Ausnutzungsgrade erfolgt unter Annahme der Grundkombination.

## Anwendung der FMEA auf das „Bürogebäude X“

Für die Untersuchung der Ausfallszenarien wird hingegen mit der Außergewöhnlichen Bemessungssituation gerechnet, wodurch sich sowohl die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma$ , als auch die Kombinationsbeiwerte  $\psi$  verändern.

Grundkombination:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

Außergewöhnliche Situation:

$$E_{dA} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} * G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} * Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} * Q_{k,i}$$

Auswirkung	Ständige Einwirkungen $\gamma_G$	Veränderliche Einwirkungen $\gamma_Q$
günstig	1,00	0,00
ungünstig	1,35	1,50

Abb. 3.13: Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite (vgl. (6))

	Bautstahl Profilbleche $\gamma_a$	Beton $\gamma_c$
Bemessungssituation ständige und vorübergehende Bemessungssituation	1,1	1,5
Außergewöhnliche Bemessungssituation	1,0	1,3

Abb. 3.14: Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite (vgl. (7))

Da die hier durchgeführte System – FMEA am Ende der Entwurfsphase durchgeführt wird, wird auf den Aufwand für die Erstellung neuer Bemessungssituationen verzichtet. Um die Veränderungen der Bemessungssituation dennoch zu berücksichtigen, wird ein Korrekturfaktor  $k$  errechnet:

$$k = k_1 * k_2$$

Der Korrekturfaktor ergibt sich aus der prozentualen Veränderung der Teilsicherheitsbeiwerte.

## Anwendung der FMEA auf das „Bürogebäude X“

---

Auf der Widerstandsseite darf der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c$  des Betons von 1,5 auf 1,3, und der des Baustahls von 1,1 auf 1,0 herabgesetzt werden. Beim Beton steigt die rechnerische Tragfähigkeit dadurch um 15 %, beim Baustahl um 10 %. Auf der sicheren Seite liegend wird der kleinere der beiden Werte für beide Materialien angenommen und für  $k_1 = 1,1$  angesetzt.

Auf der Einwirkungsseite wird, wiederum auf der sicheren Seite liegend, der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,35$  (ständige Einwirkungen) durchgängig angenommen. Durch Herabsetzen von  $\gamma$  auf einen Wert von 1,0 verringert sich die Einwirkung um 26 %, wodurch sich für  $k_2 = 0,74$  ergibt.

$$k = 1,1 * 0,74 = \mathbf{0,814}$$

Wird die Berechnung des Systems in der Grundkombination durchgeführt, ergibt sich eine Überschreitung des Ausnutzungsgrades, unter Berücksichtigung der Außergewöhnlichen Bemessungssituation, ab einem Wert  $>1,23$ .

Da das Bewertungskriterium Entdeckung, wie in 2.4.4.3 beschrieben, durchgehend mit 3 Punkten bewertet wird, kann nun mit dem Ausfüllen der FMEA – Formblätter begonnen werden.

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Vierendeelr. VR1 (S2.3)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1</b>	Erstellt am: <b>08.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
Bauteilkategorie: <b>II</b>		

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungs- maßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin		
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	<b>5</b>	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,1$ mm	<b>2</b>	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	<b>3</b>	<b>30</b>				
		Kontrollliste mit allen Lasten										
	Fehler in Schnittgrößen- ermittlung	geeignetes Programm verwenden	<b>5</b>		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 26,5$ mm	<b>2</b>	unabhängige Kontroll- berechnung	<b>3</b>			<b>30</b>	
		Kontrollliste mit Berechnungs- schritten										
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	<b>5</b>			Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 26,5$ mm	<b>2</b>	unabhängige Kontroll- berechnung			<b>3</b>	<b>30</b>
		Kontrollliste mit Bemessungs- schritten										

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Vierendeelr. VR1 (S2.4)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1</b>	Erstellt am: <b>08.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
	Bauteilkategorie: <b>II</b>	

Bewertungskriterien:

(A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(B) Bedeutung der Fehlerfolge

(E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungs- maßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin		
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	2	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,1$ mm	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	12				
		Kontrollliste mit allen Lasten										
	Fehler in Schnittgrößen- ermittlung	geeignetes Programm verwenden	2			Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 26,8$ mm	2	unabhängige Kontroll- berechnung			3	12
		Kontrollliste mit Berechnungs- schritten										
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	2			2	unabhängige Kontroll- berechnung	3			12	
		Kontrollliste mit Bemessungs- schritten										

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Vierendeelr. VR1/VR2 (S2.5)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten aus U3.1 und U3.3 in Fachwerk</b>	Erstellt am: <b>08.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
Bauteilkategorie: <b>II</b>		

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. $u_z = 34,8 \text{ mm}$	3	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	9		
		Kontrollliste mit allen Lasten								
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	1			unabhängige Kontrollberechnung	3	9		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten								
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1			unabhängige Kontrollberechnung	3	9		
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten								

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Vierendeelr. VR1 (S3.4)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1</b>	Erstellt am: <b>08.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
	Bauteilkategorie: <b>II</b>	

Bewertungskriterien:

(A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(B) Bedeutung der Fehlerfolge

(E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin	
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	5	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,3 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	30			
		Kontrollliste mit allen Lasten									
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	5		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 27,3 \text{ mm}$	2	unabhängige Kontrollberechnung	3			30
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten									
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	5			2	unabhängige Kontrollberechnung	3			30
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten									

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Vierendeelr. VR1/VR2 (S3.5)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten aus U3.1 und U3.3 in Fachwerk</b>	Erstellt am: <b>08.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
Bauteilkategorie: <b>II</b>		

Bewertungskriterien:  
 (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache  
 (B) Bedeutung der Fehlerfolge  
 (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache  
 (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungs- maßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 29,9$ mm	1	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	6		
		Kontrollliste mit allen Lasten								
	Fehler in Schnittgrößen-ermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 29,9$ mm	2	unabhängige Kontroll-berechnung	3	6		
		Kontrollliste mit Berechnungs-schritten								
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1			unabhängige Kontroll-berechnung	3	6		
		Kontrollliste mit Bemessungs-schritten								

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Hauptstütze SS1 (S4.1)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Weiterleitung der Lasten aus FW1 und Decken in F0.2</b>	Erstellt am: <b>02.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
Bauteilkategorie: <b>II</b>		

Bewertungskriterien:

(A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(B) Bedeutung der Fehlerfolge

(E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin	
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Versagen des Fachwerks (U3.2)	5	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	15			
		Kontrollliste mit allen Lasten									
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	1		Verformung des Fachwerks $u_z = 34,6 \text{ mm}$	3	unabhängige Kontrollberechnung	3			15
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten									
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1			3	unabhängige Kontrollberechnung	3			15
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten									

## FMEA - Formblatt

Bauteil: <b>Fachwerkträger FW1 (X4.4)</b>	Erstellt von: <b>Lie</b>	Plan-Nr:
Funktion: <b>Aufnahme der Lasten aus VR1 und VR2 und weiterleiten in FW1</b>	Erstellt am: <b>02.08.2009</b>	<b>11161-SB-V-02</b>
	Bauteilkategorie: <b>I</b>	

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Seil versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 31,9 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	15		
		Kontrollliste mit allen Lasten		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 31,9 \text{ mm}$	3					
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Fachwerk $u_z = 31,0 \text{ mm}$	3	unabhängige Kontrollberechnung	3	15		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten		Versagen S3.4	5					
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1	Versagen S2.3	5	unabhängige Kontrollberechnung	3	15		
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten								

### 3.4.3 Auswertung

Rangfolge:

<b>Bauteil</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>E</b>	<b>RPZ</b>
S2.3	5	2	3	<b>30</b>
S3.4	5	2	3	<b>30</b>
S4.1	1	5	3	<b>15</b>
X4.4	1	5	3	<b>15</b>
S2.4	2	2	3	<b>12</b>
S2.5	1	3	3	<b>9</b>
S3.5	1	2	3	<b>6</b>

Abb. 3.15: Rangfolge der Bauteile, sortiert nach der Risikoprioritätszahl

Der Fachwerkträger und die Vierendeelrahmen bilden das zentrale Tragsystem für den auskragenden Bereich des Bürogebäude X. Dem entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Qualität und die Standsicherheit. Das untersuchte Modell weist in diesen Bereichen jedoch einige Stellen mit hoher Kritizität auf. Zwar liegt die maximale Risikoprioritätszahl bei 30 von maximal 125 Punkten, jedoch erhielten vier Bauteile einen nicht akzeptablen Wert von 5 Punkten in einem Einzelkriterium.

Die Stützen S2.3 und S3.4 sind durch ihre hohe Ausfallwahrscheinlichkeit sehr kritisch. Dies basiert auf der teils sehr großen Überschreitung des Ausnutzungsgrades im Ausgangssystem. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, den Ausnutzungsgrad dieser Bauteile zu senken und dadurch die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zu reduzieren. Zum einen könnten die Querschnitte der Stützen vergrößert werden. Um jedoch das optische Erscheinungsbild der Vierendeelrahmen nicht zu verändern, könnte aber auch die Betonfestigkeit und/oder die Stahlfestigkeit erhöht werden.

Weitere kritische Bauteile sind die Zugdiagonale X4.4 und die Stütze S4.1, die als Teil des Fachwerkträgers die Lasten des auskragenden Gebäudeteiles in die zentrale Stütze einleitet. Entgegen der zuvor genannten Bauteile wurde die Ausfallwahrscheinlichkeit als gering eingestuft, jedoch würde ein Versagen dieser Bauteile zum Ausfall weiterer Bauteile führen. Auch dies ist nicht akzeptabel und erhält daher eine Bewertung mit 5 Punkten in der Bewertung der Ausfallbedeutung.

Beim Ausfall von X4.4 würde es zu einem Versagen der Stützen S3.4 und S2.3 kommen. Der Ausfall der Stütze S4.1 würde ein Überschreiten der Tragfähigkeit des Unterzuges U3.2 verursachen.

Durch die schon erwähnte Optimierung der Stützen S2.3 und S3.4 könnte auch die dem progressiven Versagen beim Ausfall der zugdiagonale entgegengewirkt werden.

Ein Problem stellt jedoch ein Ausfall der Stütze S4.1 da, der dem Unterzug U4.2 ein Auflager entziehen würde. Dies hätte einen deutlichen Anstieg der Verformung des Unterzuges U4.2 zur Folge. Durch die ungleichmäßige Verformung der beiden Gurte des Fachwerkträgers würden die Zugdiagonalen X4.2 und X4.3 ihre Wirkung verlieren, und zusätzlich nach sich ziehen würde, dass die Normalkraft in der Stütze S4.4 nicht mehr durch X3.3 aufgenommen werden kann.

Eine Veränderung des Systems könnte darin bestehen, die Zugdiagonale X4.2 durch einen wandartigen Träger zu ersetzen. Dieser könnte die Verformungen des Unterzuges U4.2 wahrscheinlich deutlich verringern und die Funktion der Diagonalen X4.3 aufrecht erhalten. Solch eine Veränderung würde jedoch einen massiven Eingriff in das Design des Dachgeschosses bedeuten, und die Ursache des Versagens weiterer Bauteile, dem Fehlen von Lastumlagerungsmöglichkeiten, nicht entgegen wirken, sondern nur die Wahrscheinlichkeit des Versagens weiter minimieren.

Im Allgemeinen bestätigt sich die Annahme aus der Funktionalen Beschreibung, dass besonders die Anschlüsse der Stützen an die Unterzüge besondere Aufmerksamkeit erfordern, da dort die i. d. R. dort die größten Kräfte wirken.

### 3.4.4 Beurteilung der Robustheit

Robustheit ist die Fähigkeit des Tragwerks oder bestimmter Teile davon, nicht schlagartig zu versagen bzw. den Verlust eines ausreichenden Tragwiderstandes durch große Verformung oder Rissbildungen anzukündigen. (6)

Die Unterzüge der Vierendeelrahmen weisen nach dem Ausfall verschiedener Bauteile erhöhte Verformungen auf, die zum Teil zwar zu Beschädigungen der Verglasung führen, für die Unterzüge selbst aber keine Rolle spielen.

Die Stützen der Vierendeelrahmen werden i. d. R. sowohl auf Biegung als auch auf Zug beansprucht, wodurch ein schlagartiges Knickversagen ausgeschlossen werden kann. Zum derzeitigen Planungsstand ist nichts über die Art der Schutzummantelung der Stützen für den Brandfall bekannt. Daher kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob diese durch Rissbildung die Ankündigung des plastischen Versagens des Stahlmantels unterstützt. Die Ausführung als betonummantelter Stahlkern wäre an dieser Stelle nicht nur aus brandschutztechnischer Sicht sinnvoller.

### 4 Zusammenfassung

Die Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse stellt schon in vielen Bereichen, des produzierenden Gewerbes und des Dienstleistungssektors, eine etablierte Methode zur Qualitätssicherung und zur Optimierung von Produkten und Arbeitsabläufen da.

Der stetig steigenden Zeitdruck, die komplexer werdenden Systeme und die weiter zunehmende Verwendung von rechnergestützten Computermodellen bedingen auch im Bauwesen neue Methoden, um den hohen Qualitätsstandard aufrecht erhalten zu können.

Die FMEA bildet durch das methodische Vorgehen und die qualitative Auseinandersetzung mit dem Modell eine theoretische Basis, auf deren Grundlage, ein für das Bauwesen neues, Qualitätsmanagement aufgebaut werden kann.

Die Erstellung einer Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse erfordert eine kritische Auseinandersetzung mit dem eigenen Berechnungsmodell, um die Zusammenhänge verschiedener Elemente und Teilsysteme, und deren Einfluss auf das Gesamtmodell besser zu verstehen sowie im Systembaum darstellen zu können. Schon durch eine Analyse des Systembaumes können vorher nicht in Erwägung gezogene Risikostellen aufgedeckt werden.

Die weitere Bewertung der einzelnen Elemente in Bezug auf die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (bei der System-FMEA auch Ausfallwahrscheinlichkeit) (A), der Bedeutung der Fehlerfolge (B), der Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) und der anschließenden Ermittlung der Risikoprioritätszahl (RPZ), durch Multiplikation der Einzelbewertungen, ermöglicht es, unter Berücksichtigung der Einzelbewertungen selbst, eine Prioritätenliste zu erstellen. Diese gibt eine Hilfestellung bei der Entscheidung, welche Elemente/Teilsysteme vorrangig weiter zu untersuchen und zu optimieren sind. Die Arbeit im FMEA-Team, mit klar verteilten Aufgabenbereichen und Verantwortlichen, erhöht die Untersuchungserfolge durch die Bündelung unterschiedlichster Fachkenntnisse und Sichtweisen.

Die FMEA-Formblätter sind dabei nicht nur ein Mittel zu dem Zweck, eine Prioritätenliste zu erstellen, sondern dienen auch der Dokumentation der kritischen Auseinandersetzung mit dem Modell. Im Falle eines aufgetretenen Schadens können diese dann z. B. dem Nachweis dienen, dass Erkenntnisse über mögliche Risikostellen an betreffende in die Planung involvierte Personen, übermittelt wurden.

### 5 Fazit

In der Vergangenheit gab es im Bauwesen zum Glück nur sehr selten Unglücke, wie dem Einsturz der Dachkonstruktion der Eissporthalle in Bad Reichenhall im Januar 2006, oder dem Umkippen eines 13-stöckigen Gebäudes in Shanghai im Juni 2009. Die Robustheit der Tragwerke ist i. d. R. so groß, dass ein plötzliches Versagen von Bauteilen vermieden wird und sich durch große Verformungen und Rissbildung ankündigt, oder der Verlust der Tragsicherheit von Bauteilen nicht zum progressiven Versagen ganzer Tragwerke oder deren Teilen führt.

Eine berechtigte Frage ist jedoch, ob diese Reserven auch in Zukunft in diesem Umfang vorhanden sind?

Neben den, durch die Normen vorgegebenen Sicherheitsfaktoren, und den gewählten Ausnutzungsgraden durch die Ingenieure, spielt das statische System eine entscheidende Rolle. Bisher basierte die Bemessung von Tragwerken weitestgehend auf ebenen, statischen Systemen, die auf der sicheren Seite liegend vereinfacht wurden. Für die Ausführung von räumlichen Tragwerken bedeutete dies, dass nicht explizit betrachtete Redundanzen entstanden, die die Robustheit der Systeme noch mal erhöhten und Fehler in der Bemessung ausglich.

Durch den stetig steigenden Einsatz von rechnergestützten Bemessung und der Eingabe ganzer Tragwerke als 3D-Modelle werden diese statischen Systemreserven jedoch schon berücksichtigt. Folglich stehen diese Redundanzen für die Kompensation von Bemessungsfehlern durch den Ingenieur nicht mehr in dem Maße zur Verfügung.

Durch die gezielte Untersuchung von Tragwerken hinsichtlich ihrer Robustheit bei Bauteilausfällen stellt die Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse eine effektive Methode zur Qualitätssicherung da.

Um dem Anspruch gerecht zu werden, das Tragverhalten des Systems zu berücksichtigen, sollte die Bewertung des Tragwerks nicht intuitiv erfolgen! Selbst erfahrenen Ingenieuren dürfte es schwerfallen, alle Einflüsse und Auswirkungen eines Bauteilversagens in einem 3D-Modell vorher zu sehen. Erst eine Betrachtung des Modells selbst kann Aufschluss darüber geben. Das vorgestellte Bewertungsschema ermöglicht eine einheitliche Betrachtung aller Bauteile und verbessert die Nachvollziehbarkeit der Bewertung.

Der Arbeitsaufwand für die händische Erstellung der verschiedenen Modelle und des Systembaumes, sowie die Auswertung der Ergebnisprotokolle ist, besonders für große und komplexe Gebäude, hoch und nimmt momentan noch viel Zeit in Anspruch. Durch spezielle Aufsatzmodule für die Berechnungsprogramme könnte sich dieser jedoch deutlich verringern lassen. In Hinblick auf die Möglichkeiten der Qualitätssicherung hat

## **Fazit**

---

die Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse, trotz des Arbeitsaufwandes, durchaus ihre Berechtigung.

## 6 Literaturverzeichnis

1. **Rombach, Günter.** *Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau.* Hamburg : Ernst & Sohn, 2007. ISBN 978-3-433-01701-2.
2. Hamburgische Bauordnung (HBauO). Dezember 2005.
3. **Dipl.-Ing Haffner, Andreas.** *Ein Modell zur Bestimmung der monetären Einsparpotentiale bei der Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA).* Hockenheim : Jost Jetter Verlag, 2005. ISBN 3-936947-67-8.
4. **Schubert, M.** *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse; 1. Auflage.* [Hrsg.] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. Berlin : Beuth Verlag, 1993. ISBN 3-410-32841-6.
5. **Informationstechnik, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik.** DIN EN 60812. [Hrsg.] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA).* [DIN Norm]. s.l. : Beuth Verlag, November 2006.
6. **Deutsches Institut für Normung.** DIN 1055-100: 2001-03. *Einwirkungen auf Tragwerke; Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln.* s.l. : Beuth Verlag, 2001.
7. —. DIN 1045-1:2001-07 *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.* s.l. : Beth Verlag, 2008.
8. **Dipl.-Ing. Vogt, Tobias.** *Durchführung einer Tragwerks-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien.* Kassel : s.n., 2009.
9. **Klingenmüller, O. und Bourgund, U.** *Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau.* Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1992. ISBN 3-528-08835-4.

## Abbildungsverzeichnis

	<b>Seite</b>
Abb. 1.1: Zusammenhang zwischen Phasen der Fehlerverursachung und den Fehlerkosten	3
Abb. 2.1: Systembaum (FMEA - FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS: Methodenblatt )	10
Abb. 2.2: Zusammenhang zwischen Ausfallarten und Ausfallwirkungen in einer Systemhierarchie	11
Abb. 2.3: Matrix zur Ermittlung der Bauteilkategorie	14
Abb. 2.4: Matrix zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit	16
Abb. 2.5: Bedeutung von Fehlern	18
Abb. 2.6: FMEA-Formblatt	24
Abb. 3.1: Schnittführung der Positionspläne	26
Abb. 3.2: Beispiel für eine Bauteildarstellung eines Bauteils im Systembaum	32
Abb. 3.3: Aufteilung des Gesamtsystems „Bürogebäude X“ in Teilsysteme	33
Abb. 3.4: Darstellung der Decken und Unterzüge	33
Abb. 3.5: Darstellung der Stützen, Fachwerkdiagonalen und Wände am Beispiel Fachwerkträger	33
Abb. 3.6: Darstellung der Systemgrenzen	34
Abb. 3.7: Darstellung des Lastabtrages	35
Abb. 3.8: Mögliche Fehlerarten der System-FMEA	37
Abb. 3.9: Ausnutzungsgrade von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich	39
Abb. 3.10: Durchbiegung von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich	40
Abb. 3.11: Zusammenstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit	41
Abb. 3.12: Bewertung der Bedeutung für das Bürogebäude X	42
Abb. 3.13: Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite	43
Abb. 3.14: Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite	43
Abb. 3.15: Rangfolge der Bauteile, sortiert nach der Risikoprioritätszahl	52

## Anhang

### Anhang A

Ansichten „Bürogebäude X“	I
SOFiSTiK-System Ansichten	III
Sytembaum „Bürogebäude X“	XI

### Anhang B

Text als PDF-Datei	DVD
Systembaum als PDF-Datei	DVD
Beispiel Schrägkabel PDF-Datei	DVD

### Anhang C (Gesamtsystem)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

### Anhang D (Ausfall S2.3)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

### Anhang E (Ausfall S2.4)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

### Anhang F (Ausfall S2.5)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

### Anhang G (Ausfall S3.4)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

### Anhang H (Ausfall S3.5)

SOFiSTiK System-Datei	DVD
Ergebnisprotokolle	DVD

## Anhang

---

### Anhang I (Ausfall S4.1)

SOFiSTiK System-Datei

DVD

Ergebnisprotokolle

DVD

### Anhang J (Ausfall X4.4)

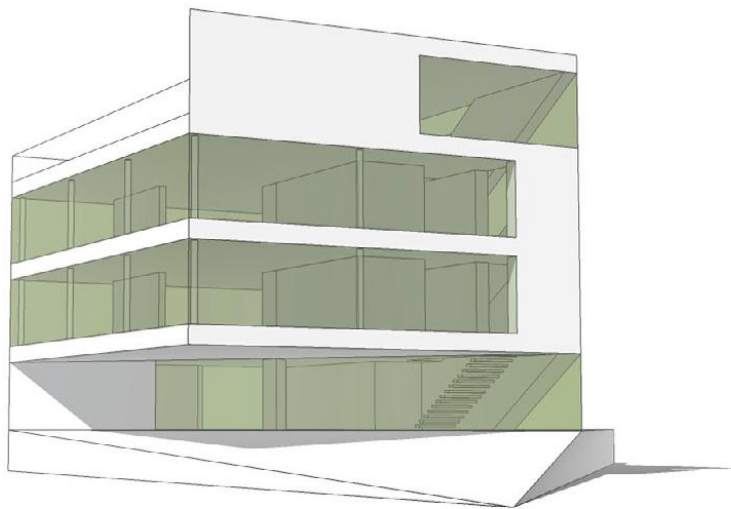
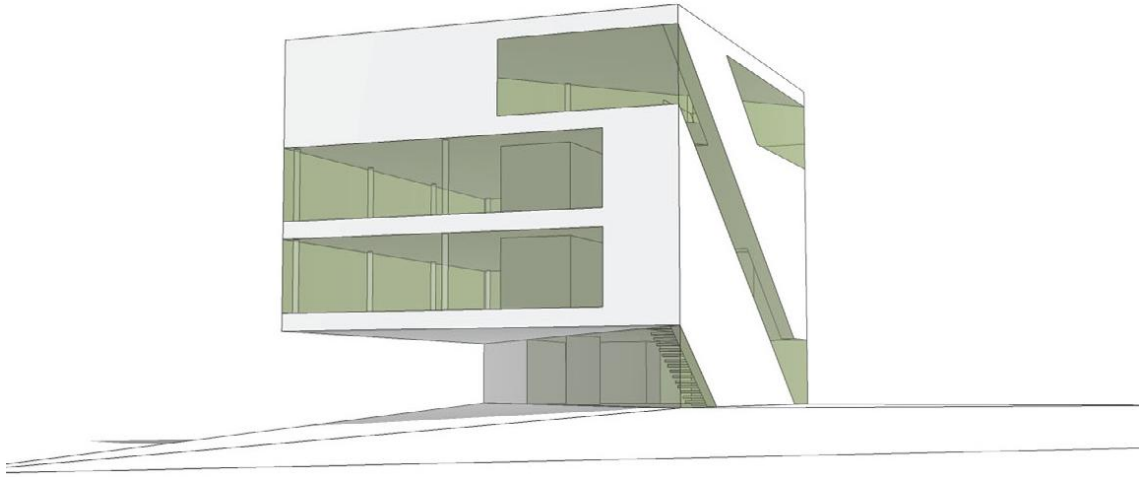
SOFiSTiK System-Datei

DVD

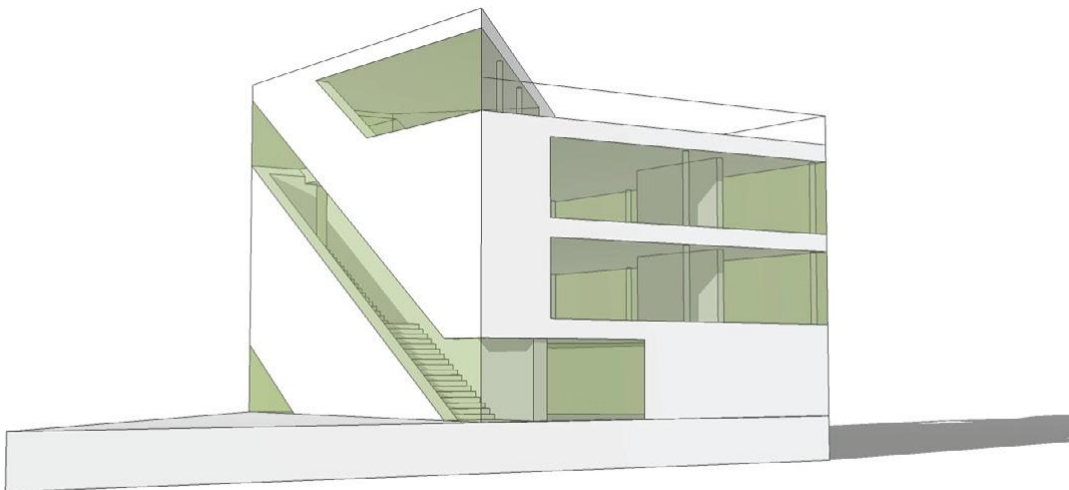
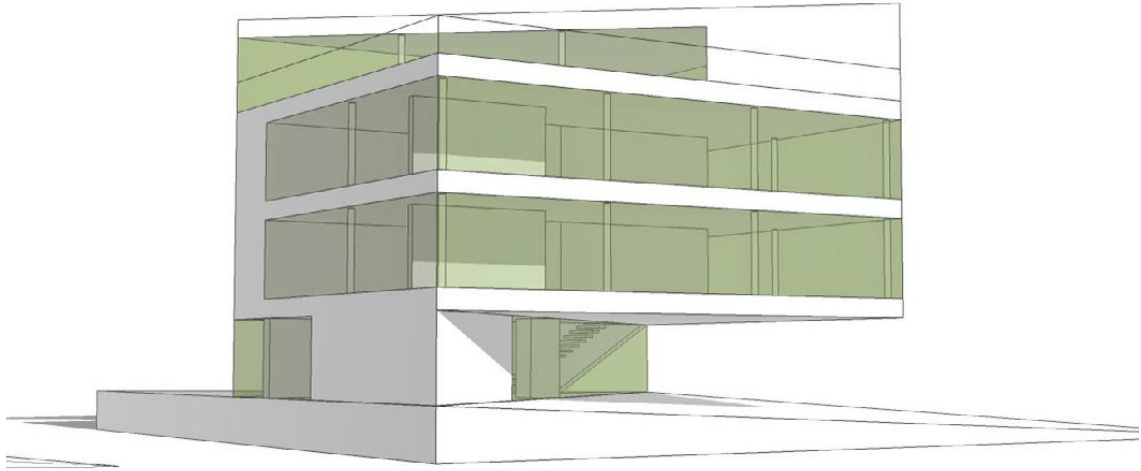
Ergebnisprotokolle

DVD

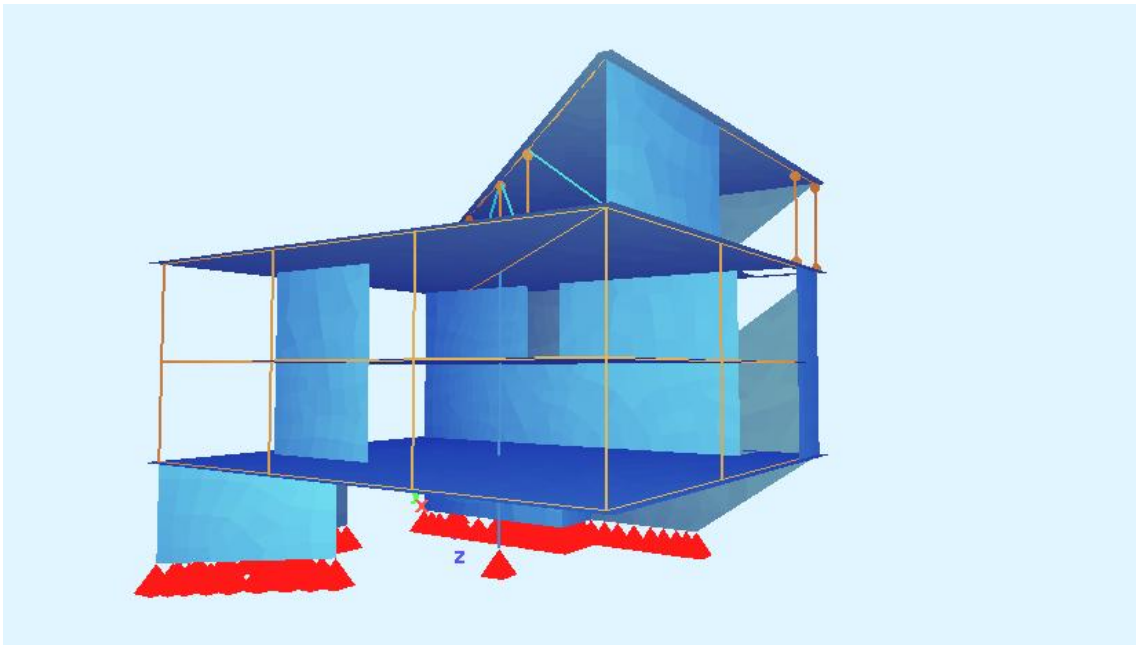
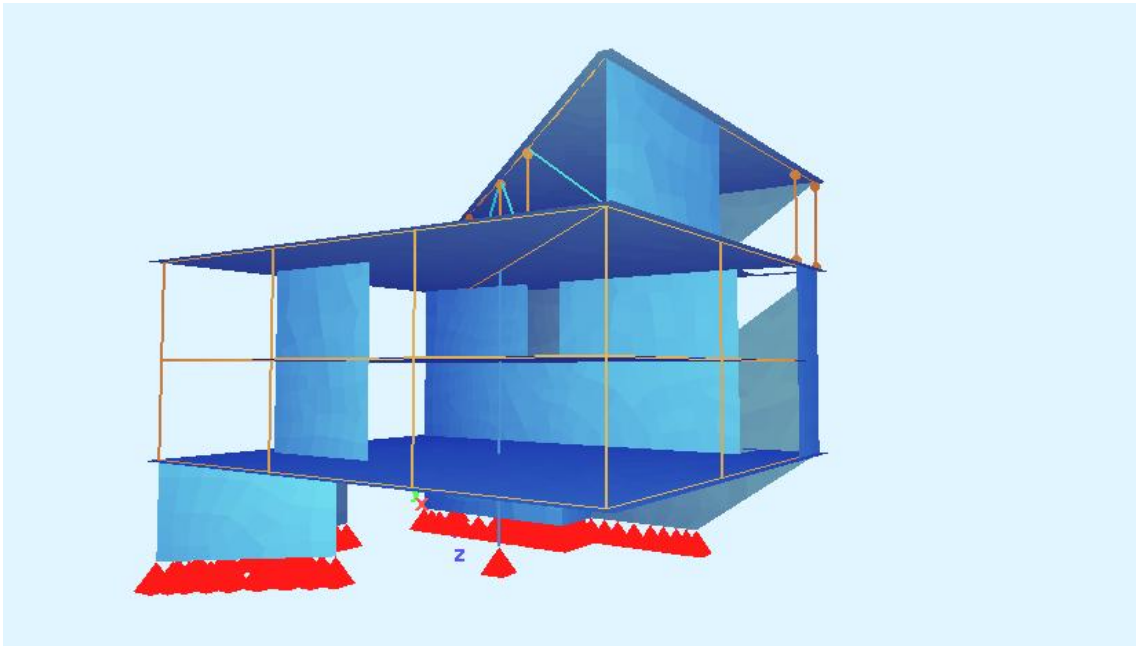
**Ansichten Bürogebäude X (einfeld engel Architekten)**



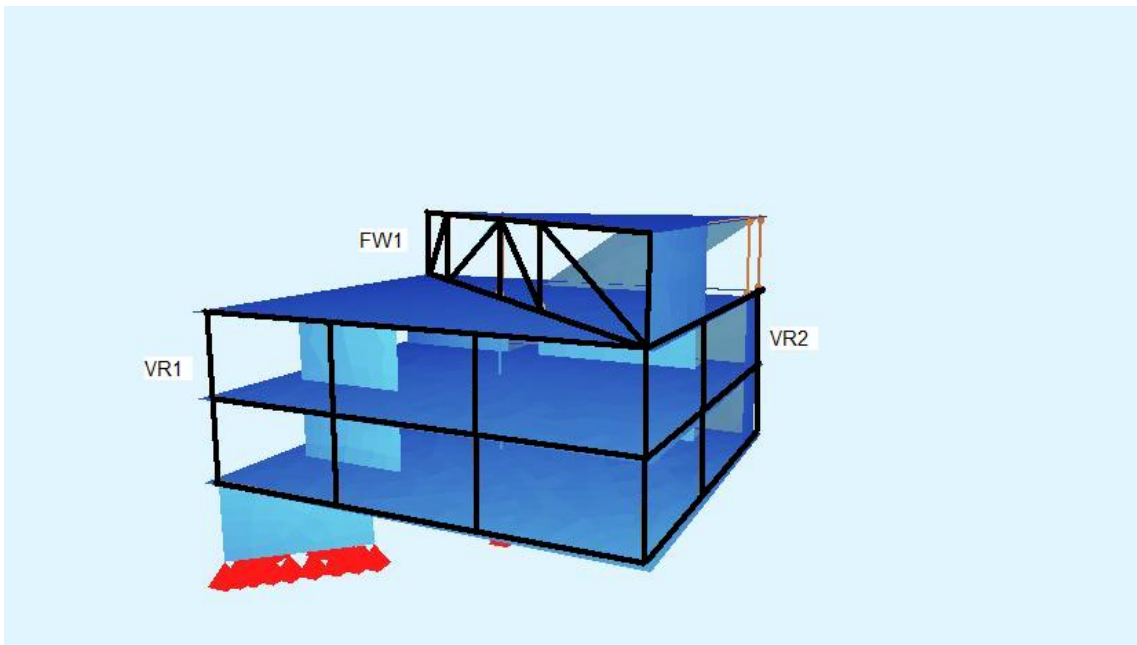
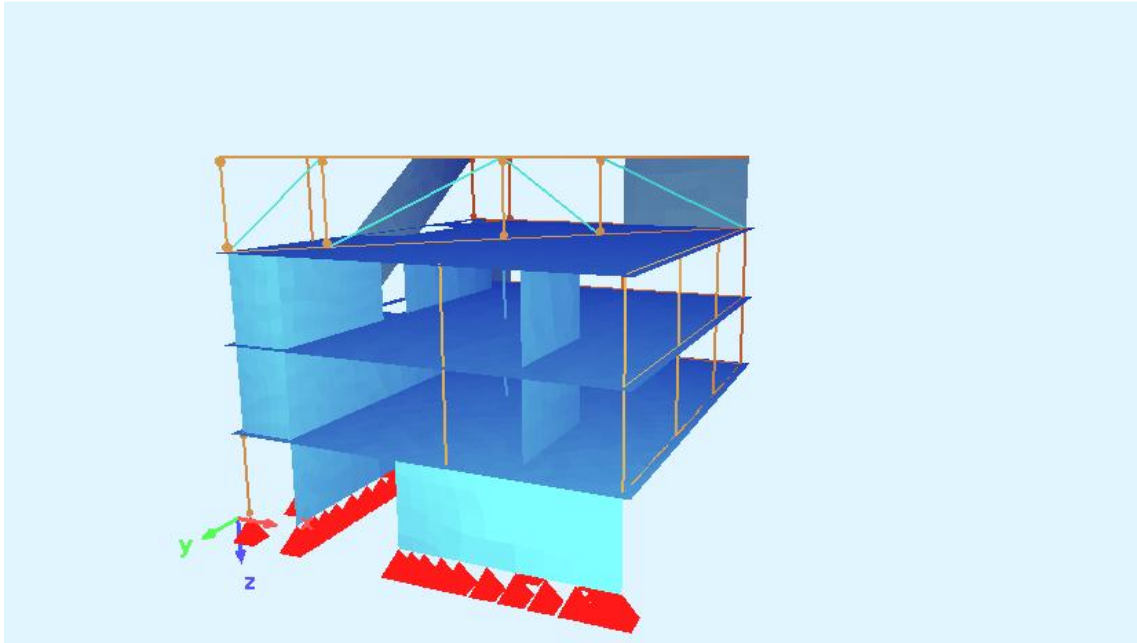
**Ansichten Bürogebäude X (einfeld engel Architekten)**



SOFiSTiK-System Ansichten



SOFiSTiK-System Ansichten



SOFiSTiK-System Ansichten

