

Projekt III

2. Studienstufe

Sommersemester 2009

Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude
und Erarbeitung von Fehlerkategorien

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Tobias Vogt
Matr.-Nr. 24212722

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Zweiter Prüfer:

Dr.-Ing. MSc Michael Eisfeld

Ausgabe am 01. Juni 2009
Abgabe am 15. August 2009

Projektarbeit für Herrn Dipl.-Ing. Tobias Vogt, Matr.-Nr. 24212722

Projektarbeit im Rahmen des Masterstudiengangs „Bauingenieurwesen“ im Fachbereich Bauingenieurwesen

Betreuer der Projektarbeit: Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Bearbeitungszeitraum: 01.06.2009 bis 15.08.2009

Arbeitstitel der Projektarbeit: Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien

Im Rahmen eines interdisziplinär angelegten Forschungsprojektes sollen Übertragbarkeit und erforderliche Modifikationen der in der Industrie weit verbreiteten System-FMEA für die Tragwerksplanung bei Gebäuden untersucht werden. Dazu soll anhand eines konkreten Bauprojektes eine Tragwerk-FMEA durchgeführt werden.

Im Einzelnen sind folgende Themen zu bearbeiten:

1. Recherche zur geschichtlichen Entwicklung und zum Stellenwert der FMEA für typische Industrieprodukte sowie Zusammenfassung der wichtigsten Arbeitsschritte einer System-FMEA
2. Grundsätzliche Vorüberlegungen zur Anwendung der FMEA für die Tragwerksplanung bei Gebäuden
3. Beschreibung des Tragwerkskonzeptes des als Anwendungsbeispiel gewählten Bürohauses:
 - Formalisierte Systembeschreibung als strukturierter Graph
 - Darstellung der Funktionszusammenhänge und der maßgebenden Bauteilnachweise
4. Durchführung einer System-FMEA für das Anwendungsbeispiel. Für alle wesentlichen Tragelemente und deren Interaktion sollen Fehlerarten, Fehlerfolgen und Möglichkeiten zur Fehlervermeidung systematisch erfasst und bewertet werden. Dazu sollen sinnvolle Formulare entwickelt bzw. aus entsprechenden Vorlagen modifiziert werden.
 - Vorbereitung und Durchführung einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung
 - Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse der Sitzung auf Formblättern
 - Auswertung von FMEA-Ergebnissen anderer Büros für dasselbe Projekt (soweit diese rechtzeitig vorliegen)
5. Ausarbeitung allgemeiner Hinweise zur Durchführung einer Tragwerk-FMEA einschließlich typischer allgemein anwendbarer Fehlerkategorien

Die Arbeit ist in zweifacher Ausfertigung einzureichen. Ein Exemplar ist dem Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau in elektronischer Form auf einem Datenträger zu überlassen. Das benutzte Fachschrifttum ist anzugeben. Eine Erklärung, dass die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe, nur unter Benutzung der angegebenen Fachliteratur angefertigt worden ist, ist beizufügen.

Die Arbeit wird gemeinsam mit Dr.-Ing. MSc Michael Eisfeld betreut.

Kassel, 29.05.2009

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

persönliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Projektarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, nur unter Benutzung der angegebenen Fachliteratur, Hilfsmittel und sonstigen Quellen (z.B. Internet) angefertigt wurde. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Kassel, den 15.08.2009

Dipl.-Ing. Tobias Vogt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Zielsetzung	3
2.2	Historische Entwicklung	3
2.3	Vorgehensweise	5
3	FMEA im Bauwesen	7
3.1	Hintergrund und Zielsetzung	7
3.2	Verschiedene FMEA–Arten und Abgrenzung	8
3.3	Tragwerk–FMEA	9
3.3.1	Statisches Konzept und Strukturanalyse	9
3.3.2	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung	9
3.3.3	Unterschiede zu System–FMEA	14
4	FMEA am Beispiel Bürohaus X	15
4.1	Anwendungsbeispiel Bürohaus X	15
4.1.1	Beschreibung	15
4.1.2	Statisches Konzept	17
4.2	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung	20
4.2.1	Vorbereitung	20
4.2.2	Durchführung	25
4.2.3	Ergebnisse	33
4.3	Erkenntnisse	33
4.3.1	Was gut funktioniert hat	33
4.3.2	Was überarbeitet werden muss	34
4.4	Fehlerkategorien	34
5	Zusammenfassung	37
6	Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	43
A	Anhang	47
A.1	Bürohaus X	47

A.2	Sitzungsmappe	59
A.3	Formblätter für Anwendungsbeispiel	72
A.4	Globaler Lastabtrag in DIN A3	102
A.5	Gliederung für Richtlinie „Tragwerk-FMEA“	105

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufwandsvergleich der Fehlerbehebung bei Fehlerverursachung und -behebung in verschiedenen Projektlebensphasen [Var04]	4
2.2	Entwicklung der FMEA [Var04]	4
3.1	Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]	13
4.1	Bürohaus X: Schnittführung [Lie09]	16
4.2	Bürohaus X: Grundriss Erdgeschoss [Lie09]	16
4.3	Bürohaus X: Ansicht 4	17
4.4	Vierendeelrahmen V1	18
4.5	Vierendeelrahmen V2	18
4.6	Fachwerk FW1	19
4.7	FE-Modell: Ansicht 4 [Tak09]	19
4.8	Systembeschreibung 1/2	21
4.9	Systembeschreibung 2/2	22
4.10	Darstellung des globalen Lastabtrags als strukturierter Graph, linker Teil	23
4.11	Darstellung des globalen Lastabtrags als strukturierter Graph, rechter Teil	24
4.12	Kritische Stellen und mögliche Fehlerarten	28
4.13	Formblatt für Fehler <i>Hauptstütze gibt nach (Verformungen)</i>	31
4.14	Formblatt für Fehler <i>Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk ist nicht ausführbar (zu hohe Lasten)</i>	32
A.1	Positionsliste 1/2	48
A.2	Positionsliste 2/2	49
A.3	Bürohaus X: Schnittführung [Lie09]	50
A.4	Bürohaus X: Grundriss Erdgeschoss [Lie09]	50
A.5	Bürohaus X: Grundriss 1. Obergeschoss [Lie09]	51
A.6	Bürohaus X: Grundriss 2. Obergeschoss [Lie09]	51
A.7	Bürohaus X: Grundriss Dachgeschoss [Lie09]	52
A.8	Bürohaus X: Ansicht 1	53
A.9	Bürohaus X: Ansicht 2	54
A.10	Bürohaus X: Ansicht 3	55

A.11 Bürohaus X: Ansicht 4	56
A.12 FE-Modell: Ansicht 1 [Tak09]	57
A.13 FE-Modell: Ansicht 2 [Tak09]	57
A.14 FE-Modell: Ansicht 3 [Tak09]	58
A.15 FE-Modell: Ansicht 4 [Tak09]	58

1 Einleitung

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

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

Um die Vorzüge einer FMEA auch dem Bauwesen zugänglich zu machen, wurde das Forschungsprojekt „Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“ (Kurztitel: Tragwerk-FMEA) ins Leben gerufen, welches u.a. von der Bundesvereinigung der Prüfsingenieure für Bautechnik e.V. (bvpi) gefördert wird. Im diesem Rahmen wird eine „Richtlinie Tragwerk-FMEA“ für das Bauwesen erstellt. An der Stelle sei auch auf den Artikel *Die Rolle des Prüfsingenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr* von Dressel [Dre09] verwiesen.

Diese Projektarbeit verfolgt das Ziel, die FMEA aus dem Maschinenbau auf das Bauwesen zu übertragen und notwendige Anpassungen entsprechend der Besonderheiten und Unterschiede vorzunehmen. Es soll ein Konzept entstehen, das eine Anwendung der FMEA im Bauwesen ermöglicht und viele der Vorteile zugänglich macht.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Tragwerk–FMEA“ folgen weitere Schritte, u.a. eine Digitalisierung und Automatisierung, wodurch die Anwendbarkeit weiter verbessert und die Anwendung vereinfacht wird.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der FMEA vorgestellt und Informationen zur historischen Entwicklung gegeben. Im 3. Kapitel wird die Zielsetzung definiert und sinnvolle Bereiche zur Anwendung der FMEA im Bauwesen bezogen auf die Projektphasen dargestellt. Es erfolgt eine Abgrenzung für welche Phasen die FMEA hier durchgeführt wird. Anschließend wird das Anwendungsbeispiel vorgestellt (Kapitel 4.1), anhand dessen die FMEA erläutert und für das Bauwesen angepasst werden soll. Im 4. Kapitel wird nun die Tragwerk–FMEA durchgeführt und ausführlich beschrieben. Im Anhang ist die vollständige Dokumentation der Ergebnisse enthalten. Außerdem wird eine Gliederung für die Richtlinie „Tragwerk–FMEA“ des bvpi gegeben.

2 Stand der Technik

Die Informationen, die in diesem Kapitel zum Stand der Technik bzgl. der FMEA gegeben werden, entstammen aus dem Heft *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse* [Var04] und der *DIN EN 60812:2006: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen [...]* [DIN06].

2.1 Zielsetzung

Das Ziel einer FMEA ist es, die Qualität von Produkten, insbesondere bezogen auf deren Robustheit und Zuverlässigkeit, sicherzustellen. Sie beschäftigt sich damit, potentielle Fehler frühzeitig zu erkennen, um diese schon im Vorfeld auszuschließen bzw. deren Folgen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Auf diese Weise sollen die wirtschaftlichen Auswirkungen, die durch Fehler entstehen, so gering wie möglich gehalten werden. Diese umfassen sowohl die Kosten für eine spätere Behebung der Fehler, als auch Umsatzverluste, die mit einem Imageverlust eines Unternehmens durch mangelhafte Produkte einhergehen. Eine qualitative Übersicht der Kostenentwicklung einer Fehlerbehebung in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Fehlerentdeckung ist in Abbildung 2.1 gegeben. Die FMEA ist grundsätzlich als allgemeingültige Methodik konstruiert, was eine Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen ermöglicht.

2.2 Historische Entwicklung

Entwickelt wurde die FMEA Anfang der 60er Jahre von der NASA, um eine Qualitätssicherung für die Apollo-Missionen zu gewährleisten. Nachdem sie in den Folgejahren in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Kerntechnik Einzug fand, wurde sie 1977 erstmals in der Automobilindustrie, bei der Ford Motor Company, eingesetzt. Eine Norm existiert in Deutschland seit 1980. Insbesondere durch die Automobilindustrie findet eine stetige Weiterentwicklung statt (vgl. Abb. 2.2). Neben den traditionellen Bereichen findet sie zunehmend auch bei Dienstleistungen und im Projektmanagement Anwendung.

Ausführliche Informationen zu Zielen, Entwicklung, Vorteilen und Durchführung sind in [Var04] und [DIN06] zu finden.

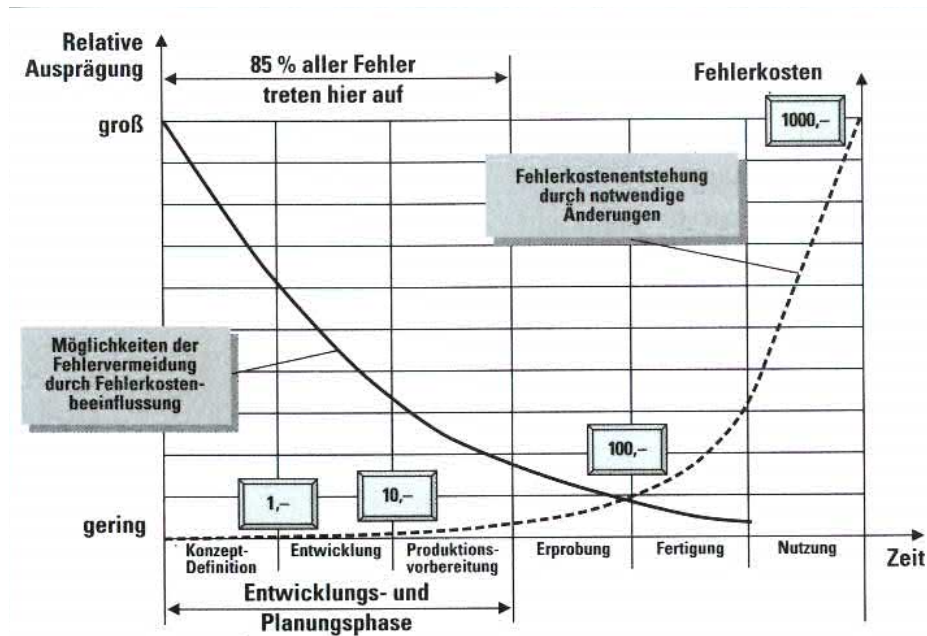


Abbildung 2.1: Aufwandsvergleich der Fehlerbehebung bei Fehlerverursachung und -behebung in verschiedenen Projektlebensphasen [Var04]

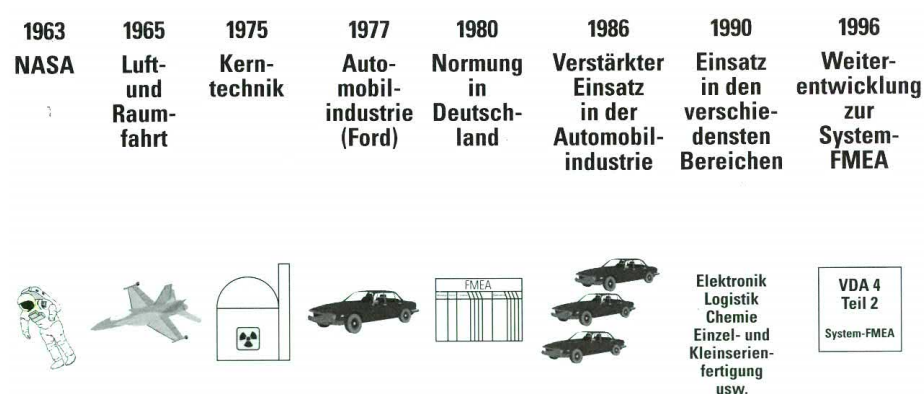


Abbildung 2.2: Entwicklung der FMEA [Var04]

2.3 Vorgehensweise

Die Analyse kann grundsätzlich in 5 Arbeitsschritten erfolgen:

1. Strukturanalyse

Alle Systemelemente sowie deren Schnittstellen (Verbindungen, Zusammenhänge und Abhängigkeiten) werden erkannt, analysiert und dokumentiert. Es erfolgt eine Darstellung in geeigneter Form.

2. Funktionsanalyse

Die jeweiligen Funktionen der Systemelemente werden analysiert und diesen auf verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet.

3. Fehleranalyse

Ein Fehler ist definiert als „Nichterfüllung einer Funktion“. Somit kann für jede Funktion ein möglicher Fehler formuliert werden. In diesem Schritt werden außerdem deren Ursachen und Folgen beschrieben. Die Analyse erfolgt heuristisch, d.h. intuitiv und auf Erfahrung basierend.

4. Risikobewertung

Um eine Abschätzung für das tatsächliche Risiko vorzunehmen, werden in der verbreitetsten Form der Risikobewertung jeweils 3 verschiedene Kriterien mit Zahlenwerten zwischen 1 und 10 bewertet. Dies sind die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache sowie die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache. Die Risikoprioritätszahl (RPZ) gibt das Risiko an, welches von einem Fehler ausgeht und errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen, also:

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

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

5. Optimierung

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

Während die Strukturanalyse von für die FMEA zuständigen Personen vorbereitet wird, erfolgen die Funktions- und Fehleranalyse, die Risikobewertung und die Optimierung im Rahmen einer „Fehleranalyse- und Optimierungssitzung“. Daran nehmen Projektbeteiligte aus allen an der Produktentstehung beteiligten Abteilungen teil.

Diese Vorgehensweise hat sich bewährt, da somit die Erfahrungen und das Wissen aller Bereiche eingebracht werden kann.

Die FMEA wird während aller Produktionsphasen angewendet. Insbesondere durch die präventive Anwendung in den ersten Phasen (Planung) kann eine Vielzahl von Fehlern bereits im Vorfeld ausgeschlossen werden. Es findet eine Unterteilung in die folgenden FMEA-Arten statt:

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

3 FMEA im Bauwesen

3.1 Hintergrund und Zielsetzung

Mit der Einführung der FMEA im Bauwesen soll die Qualität bei Bauprojekten sichergestellt werden. Insbesondere das Versagen mehrerer großer Bauwerke im In- und Ausland in den letzten Jahren hat zu Überlegungen in dieser Richtung geführt (vgl. auch [Dre09]).

Zur Zeit regeln die manigfaltigen Normungen und Richtlinien, wie ein Ingenieur Lastannahmen ermitteln, Schnittgrößen berechnen und Tragwerke bemessen muss. Auch die ansetzbaren Festigkeiten der Baustoffe sind durch viele Versuche und langjährige Erfahrungen festgelegt. Darüber hinaus sind mit den Teilsicherheitsbeiwerten Unsicherheiten sowohl seitens der Lastannahmen als auch seitens der Baustoffkenngrößen berücksichtigt und zusätzliche Reserven geschaffen. Zwei Fragen sind in den Normen bisher allerdings nur unzureichend geregelt:

1. Was ist, wenn der Ingenieur das Tragkonzept fehlerhaft entwirft oder andere Fehler, z.B. in der Berechnung oder der Eingabe in ein Programm macht?
2. Was ist, wenn der Ingenieur die vorgeschriebenen Normen und Richtlinien falsch anwendet?

Für beide Fälle wird ab einer bestimmten Größe bzw. anderer Eigenschaften eines Gebäudes ein *Vier-Augen-Prinzip* vorgeschrieben, also die Prüfung der Statik durch einen qualifizierten Prüfenieur. Diese Vorgehensweise ist sicherlich gut und erhöht die Sicherheit gegenüber o. a. Fehlerquellen. Das Problem ist allerdings, dass die Prüfung ohne allgemeingültige Systematik, sondern vom jeweiligen Prüfenieur intuitiv erfolgt. Dadurch ist die Nachvollziehbarkeit in den meisten Fällen nicht gewährleistet und die Qualität einer Prüfung hängt ausschließlich von der Erfahrung und Sorgfältigkeit des Prüfers ab. Für nicht gefundene Fehler ist nach dem aktuellen Stand der Technik (vgl. DIN 1055-100) keine weitere Sicherheitsreserve vorgesehen.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass das Auffinden der Fehler, die durch dieses Prinzip in der statischen Berechnung gefunden werden, erst sehr spät erfolgt, d.h. nachdem sie (z.Tl. auch inkl. aller Konstruktionszeichnungen) fertiggestellt wurde. Eine Behebung insbesondere der Fehler, die schon bei der Erstellung des statischen Konzeptes gemacht wurden, ist dann mit einem sehr großen Arbeitsaufwand verbunden. Durch

das üblicherweise enge zeitliche Zusammenliegen zwischen Gebäudeentwurf, Erstellung der statischen Berechnungen und der Bauausführung kommt zudem häufig ein Zeitproblem hinzu.

Genau an dieser Stelle setzt die FMEA an. Sie soll:

- gewährleisten, dass alle Fehler gefunden werden,
- dafür sorgen, dass das Auffinden der Fehler zu einem Zeitpunkt passiert, an dem die Behebung noch mit wenig Aufwand und Kosten verbunden ist.

Die wesentliche Besonderheit des Bauwesens gegenüber anderen Bereichen ist, dass es sich bei Gebäuden i.d.R. um Einzelbauwerke handelt und keine Serienfertigung wie im Maschinenbau stattfindet. Dies erfordert einige Anpassungen der Methodik, auf die in der weiteren Arbeit eingegangen wird. Insbesondere ein geringer zeitlicher Aufwand ist für den Erfolg der FMEA im Bauwesen elementar.

3.2 Verschiedene FMEA–Arten und Abgrenzung

Bis ein Bauwerk von der ersten Idee bis zur Nutzung gelangt, müssen einige Projektphasen durchlaufen werden. Die Anwendung folgender FMEA–Arten ist in den entsprechenden Phasen sinnvoll:

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

Im ersten Schritt soll die Tragwerk–FMEA für den Entwurf und die Bemessung (Planungsphase) entwickelt werden. Sie wird nach dem Erstellen des statischen Konzepts angewendet (nach den HOAI–Leistungsphasen 2 und 3, vor LP 4). Der Schwerpunkt liegt auf der Sicherstellung der Standsicherheit.

Eine Ausweitung der Tragwerk–FMEA auf die anderen aufgeführten Projektphasen kann in weiteren Schritten in Anlehnung an die hier erarbeitete Systematik erfolgen.

3.3 Tragwerk-FMEA

Die Absicht bei der Entwicklung der Tragwerk-FMEA ist es, mit möglichst wenig zusätzlichem Aufwand eine höhere Sicherheit für den Aufsteller der statischen Berechnungen zu schaffen und mögliche Fehler bereits dann zu erkennen, wenn deren Behebung noch wenig Arbeitszeit aufwendet und geringe Kosten verursacht. Sie baut auf die in Kapitel 2 beschriebene Methodik der System-FMEA im Maschinenbau auf.

Dieser Abschnitt soll als eigenständige Anleitung für eine Anwendung der Tragwerk-FMEA dienen. Es werden deshalb alle notwendigen Arbeitsschritte vollständig erläutert, es erfolgt bewusst keine Beschränkung auf eine Beschreibung der Unterschiede zur System-FMEA. Für eine ausschließliche Betrachtung der Unterschiede sei an dieser Stelle auf den Unterabschnitt 3.3.3 verwiesen.

3.3.1 Statisches Konzept und Strukturanalyse

Die Vorbereitung für die Durchführung einer Tragwerk-FMEA erfolgt durch den Aufsteller des Entwurfs und der Vorbemessung. Zuerst entwickelt er ein Tragkonzept und führt eine Vorbemessung durch. Anschließend werden alle am Tragsystem beteiligten Bauteile und Anschlüsse dargestellt (Systembeschreibung). Außerdem erfolgt eine Darstellung des globalen Lastabtrags, aus der das Zusammenwirken der einzelnen Bauteile untereinander hervorgeht. Auf diese Weise können die Auswirkungen der Fehler auf weiterführende Bauteile (Propagierung der Fehler) gut sichtbar gemacht werden.

Wichtige Unterlagen wie evtl. Bodengutachten o.ä. werden in dieser Phase gesammelt und ausgewertet.

3.3.2 Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

Vorstellung des Projekts

Der Aufsteller des Entwurfs stellt in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung das gesamte Projekt und das statische Konzept vor. Auch die vorbereitete Darstellung der Bauteile sollte vorliegen. An der Sitzung nehmen folgende Personen teil:

- Aufsteller des Entwurfs
- Aufsteller der statischen Berechnungen
- Verantwortlicher des Projekts (Vorgesetzter des Aufstellers)

- Konstrukteur
- Prüfenieur (evtl.)

Die Vorbereitung und Moderation der Sitzung kann von einer externen, nicht am Projekt beteiligten Person durchgeführt werden. Wenn in dieser Projektphase noch kein Prüfenieur feststeht, kann diese Aufgabe ein erfahrener Ingenieur des Büros übernehmen. Wenn möglich ist die Teilnahme des Prüfenieurs jedoch unbedingt vorzuziehen, da durch die gemeinsame Absprache viele Unklarheiten und eventuelle Missverständnisse bei der späteren Prüfung der statischen Berechnung vermieden werden können. Auch eine Verständigung auf eine Begrenzung der Prüfung auf definierte, kritische Stellen zur Erleichterung des Prüfprozesses kann in diesem Zusammenhang untersucht werden. Wenn beispielsweise für die Entwicklung eines FE-Modells ein weiterer Mitarbeiter des Büros involviert ist, sollte dieser auch an der Sitzung teilnehmen. Wenn bereits nominiert, kann je nach Bauprojekt auch die Teilnahme eines Mitarbeiters der ausführenden Firma sinnvoll sein.

Alle weiteren Vorgänge erfolgen im Team.

Funktionsanalyse

Die Bauteile und Anschlüsse werden analysiert und jedem die entsprechenden Funktionen zugeordnet. Je nach Größe und Komplexität ist eine Beschränkung auf die wesentlichen Stellen sinnvoll.

Anmerkung: Die Funktionsanalyse kann zu einem späteren Zeitpunkt weitgehend entfallen, da den verwendeten Bauteilen in Form eines *Bauteilkatalogs* bereits die entsprechenden Funktionen zugeordnet werden (vgl. Kapitel 6).

Fehleranalyse

Den Bauteilen und Anschlüssen (bzw. deren Funktionen) werden mögliche Fehler zugeordnet. Für jeden der Fehler (Fehlerarten) werden Fehlerfolgen und Fehlerursachen beschrieben. Insbesondere an diesem Punkt sind alle Sitzungsteilnehmer zur intensiven Mitarbeit aufgefordert, da nur durch die gemeinsamen Erfahrungen und das gemeinsame Wissen alle Fehler erkannt werden können.

Risikobewertung

In diesem Teil erfolgt die Bewertung der gefundenen Fehler. Dafür werden drei Bewertungskriterien verwendet: Die **Bedeutung (B)** der **Fehlerfolgen**, die **Auftretenswahrscheinlichkeit (A)** der **Fehlerursache** und die **Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)** des **Fehlers** bzw. der **Fehlerursache**. Anders als im Maschinenbau kann für die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht auf rechnerische oder durch Versuche abgeleitete Werte zurückgegriffen werden. Die Einschätzung basiert im Bauwesen auf Erfahrungswerten und subjektiven Einschätzungen. Aus diesem Grund erscheint ein Bereich von Zahlenwerte zwischen 1 („geringes Risiko“ bzw. „gut“) und 5 („hohes Risiko“ bzw. „schlecht“) sinnvoll. Die Errechnung der Risikoprioritätszahl erfolgt durch Multiplikation der Zahlenwerte, also:

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

Somit können die Risiken eines jeden Fehlers durch eine heuristische Bewertung von Fachleuten auf quantitative Art und Weise beschrieben werden.

Die einzelnen Fehler werden nach Größe der Risikoprioritätszahl geordnet. Die Zahlenwerte liegen zwischen 1 (kein bzw. sehr geringes Risiko) und 125 (sehr hohes Risiko). Bei Überschreitung einer festgelegten Grenze müssen nun Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Optimierung

Die Optimierung erfolgt durch Festlegung geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos. Dies können zum einen Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache und zum anderen Maßnahmen zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache sein. Wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden können oder die festgelegten Maßnahmen nicht ausreichen, ist das statische Konzept zu überarbeiten.

Die Optimierungsmaßnahmen führen zu veränderten Bewertungszahlen. Je nachdem welcher Bereich verbessert wurde, wird die zugehörige Bewertungszahl reduziert.

Ergebnisse der Sitzung

Die Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Optimierung werden sorgfältig in Formblättern nach [DIN06] (vgl. Abb. 3.1) dokumentiert. Für jede der festgelegten Maßnahmen wird ein Verantwortlicher bestimmt, der für die Umsetzung zuständig ist. Auch ein Termin für die Durchführung ist festzulegen.

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

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

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

Abbildung 3.1: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]

3.3.3 Unterschiede zu System-FMEA

Die Unterschiede der Tragwerk-FMEA im Bauwesen zu der System-FMEA im Maschinenbau lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei der Tragwerk-FMEA erfolgt eine Beschränkung der betrachteten Bauteile und Anschlüsse. Da hier keine Serienfertigung stattfindet sondern Einzelbauwerke errichtet werden, wäre eine Betrachtung *aller* möglichen Fehler zu umfangreich und wirtschaftlich nicht umsetzbar.
- Die Bewertung erfolgt im Bauwesen z.Tl. intuitiver als im Maschinenbau. Das betrifft insbesondere die Auftretenswahrscheinlichkeit, die im Maschinenbau in der Regel durch Auswertung umfangreicher Untersuchungen berechnet werden kann.
- Aus diesem Grund ist eine Beschränkung der Bewertungszahlen auf einen Bereich zwischen 1 und 5 sinnvoll.

Zur Veranschaulichung wurde eine FMEA an einem Anwendungsbeispiel durchgeführt. Eine Dokumentation ist in Kapitel 4 zu finden.

4 FMEA am Beispiel Bürohaus X

Um für die Richtlinie „Tragwerk–FMEA“ wichtige Erkenntnisse zu gewinnen und die Anwendung der FMEA zu veranschaulichen, wurde bei Einfeld Ingenieure eine FMEA an einem Anwendungsbeispiel durchgeführt. In diesem Kapitel wird nun das Anwendungsbeispiel vorgestellt und die durchgeführte FMEA dokumentiert.

Den Kern der Tragwerk–FMEA stellt die Fehleranalyse- und Optimierungssitzung dar. Die Vorgehensweise wird beispielhaft erläutert und beschrieben. Die zugehörigen vollständigen Dokumente sind im Anhang enthalten.

4.1 Anwendungsbeispiel Bürohaus X

4.1.1 Beschreibung

Das Bürohaus X besteht aus 4 Geschossen und wird in Stahlbeton- bzw. Stahlverbundbauweise hergestellt. Es hat im Grundriss die Abmessungen 16 m * 14 m. Jedes Geschoss hat eine Höhe von 3 m, was zu einer Gesamthöhe von 12 m führt. Das besondere an diesem Gebäude ist, dass die Grundrisse des Erd- und Dachgeschosses dreieckig, die Grundriss des 1. und 2. OG hingegen rechteckig sind. Die oberen Geschosse kragen somit zur Hälfte über das Erdgeschoss aus. Es erfolgt in diesem Bereich keine Abstützung.

Eine grundlegende Einsicht in das Gebäude wird in dem Schnitt (vgl. Abb. 4.1), dem Grundriss des Erdgeschosses (vgl. Abb. 4.2) sowie der Ansicht (vgl. Abb. 4.3) gegeben.

Genaue Informationen können den Positionslisten (vgl. Abb. A.1 und A.2), den Grundrissen (vgl. Abb. A.3 bis A.7) sowie den Ansichten (vgl. Abb. A.8 bis A.11) im Anhang entnommen werden.

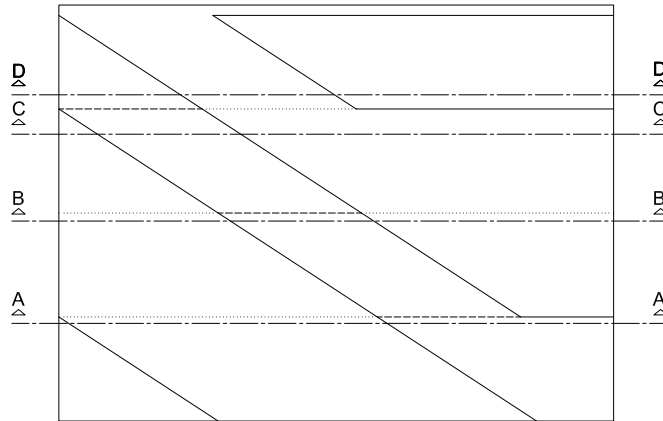


Abbildung 4.1: Bürohaus X: Schnittführung [Lie09]

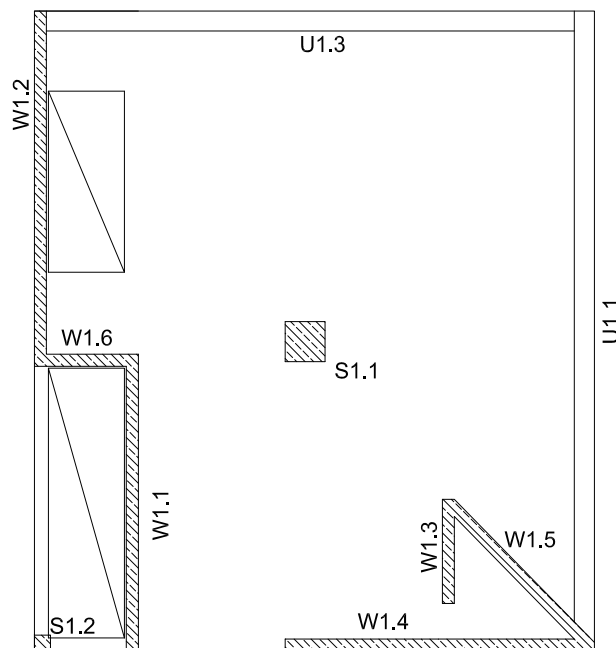


Abbildung 4.2: Bürohaus X: Grundriss Erdgeschoss [Lie09]

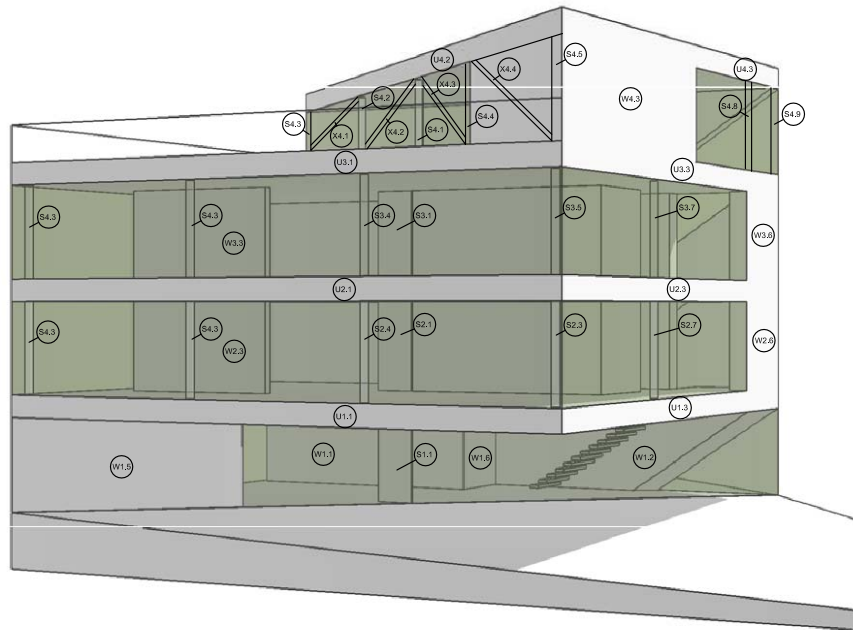


Abbildung 4.3: Bürohaus X: Ansicht 4

4.1.2 Statisches Konzept

Die tragende Bauteile sind die Vierendeelrahmen V1 und V2, das Fachwerk FW1, die Hauptstütze S1 (S1.1, S2.1, S3.1) sowie alle weiteren Wände und Stützen (vgl. Abb. A.8 bis A.11).

Die Gebäudeaussteifung erfolgt durch innere und äußere Wände, die überwiegend im Bereich der Treppe angeordnet sind (vgl. Abb. 4.2 und 4.3). Im Dachgeschoss ist außerdem das Fachwerk beteiligt. Die Decken sorgen für eine Verteilung der Lasten in die vertikalen Aussteifungselemente.

Die vertikalen Lasten aus Eigengewicht, Schnee und Verkehr werden von der Dachdecke bzw. den Zwischendecken aufgenommen und über Stützen und Wände in die Fundamente abgeleitet. Die Lasten aus der Auskragung werden von 2 Vierendeelrahmen aufgenommen (vgl. Abb. 4.4 und 4.5). Die Rahmen lagern an einer Seite jeweils auf einer Wand auf, auf der anderen Seite erfolgt eine Aufhängung in ein Fachwerk (vgl. Abb. 4.6). Die Lasten aus den Vierendeelrahmen werden dann über das Fachwerk in die Hauptstütze (Druckbeanspruchung) und zwei Wände (Zugbeanspruchung) eingeleitet. Das gesamte Tragkonzept kann auf anschauliche Weise dem FE-Modell (vgl. Abb. 4.7 sowie Abb. A.12 bis A.15 im Anhang) entnommen werden.

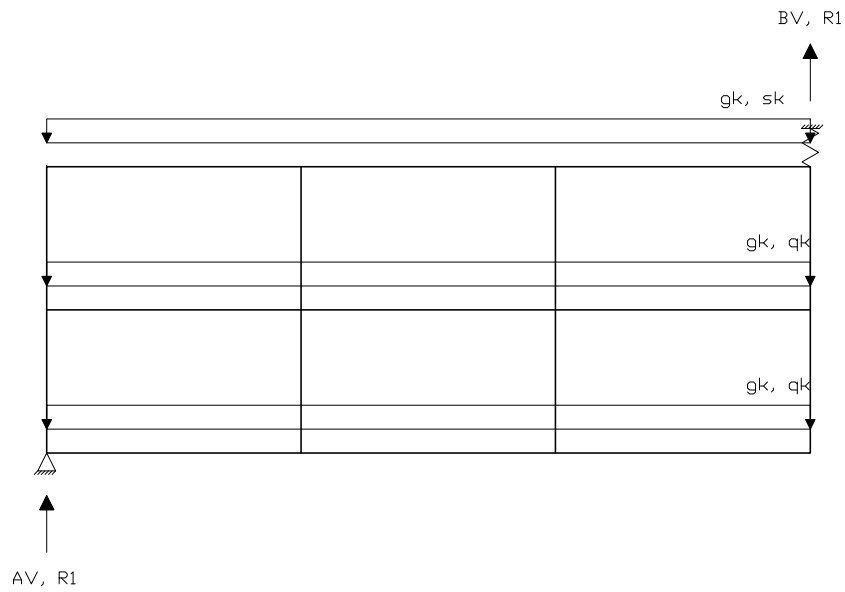


Abbildung 4.4: Vierendeelrahmen V1

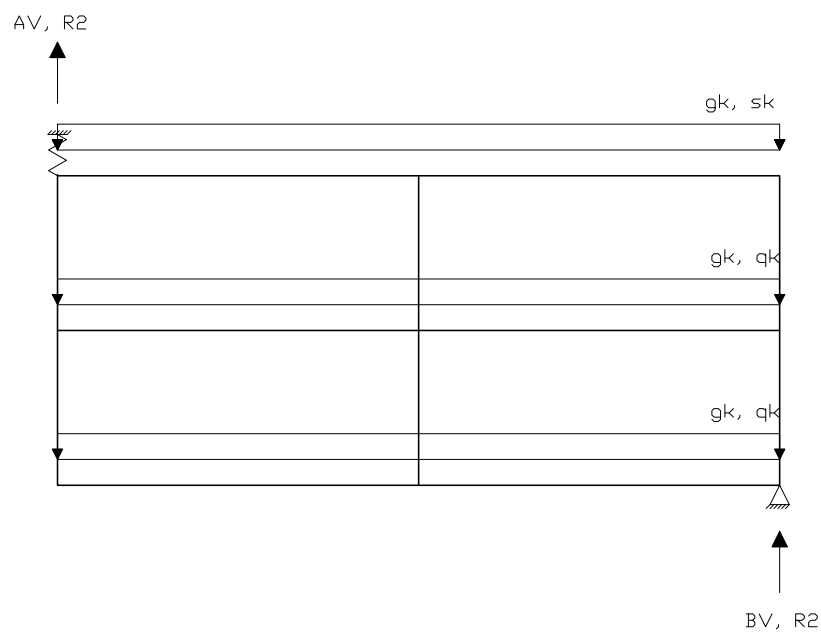


Abbildung 4.5: Vierendeelrahmen V2

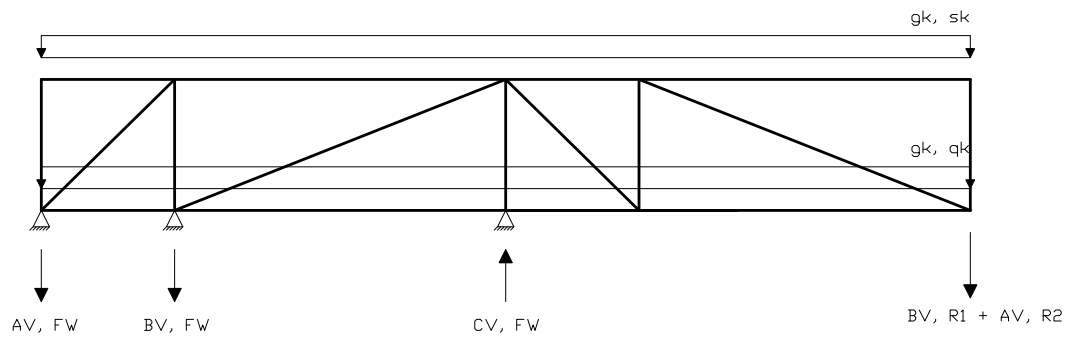


Abbildung 4.6: Fachwerk FW1

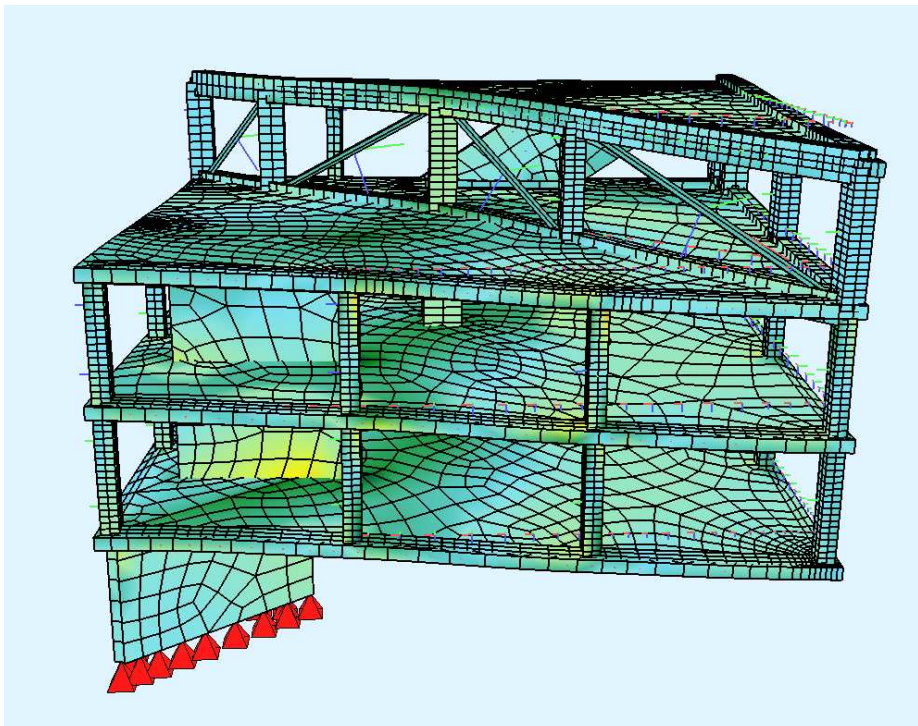


Abbildung 4.7: FE-Modell: Ansicht 4 [Tak09]

4.2 Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

4.2.1 Vorbereitung

Statisches Konzept

Bereits im Vorfeld dieser Projektarbeit erfolgte die Entwicklung des statischen Konzeptes und die Vorbemessung. Hierfür wurde ein 3–dimensionales FE–Modell mit der Software *Sofistik* erstellt. Außerdem erfolgte eine 2–dimensionale Berechnung mit der Software *Friedrich und Lochner*.

Strukturanalyse

Um die Tragstruktur zu analysieren, wurden alle am Lastabtrag beteiligten Bauteile aufgelistet und in einer Systembeschreibung dargestellt (vgl. Abb. 4.8 und 4.9). Die Aufteilung erfolgte entsprechend der Geschosse und nach der Art der Bauteile. Die Knoten und Anschlüsse wurden getrennt aufgeführt. Es erfolgte eine Zusammenfassung gleicher bzw. ähnlicher Anschlüsse, z.B. alle Verbindungen zwischen einer Decke und einer Stütze als Anschluss A07.

Anschließend wurde der globale Lastabtrag als strukturierter Graph dargestellt (vgl. Abb. 4.10 und 4.11). Der Entwurf hierzu stammt von Dominik Liening von WTM Engineers Hamburg. Es wurden einige Änderungen eingearbeitet und die Darstellung hinsichtlich der Verständlichkeit und Übersichtlichkeit optimiert. Eine größere und zusammenhängende Darstellung in DIN A3 befindet sich im Anhang A.4.

Die Idee hinter der Darstellung des globalen Lastabtrags ist, dass das Gebäude über die volle Höhe *geschnitten* und *aufgeklappt* wird. Die Bauteile eines jeden Geschosses werden nebeneinander angeordnet, die Geschosse übereinander (wie in der Realität). Zusammenhängende Tragelemente wie das Fachwerk und die Vierendeelrahmen sind durch einen Rahmen miteinander verbunden. Die durchgehenden Wände und Stützen sind durch langgezogene Kästen in den entsprechenden Geschossen dargestellt. Die Kästen der Decken gehen über die volle Breite und sind zur Übersichtlichkeit schraffiert. Die Unterzüge befinden sich als Verbundquerschnitte hauptsächlich in Deckenebene und wurden entsprechend positioniert. Pfeile kennzeichnen den Kraftfluss und das Zusammenwirken der einzelnen Bauteile untereinander. Die Pfeile innerhalb eines Tragelementes sind mit einer anderen Farbe und einem anderen Linientyp dargestellt. Die Anschlüsse werden nummeriert und an den entsprechenden Pfeilen angetragen. Die Nummern sind in den Positionslisten zu finden (vgl. Abb. A.1 und A.2). Die gemeinsame Verwendung der Stützen an der Auskragungsspitze ist durch eine Schraffur gekennzeichnet. Der Lastfluss von der Abhängung zu dem Fachwerk ist aufgrund der Wichtigkeit durch je zwei dicke Pfeile kenntlich gemacht.

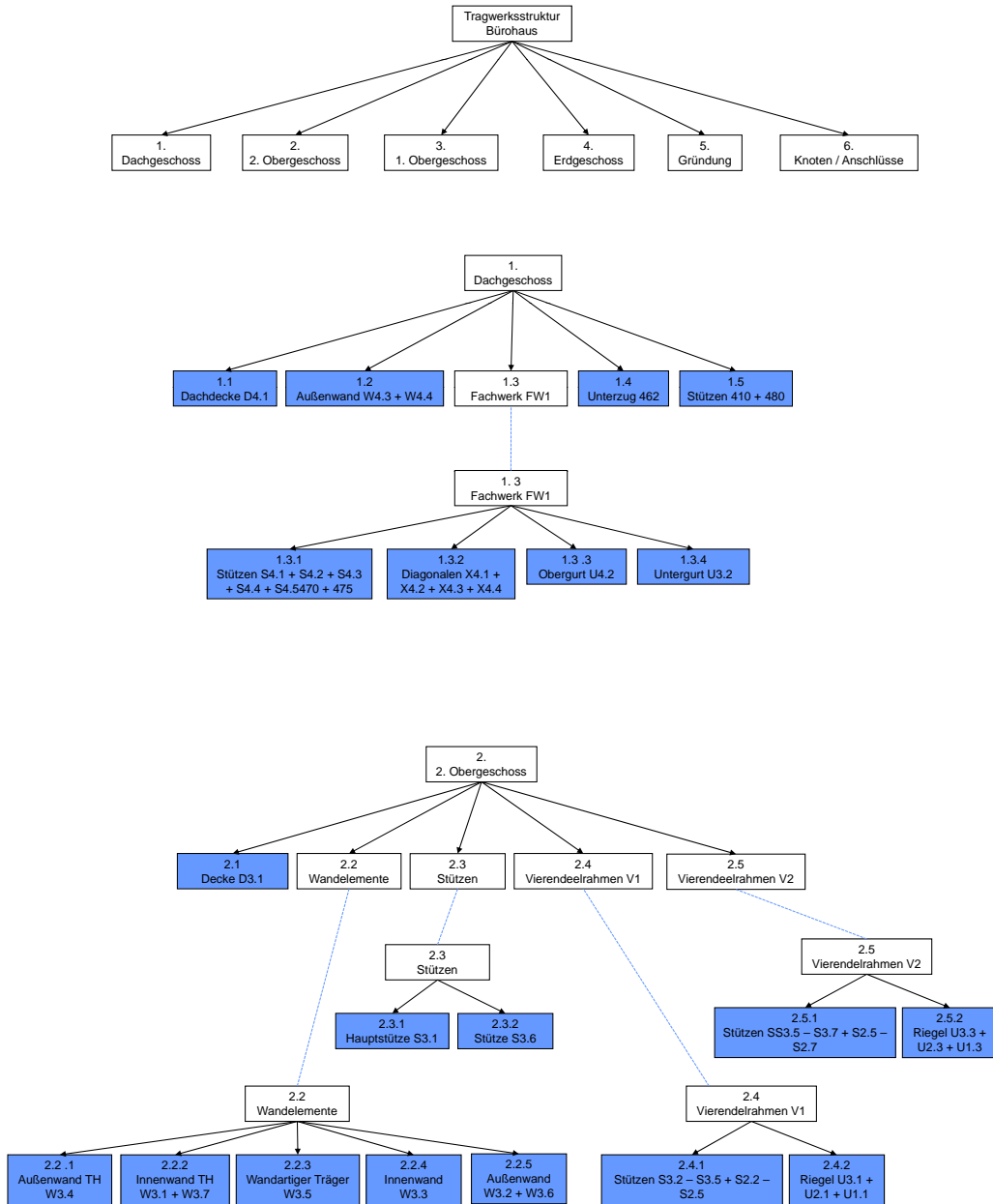


Abbildung 4.8: Systembeschreibung 1/2

4 FMEA am Beispiel Bürohaus X

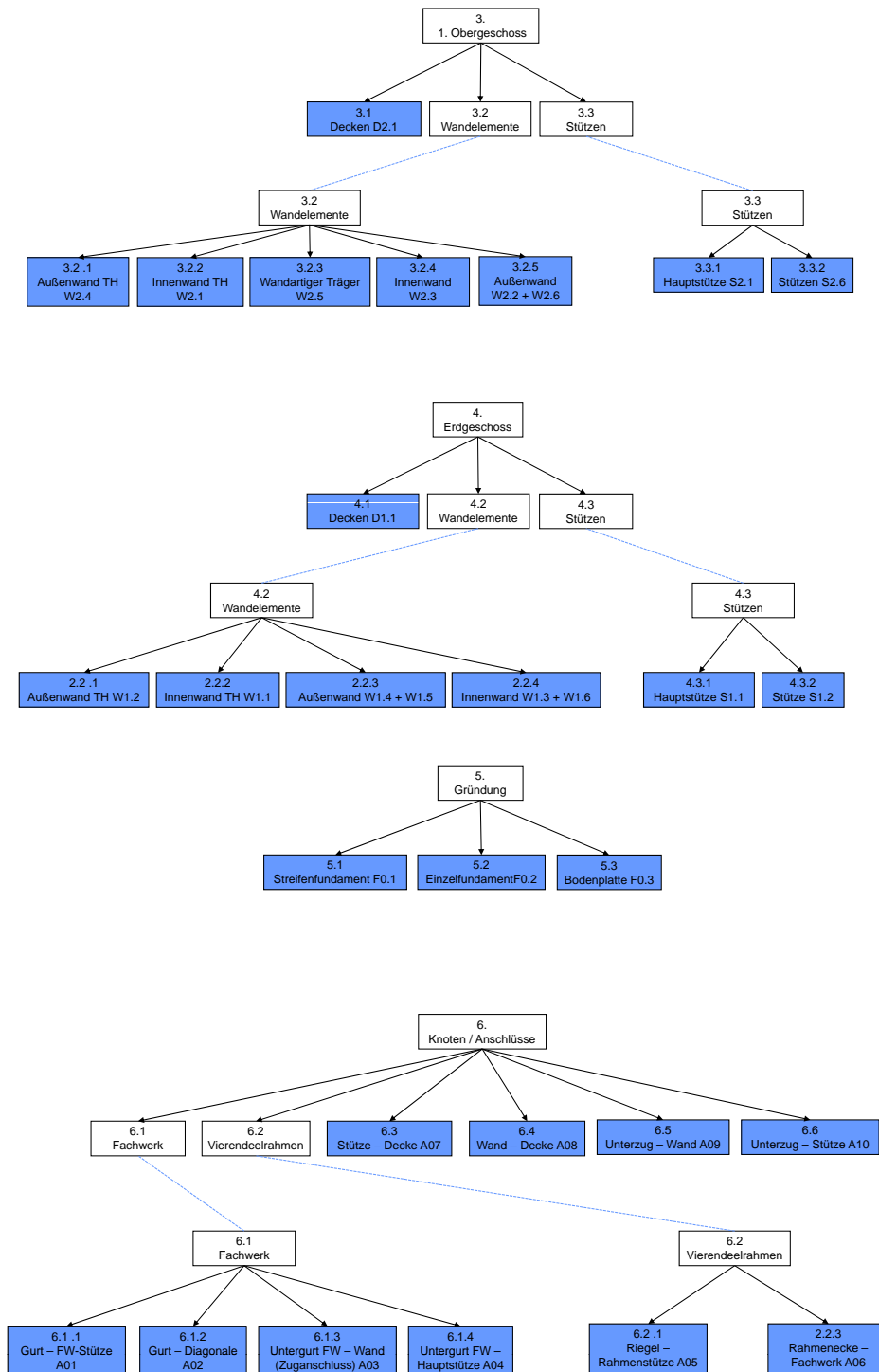


Abbildung 4.9: Systembeschreibung 2/2

4.2 Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

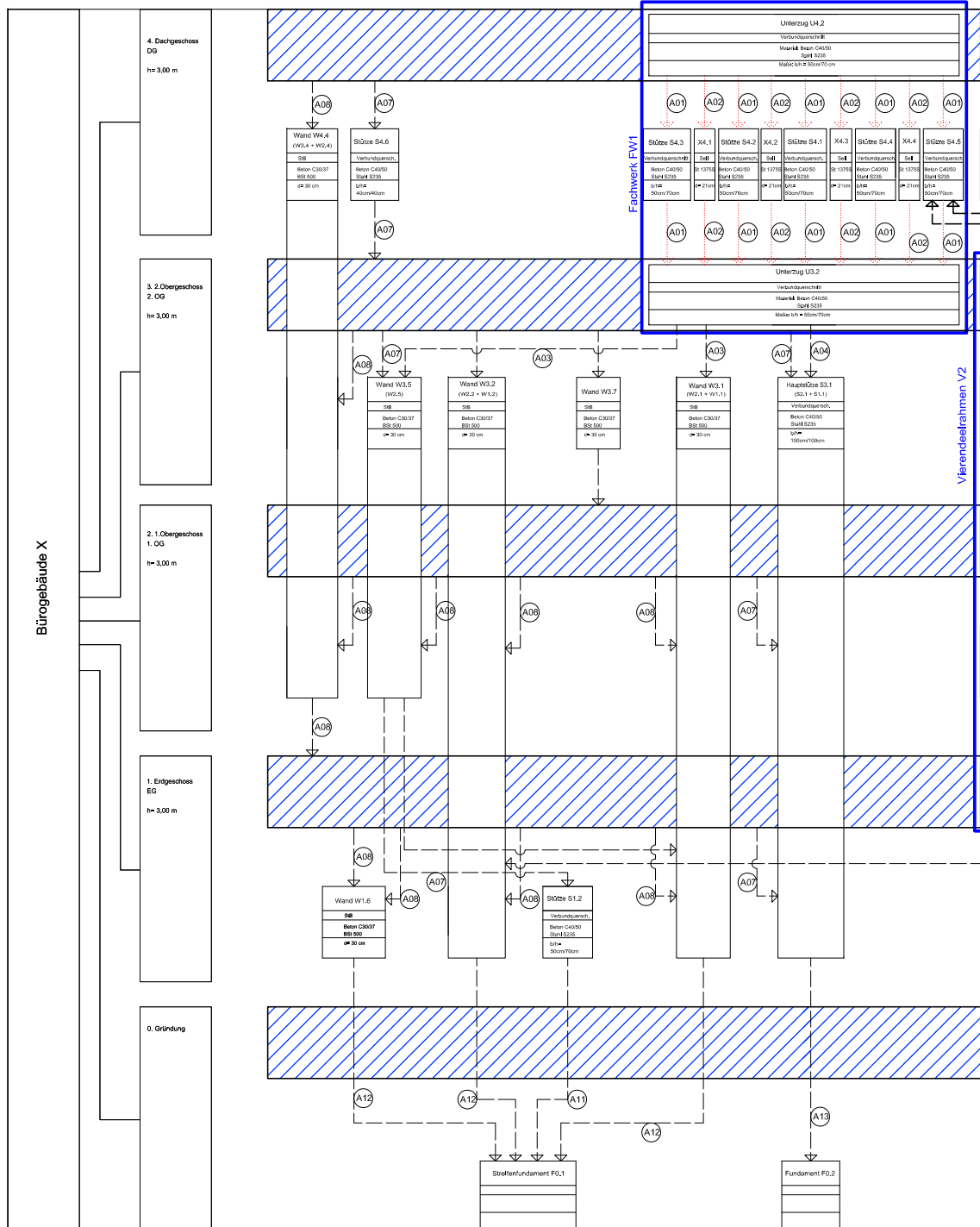


Abbildung 4.10: Darstellung des globalen Lastabtrags als strukturierter Graph, linker Teil

4 FMEA am Beispiel Bürohaus X

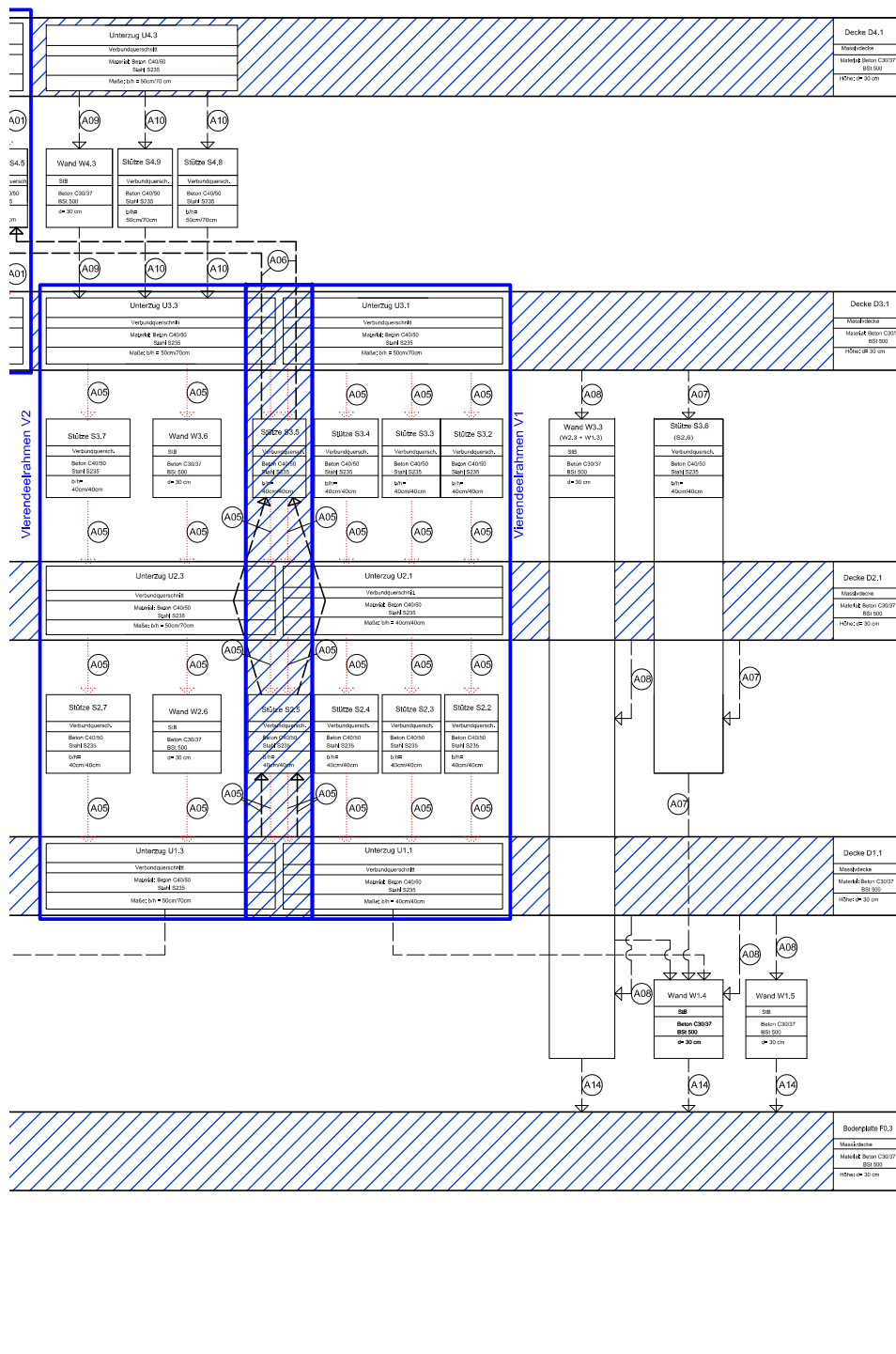


Abbildung 4.11: Darstellung des globalen Lastabtrags als strukturierter Graph, rechter Teil

Sitzungsmappe

Im Zuge der Einladung zur Fehleranalyse- und Optimierungssitzung wurde allen Sitzungsteilnehmern eine Mappe mit folgendem Inhalt ausgehändigt:

- grundlegende Informationen zur FMEA
- Zielsetzung und Erwartung an die Sitzung
- Beschreibung und Darstellung des Anwendungsbeispiels
- Vorstellung des statischen Konzeptes

Mit diesen Unterlagen konnte sich jeder bereits im Vorfeld auf das Projekt und die Sitzung vorbereiten. Die Sitzungsmappe ist vollständig im Abschnitt A.2 des Anhangs enthalten.

4.2.2 Durchführung

Es wurde eine bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung bei Eisfeld Ingenieure durchgeführt. Die Dauer betrug ca. drei Stunden. Im Folgenden wird der Ablauf beschrieben und die Ergebnisse und Erkenntnisse aufgeführt.

Teilnehmer

An der Sitzung nahmen folgende Personen teil:

Mitarbeiter	Position
Uwe Wolf	aus Sicht des Aufstellers
Michael Eisfeld	aus Sicht des Verantwortlichen
Wolfgang Eisfeld	aus Sicht des Prüfers
Yousef Salamah	aus Sicht des Konstrukteurs
Borys Takunov	Berechnung des FE-Modells
Tobias Vogt	Organisation und Vorbereitung der Sitzung

Einleitung

Zu Beginn wurden die Grundsätze der FMEA, Ziele des Forschungsprojekts und die Erwartungen an die Sitzung vorgestellt. Darauf folgte eine Beschreibung des Anwendungsbeispiels mit allen wichtigen Informationen und Besonderheiten.

Funktions- und Fehleranalyse

Nach dieser Einleitung erfolgte ein Brainstorming in Verbindung mit einer Diskussion über die kritischen Bauteile und Anschlüsse. Als kritisch eingestuft wurden:

- die Bauteile und Anschlüsse des Fachwerks,
- die Bauteile und Verbindungen der Vierendeelrahmen,
- der Anschluss der Vierendeelrahmen an das Fachwerk (Abhängung),
- die Zugverankerung des Fachwerks an die äußeren Wände bzw. die äußere Wand,
- sowie die Hauptstütze.

Obwohl die Hauptstütze ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Tragkonzepts ist, wurde sie in der Sitzung als nicht besonders kritisch eingestuft, da sie durch ihre großen Abmessungen und die vergleichsweise geringe Auslastung nicht besonders risikobehaftet ist. Sie wurde dennoch in die Formblätter mit aufgenommen.

Die Funktionen und die möglichen Fehlerarten wurden besprochen und dokumentiert. Jedem Bauteil wurde eine Funktion zugeordnet und verschiedene Fehlerarten gefunden. Zur Vereinheitlichung wurden in der Nachbearbeitung folgende Definitionen getroffen:

Für **Bauteile** erfolgt eine Einteilung in die Fehlerarten *gibt nach (Verformungen)* und *versagt komplett*. Auf diese Weise soll die Betrachtung nicht nur auf ein vollständiges Versagen beschränkt, sondern auch auf mögliche Auswirkungen von Nachgiebigkeiten

ausgeweitet werden. Die möglichen Fehlerarten der **Anschlüsse** werden noch um den Punkt *nicht ausführbar (zu hohe Lasten)* ergänzt. Für die **Gründung** wird die Fehlerart *große Setzung* betrachtet. Eine Übersicht der kritischen Stellen und der möglichen Fehlerarten ist Abb. 4.12 zu entnehmen.

Nachdem alle Sitzungsteilnehmer angehört und keine weiteren möglichen Fehler gefunden wurden, erfolgte für jeden Fehler die Definition der Fehlerfolgen und -ursachen. Hierfür wurde jeder Fehler auf ein eigenes Formblatt (vgl. Abb. 3.1) übertragen und die Ursachen und Folgen eingetragen.

In der durchgeführten Sitzung kam dieser Teil etwas zu kurz und es wurden keine guten Ergebnisse erzielt. Als Grund hierfür ist zu nennen, dass den Sitzungsteilnehmern zum einen natürlich die Erfahrung für eine sinnvolle Benennung von Folgen und Ursachen fehlte, sie aber auch nicht ausreichend damit vertraut gemacht wurden, welche Art von Folgen und Ursachen in den Formblättern eingetragen werden sollte. Als Fehlerfolge wurde häufig zu grob „Gebäude stürzt ein“ genannt, es erfolgte keine engere Propagierung auf anschließende Bauteile und somit direkte Auswirkungen an der lokalen Stelle. Zu diesem Zeitpunkt lag auch die Darstellung des globalen Lastabtrags noch nicht vor, die für die Propagierung der Fehler und somit der Definierung der Folgen und Ursachen hilfreich und notwendig gewesen wäre. Maßnahmen zur Vermeidung oder Entdeckung von Fehlern bzw. Fehlerursachen wurden in der Sitzung fast gar nicht besprochen.

Da an dieser Stelle ein vollständiger und verständlicher Einblick gegeben werden soll, wie Fehlerursachen und -folgen beschrieben werden können, wurden die fehlenden Einträge in den Formblättern ergänzt. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wurde die Definition sehr allgemein gehalten; in der späteren Anwendung sind insbesondere die beschriebenen Maßnahmen auf das entsprechende Projekt und die Besonderheiten des jeweiligen Büros anzupassen. Eine Begrenzung der Einträge auf wenige, wesentliche Punkte führt zu einer gesteigerten Effizienz der FMEA.

Um einmal anschaulich darzustellen, wie die Definition von Fehlern, deren Ursachen und Folgen sowie entsprechender Maßnahmen aussehen kann, wird nun exemplarisch ein Fehler in einem Bauteil und ein Fehler in einem Anschluss beschrieben. Die vollständige Dokumentation ist in den Formblättern im Anhang enthalten (vgl. Abschnitt A.3).

1. **Fehler in einem Bauteil:** *Hauptstütze gibt nach (Verformungen)* (vgl. Abb. 4.13)

Die **Funktion** der Hauptstütze ist es, die Lasten aus den Decken und dem Fachwerk aufzunehmen und sie in die Fundamente weiterzuleiten. Als erstes erfolgt die Betrachtung, welche **Folgen** dieser Fehler hat:

Wenn sich die Stütze verformt, führt dies zu einer Absenkung. Da die Stütze für die Decken und das Fachwerk als Auflager dient, bedeutet das für diese

4 FMEA am Beispiel Bürohaus X

kritische Stellen:	Fachwerk: Bauteile, Anschlüsse Vierendeelrahmen Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk Zugverankerung Fachwerk - Wand Hauptstütze		
Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart	Fehlernr.
Hauptstütze	S3.1 (S2.1, S1.1)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	01a 01b
Gründung / Einzelfundament	F0.2	große Setzung	02
Vierendeelrahmen-Stütze	(S.2.2, S.2.3, S2.4, S2.5, S2.7, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.7)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	03a 03b
Vierendeelrahmen-Riegel	(U1.1, U1.3, U2.1, U2.3, U3.1, U3.3)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	04a 04b
Fachwerk-Gurt	(U3.2, U4.2)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	05a 05b
Fachwerk-Stütze	(S4.1, S4.2, S4.3, S4.4, S4.5)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	06a 06b
Fachwerk-Diagonale	(X4.1, X4.2, X4.3, X4.4)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	07a 07b
Anschluss Vierendeelrahmen: Riegel-Stütze	(A05)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	08a 08b 08c
Anschluss Vierendeelrahmen - Fachwerk	(A06)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	09a 09b 09c
Anschluss Fachwerk an zugbeanspruchte Wand	(A03)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	10a 10b 10c
Anschluss Fachwerk: Gurt- Stütze	(A04)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	11a 11b 11c
Anschluss Fachwerk: Diagonale- Gurt	(A02)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	12a 12b 12c

Abbildung 4.12: Kritische Stellen und mögliche Fehlerarten

Bauteile also eine Auflagerabsenkung. Dadurch verändert sich die Belastung in den Decken, je nach Größe der Absenkung dreht sich die Richtung der Biegebeanspruchung sogar um. Die umliegenden Stützen und Wände in den Geschossen werden stärker beansprucht. Das Fachwerk ist grundsätzlich statisch bestimmt gelagert, durch die Verbindung zu den Decken usw. hat dies dennoch Auswirkung auf die angrenzenden Bauteile. Insbesondere die damit verbundene Absenkung an der Auskragungsspitze führt zu einer geringeren Federsteifigkeit des gesamten Fachwerks für die Abhängung. Dies hat wiederum Einfluss auf die Lagerung der Vierendeelrahmen und somit auf die Bauteile die durch diesen ausgesteift werden.

Da sich die Tragwerk-FMEA nicht mit der Ausführung sondern mit der Bemessung und dem Entwurf beschäftigt, werden als **Fehlerursachen** keine Punkte genannt, die sich mit möglichen Materialfehlern, falschem Betonieren o. ä. beschäftigen. Stattdessen sind die möglichen Fehlerursachen eine *falsche Lastermittlung*, eine *fehlerhafte Schnittgrößenermittlung* und eine *fehlerhafte Bemessung*. Diese Punkte können noch um *Fehler im Tragkonzept* ergänzt werden, die z.B. eine höhere Belastung der Stütze als vorgesehen berücksichtigen.

Es ist oftmals schwierig, Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen sauber voneinander abzugrenzen. Als Ansatz hierfür kann folgende Definition dienen: Eine **Vermeidungsmaßnahme** stellt sicher, dass ein Fehler gar nicht erst auftritt, sie betrachtet also Maßnahmen die im Vorfeld ergriffen und vorbereitet werden. In dem Beispiel könnte dies die *Verwendung zertifizierter Programme* sein, wodurch sichergestellt wird, dass kein auf das verwendete Programm zurückzuführender Fehler eintritt. Auch eine *Checkliste mit wichtigen Punkten* kann dazu dienen, dass nichts vergessen wird und keine wesentlichen Punkte unberücksichtigt bleiben. **Entdeckungsmaßnahmen** werden während oder nach der Bearbeitung durchgeführt und bieten die Möglichkeit, Fehler bzw. Fehlerursachen rechtzeitig zu entdecken. Im verwendeten Beispiel kann dies eine *saubere Dokumentation der Lastannahmen* sein, die z.B. mit einem erfahrenen Kollegen durchgesprochen werden. Die Schnittgrößenermittlung kann allgemein *auf Plausibilität geprüft* oder die Ergebnisse des Programms mit *einfachen Handrechnungen* verglichen werden. Gleiches kann auch zur Entdeckung einer fehlerhaften Bemessung durchgeführt werden.

Zur Kontrolle und Durchführung der festgelegten Maßnahmen wurde der Aufsteller des Entwurfs und der Bemessung festgelegt und ein Termin für die Umsetzung bestimmt.

Für den Fehler *Hauptstütze versagt (stürzt ein)* werden bis auf eine kleine Änderung bei den Fehlerfolgen die gleichen Einträge verwendet. Eine Unterscheidung findet allerdings durch die zugehörigen Bewertungszahlen statt.

2. **Fehler in einem Anschluss:** *Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk ist nicht ausführbar (zu hohe Lasten)* (vgl. Abb. 4.14).

Die **Funktion** des Anschlusses ist es, die Kräfte aus den Vierendeelrahmen in des Fachwerk einzuleiten.

Wenn der Anschluss der Vierendeelrahmen an das Fachwerk nicht ausführbar ist, hat dies, anders als in den anderen Fällen, keine Schäden zur Folge. Die **Fehlerfolge** ist hier eher finanzieller Natur: Die Planung der Verbindung muss verändert und erneut durchgeführt werden. Dies verursacht Verzögerungen und zusätzliche Kosten.

Die **Fehlerursachen** hierfür können zum einen *zu hohe Lasten* sein, die von der Verbindung nicht übertragen werden können. Zum anderen kann es sein, dass *geometrische Besonderheiten nicht berücksichtigt* wurden und dadurch eine Verbindung in der geplanten Form nicht möglich ist.

Als **Vermeidungsmaßnahme** für eine Überlastung des Anschlusses, sollte dieser schon in der Planungsphase entworfen und für die auftretenden Belastungen bemessen werden. So kann frühzeitig bei einer Überbeanspruchung der Anschluss neu ausgelegt und eine Alternative erarbeitet werden. Bei geometrischen Besonderheiten sollte ein Zurückgreifen auf einfachere Geometrien untersucht und wenn notwendig der komplizierte Anschlusspunkt genau geplant werden.

Als **Entdeckungsmaßnahme** kann der Anschluss zu einem festgelegten Zeitpunkt bzgl. der Ausführbarkeit im Team, wenn notwendig unter Einbeziehen von externem Fachpersonal, besprochen werden.

Risikobewertung

Es erfolgte die Risikobewertung nach dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Prinzip. Die Bewertungszahlen wurden ebenfalls in die Formblätter übernommen.

Wichtig ist hierbei, dass nur die größte Bewertungszahl für die Bedeutung der einzelnen Fehlerfolgen zur Berechnung der Risikoprioritätszahlen verwendet wird. Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit wird jeweils unter Einbeziehung der festgelegten Maßnahmen für jede Fehlerursache definiert. So entstehen für jede Fehlerart mehrere RPZ.

Für die beiden Beispiele erfolgt die Bewertung folgendermaßen:

Bei dem Fehler *Hauptstütze gibt nach (Verformungen)* wird die Bedeutung der Absenkung für die Decken mit „2“ bewertet, da eine Umlagerung der Lasten auf benachbarte Bauteile möglich und von keiner starken Nachgiebigkeit der Hauptstütze auszugehen ist. Die Bedeutung für das Fachwerk ist minimal, da es statisch bestimmt gelagert ist. Die reduzierte Steifigkeit des Fachwerks als Gesamttragelement hat die

Fehlernummer: 01

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Hauptstütze S3.1 (S2.1, S1.1)						
Funktion		Aufnahme der Lasten aus Decken und Fachwerk und Weiterleitung in die Fundamente						
Bewertung der Fehler:								
		- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)						
		- Bedeutung der Fehlerfolge (B)						
		- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)						
Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Auflagerabsenkung für Fachwerk	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-rahmen)	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Abbildung 4.13: Formblatt für Fehler *Hauptstütze gibt nach (Verformungen)*

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk					Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
			Anschluss für auftretende Lasten bemessen bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten				
Planung der Verbindung muss erneut durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	Anschluss VR-FW nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	zu hohe Lasten	einfache Geometrien verwenden	2	Anschluss in kleinem Maßstab herauszeichnen	3	24
			notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen				
		geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt					20.7.2009

Abbildung 4.14: Formblatt für Fehler Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk ist nicht ausführbar (zu hohe Lasten)

größte Auswirkung auf die Abhängung und wird mit „3“ bewertet. Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten werden jeweils mit „2“ bewertet.

Die Bedeutung der Fehlerfolge: „erneute Planung der Verbindung; Verzögerung und zusätzliche Kosten“ für den Fehler *Anschluss der Vierendelrahmen an das Fachwerk nicht ausführbar (zu hohe Lasten)* wird mit „4“ bewertet, da bei einem Auftreten dieses Fehlers bei der Ausführung enorme Kosten und Verzögerungen entstehen. Da die Planung eines so aufwendigen und wichtigen Anschlusses sehr kompliziert ist, erfolgt die Bewertung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit im mittleren Bereich.

4.2.3 Ergebnisse

Die in der Sitzung handschriftlich notierten Ergebnisse wurden sauber in Formblätter notiert und ggf. sinnvoll ergänzt. Sie sind vollständig im Anhang dieser Arbeit enthalten (vgl. Abschnitt A.3).

4.3 Erkenntnisse

Das Ziel der Sitzung war es, wichtige Erkenntnisse über eine sinnvolle Vorbereitung, die Durchführbarkeit und die Brauchbarkeit und Qualität der Ergebnisse zu gewinnen. Dies ist gelungen; es konnten sowohl Aspekte gefunden werden, die gut funktioniert haben, als auch Punkte erkannt werden, die überarbeitet werden müssen.

4.3.1 Was gut funktioniert hat

- **Die Sitzungsmappe:** Die Teilnehmer waren bei der Sitzung bereits gut mit dem Projekt vertraut und hatten sich z.Tl. schon einige Gedanken gemacht.
- **Die Analyse:** Während der Sitzung entwickelte sich eine lebhafte Diskussion, an der sich alle Teilnehmer beteiligten. Dadurch konnten viele kritische Stellen definiert und mögliche Fehler erkannt werden.
- **Statisches Konzept:** Eine mögliche Schwierigkeit in der Lagerung des Fachwerks konnte gleich erkannt und eine rechnerische Untersuchung beschlossen werden.

4.3.2 Was überarbeitet werden muss

- **Diskussion:** Manchmal war die Diskussion an einem Punkt festgefahren und wich etwas vom eigentlichen Thema ab. Dadurch ging Zeit für wichtige Punkte verloren.
- **Definition:** Die Definition der Fehlerfolgen war oft zu unpräzise. Als Folge wurde häufig genannt: „Gebäude stürzt ein“, gefolgt von der Bewertungszahl „5“.
- **Fehlerursachen und Bewertung:** Die Fehlerursachen wurden nur unzureichend betrachtet. Dadurch viel auch die Bewertung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit häufig weg.

Um die Sitzung und damit die FMEA so effizient wie möglich zu gestalten, sind einige wesentliche Dinge zu beachten:

- **Führung:** Es ist eine präzise Führung der Sitzung erforderlich. Wenn die Diskussion sich an einem Punkt festfährt, muss eingegriffen und auf die wesentlichen Punkte weitergeführt werden.
- **Zeiteinteilung:** Eine genaue Zeiteinteilung ist wichtig. Jedem Punkt, auch der Analyse der Fehlerfolgen und -ursachen sowie der Bewertung muss ausreichend viel Zeit eingeräumt werden. Ein fundiertes Hintergrundwissen des Moderators bzgl. der FMEA-Methode ist notwendig um bei unklaren Punkten Hilfestellung zu geben.
- **Lastabtrag:** Zum Zeitpunkt der Sitzung war die Darstellung des globalen Lastabtrages noch nicht vorhanden. Dies sollte unbedingt der Fall sein, da hierdurch die Propagierung der Fehler veranschaulicht werden kann. Auf diese Weise lassen sich präzisere Definitionen der Fehlerfolgen und -ursachen treffen.

4.4 Fehlerkategorien

Aufbauend auf die Ergebnisse aus der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung lassen sich die verschiedenen Fehlerarten in insgesamt fünf Fehlerkategorien einteilen:

1. Konzeptionelle Fehler

- Versteckte Kinematiken in Tragkonzept
- Unzureichende Aussteifung des Gebäudes
- Der Lastfluss stellt sich in der Realität anders ein, als im Konzept geplant wurde

- Mangelnde Robustheit, d.h. unzureichende Reserven bei kleineren Bauteilversagen und Sensitivität gegenüber unplanmäßigen Störungen wie nicht eingeplante Anpralllasten oder Explosionen

2. Fehler in Ermittlung der Einwirkungen

- Falsch ermittelte Lasten
- Nichtberücksichtigung einer maßgebenden Einwirkung
- Nichtberücksichtigung der maßgebenden Lastfallkombination

3. Fehler in Modellierung

- Bei der Eingabe des Modells erfolgt ein Fehler
- Das Modell entspricht nicht der Realität (z.B. Momentengelenk statt Rotationsfeder etc.)

4. Fehler in Berechnung und Bemessung

- Die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt
- Es ist ein Fehler in der Bemessung vorhanden

5. Fehler in Details

- Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt
- Details sind nicht ausführbar

Diese erarbeiteten Fehlerkategorien können als Grundlage für die Erstellung eines Fehlerkataloges dienen (vgl. Kapitel 6).

5 Zusammenfassung

In dieser Projektarbeit wurde die Anwendbarkeit der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse auf das Bauwesen untersucht.

Hintergrund

Das Ziel einer FMEA ist es, mögliche Fehler eines Produktes sehr früh zu erkennen um diese entweder bereits im Vorfeld zu vermeiden oder aber geeignete Maßnahmen festzulegen, um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten. Da ein Großteil der Fehler bereits in der Planungsphase entsteht und zu diesem Zeitpunkt die Behebung noch vergleichsweise schnell und kostengünstig realisiert werden kann, ist eine Anwendung der FMEA bereits in einem frühen Stadium von entscheidender Bedeutung.

Mit der Einführung der FMEA im Bauwesen soll die Qualität von Bauprojekten sichergestellt werden. Sie ergänzt das Sicherheitskonzept in den Normen dahingehend, dass sie mögliche Fehler im Tragkonzept, in der Berechnung, in der Anwendung von Programmen aber auch in der Anwendung der Normen und Richtlinien aufgreift und versucht, diese im Vorfeld zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen zu minimieren.

Die Anwendung der FMEA ist in verschiedenen Projektphasen sinnvoll. Diese Projektarbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Tragwerk-FMEA für den Entwurf und die Bemessung.

Tragwerk-FMEA

Die Tragwerk-FMEA bettet sich in den üblichen Ablauf des Erstellens von statischen Berechnungen ein. Der Aufsteller des Entwurfs entwickelt ein statisches Konzept und führt eine Vorbemessung durch. Dabei erstellt er eine Darstellung aller Bauteile und Anschlüsse, an der der globale Lastabtrag mit Hilfe von Pfeilen sichtbar wird.

Anschließend erfolgt eine **Fehleranalyse- und Optimierungssitzung**, in der der Aufsteller des Entwurfs das Projekt, sein statisches Konzept und die Vorbemessung vorstellt. An der Sitzung nehmen der Aufsteller der statischen Berechnungen, der Verantwortliche des Projekts, der Konstrukteur, der Prüfeningenieur sowie andere am Projekt beteiligte Mitarbeiter teil.

Nachdem alle Sitzungsteilnehmer mit dem aktuellen Stand vertraut gemacht wurden, erfolgt eine **Funktionsanalyse**, bei der allen (bzw. den wesentlichen) Bauteilen und Anschlüssen die jeweiligen Funktionen zugeordnet werden.

In der **Fehleranalyse** werden die Bauteile und Anschlüsse bzw. deren Funktionen auf mögliche Fehler sowie deren Ursachen und Folgen hin analysiert. Diese werden in den Formblättern dokumentiert.

Anschließend erfolgt eine **Risikobewertung**, bei der die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache mit Bewertungszahlen zwischen 1 und 5 bewertet werden. Das Gesamtrisiko eines jeden Fehlers entspricht der Risikoprioritätszahl (RPZ), die sich aus der Multiplikation der Bewertungszahlen ergibt.

Bei Überschreitung einer festgelegten Grenze der RPZ müssen **Optimierungsmaßnahmen** durchgeführt werden. Dies können Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache oder zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache sein. Anschließend erfolgt eine Reduzierung der Bewertungszahlen entsprechend der gewählten Maßnahmen. Wenn die RPZ dennoch zu groß ist, muss die kritische Stelle verändert und in anderer Art und Weise ausgeführt werden.

Die **Ergebnisse der Sitzung** werden sorgfältig dokumentiert und Verantwortliche für die Umsetzung der Maßnahmen bestimmt.

Durchführung und Ergebnisse

Um die Anwendbarkeit der FMEA auf das Bauwesen zu prüfen und wichtige Erkenntnisse für eine sinnvolle Vorbereitung und die Brauchbarkeit der Ergebnisse zu gewinnen, wurde eine Tragwerk-FMEA an dem Anwendungsbeispiel „Bürohaus X“ (s. Kapitel 4.1) durchgeführt.

Es erfolgte eine Analyse der Tragstruktur und die Darstellung des globalen Lastabtrags als strukturierter Graph (vgl. Abschnitt A.4 des Anhangs). Der Darstellung liegt die Vorstellung zugrunde, dass das Gebäude über die volle Höhe geschnitten und *aufgeklappt* wird. Pfeile zwischen den einzelnen Bauteilen kennzeichnen den globalen Lastabtrag. Diese Darstellung dient der Propagierung der Fehler, d.h. es kann erkannt werden, welche Bauteile direkt von einem bestimmten Fehler betroffen sind und auf welche sich dieser im Weiteren auswirkt.

Es wurde eine Fehleranalyse- und Optimierungssitzung durchgeführt, bei der sich ein bereichsübergreifend zusammengesetztes Team Gedanken über kritische Stellen des Systems, die Funktionen der einzelnen Bauteile und Anschlüsse sowie mögliche Fehler, die auftreten können, machte.

Zur Vorbereitung auf die Sitzung wurde den Teilnehmern eine Sitzungsmappe ausgehändigt, mit der sie sich mit den Grundlagen einer FMEA, dem Ziel der Sitzung und dem Anwendungsbeispiel vertraut machen konnten.

Da sich die Tragwerk-FMEA ausschließlich mit dem Entwurf und der Bemessung beschäftigt, wurden nur Fehler, die im Tragkonzept begründet sind oder die bei der Erstellung der statischen Berechnung auftreten können, berücksichtigt.

Als kritische eingestuft wurden folgende Bauteile und Anschlüsse:

- die Bauteile und Anschlüsse des Fachwerks,
- die Bauteile und Verbindungen der Vierendeelrahmen,
- der Anschluss der Vierendeelrahmen an das Fachwerk (Abhängung),
- die Zugverankerung des Fachwerks an die äußeren Wände bzw. die äußere Wand,
- sowie die Hauptstütze.

Um neben einem vollständigen Versagen auch zu geringe Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten berücksichtigen zu können, erfolgte für Bauteile eine Unterteilung der Fehlerarten in *gibt nach (Verformungen)* und *versagt komplett*. Für die Anschlüsse wurde zusätzlich noch die Fehlerart *nicht ausführbar (zu hohe Lasten)* hinzugefügt.

Anschließend wurden den Fehlerarten entsprechende Ursachen und Folgen zugeordnet. Es erfolgte eine Bewertung nach der beschriebenen Systematik.

Aus den gemachten Erfahrungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen und Erkenntnisse ableiten:

- Die Tragwerk-FMEA lässt sich gut im Bauwesen anwenden. Es sind allerdings einige wesentliche Dinge zu beachten (s. nachfolgende Stichpunkte).
- Eine gute Vorbereitung auf die Sitzung ist sehr wichtig. Den Sitzungsteilnehmern sollten schon im Vorfeld Informationen zu dem Projekt ausgehändigt werden, damit sie sich auf die Sitzung vorbereiten können.
- Die Darstellung des globalen Lastabtrags sollte bei der Sitzung unbedingt vorliegen, da hierdurch die Propagierung der Fehler veranschaulicht werden kann. Auf diese Weise lassen sich präzisere Definitionen der Fehlerfolgen und -ursachen treffen.
- Ein Einbringen aller Sitzungsteilnehmer ist von großer Bedeutung. Nur so kann auf die Erfahrungen und das Wissen aller Bereiche zurückgegriffen und ein Übersehen möglicher Fehler vermieden werden.
- Es ist eine präzise Führung der Sitzung erforderlich. Wenn die Diskussion sich an einem Punkt festfährt, muss eingegriffen und auf die wesentlichen Punkte weitergeführt werden.

- Eine genaue Zeiteinteilung ist wichtig. Jedem Punkt, auch der Analyse der Fehlerfolgen und -ursachen sowie der Bewertung muss ausreichend viel Zeit eingeräumt werden. Ein fundiertes Hintergrundwissen des Moderators bzgl. der Methodik der FMEA ist notwendig um bei unklaren Punkten Hilfestellung zu geben.

Aufbauend auf die Ergebnisse aus der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung wurden insgesamt fünf Fehlerkategorien erarbeitet, in die sich die verschiedenen Fehlerarten einteilen lassen. Dies sind:

1. Konzeptionelle Fehler
2. Fehler in Ermittlung der Einwirkungen
3. Fehler in Modellierung
4. Fehler in Berechnung und Bemessung
5. Fehler in Details

6 Ausblick

Die Projektarbeit bildet einen ersten Schritt für die Einführung der FMEA im Bauwesen. Es wurden Hintergründe der Entstehung und derzeitige Anwendungsbereiche vorgestellt. Erste Anpassungen auf die Besonderheiten des Bauwesens sind erfolgt.

Auf dieser Grundlage kann bereits jetzt eine Tragwerk-FMEA durchgeführt und viele Vorteile, die diese mit sich bringt, genutzt werden. Um die Effizienz jedoch langfristig zu steigern, sind im Rahmen des Forschungsvorhabens bereits weitere, wichtige Schritte in Planung und Bearbeitung.

Bei komplexen Systemen ist die Beschreibung der Gebäudebestandteile und insbesondere die Darstellung des globalen Lastabtrages noch recht aufwendig und kompliziert. Auch das sinnvolle Definieren möglicher Fehler sowie deren Ursachen und Folgen bringt noch einige Unsicherheiten und Unklarheiten mit sich. Sehr hilfreiche Bausteine, um diese Schritte zu vereinfachen und zu vereinheitlichen, sind derzeit in Planung:

- **Bauteilbibliothek:** Alle typischen, im üblichen Hochbau verwendeten Bauteile werden mit Ihren Eigenschaften und Funktionen in einer Bibliothek zusammengefasst. Wenn ein Tragkonzept besteht, kann der FMEA-Anwender die verwendeten Bauteile aus dieser Bibliothek entnehmen und hat somit alle notwendigen Informationen für die weiteren Schritte. Die Beschreibung der Funktionen kann an dieser Stelle noch präziser stattfinden als das in dieser Arbeit getan wurde, so dass im nächsten Schritt für jede Funktion genau eine Fehlerart, nämlich die Nichterfüllung der Funktion, festgelegt werden kann.
- **Fehlerkatalog:** Zur Zeit bereitet die Definition der Fehlerarten noch einige Schwierigkeiten. In dem Fehlerkatalog werden für jedes Bauteil, aufbauend auf den definierten Funktionen, die möglichen Fehlerarten aufgeführt. Aus diesen kann der FMEA-Anwender die für das Bauprojekt relevanten Fehler herausgreifen. Eine stetige Weiterentwicklung des Kataloges ist dabei besonders wichtig.
- **Maßnahmenkatalog:** Ähnlich wie bei den Fehlerkatalogen, werden in dem Maßnahmenkatalog alle möglichen Maßnahmen aufgeführt, aus denen der Anwender die für ihn relevanten auswählt.
- **Softwareentwicklung:** Um aus der Tragwerkstruktur einen globalen Lastabtrag zu entwickeln und diesen anschaulich darzustellen, sind zur Zeit noch viele

Überlegungen und ein recht großer Zeitaufwand erforderlich. Um diesen Aufwand gerade für komplexe Bauwerke gering zu halten, ist die Entwicklung einer Software in Planung. Diese soll aus vorhandenen 3D-Modellen das Zusammenwirken der Bauteile sowie deren Schnittstellen herauslesen. Hierfür sind ggf. vordefinierte Layer zu verwenden. Auch die anschauliche Darstellung soll auf diese Weise automatisiert werden. An dieser Stelle werden auch weitere in der Entwicklung stehende Werkzeuge eingebunden.

- **Hilfsmittel:** Am Ende des Forschungsvorhaben sollen open-source-Programme zur Verfügung stehen, die den interessierten FMEA-Anwendern einen schnellen Einstieg und eine effiziente Nutzung dieses Systems ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [DIN06] *DIN EN 60812:2006; Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. 2006.
- [Dre09] DRESSEL, B.: *Die Rolle des Prüfenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr*. Stahlbau 78, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag:214–220, 2009.
- [Lie09] LIENING, D.: *Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten FMEA. Diplomarbeit*. Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachgebiet Baumechanik und Baustatik, 2009.
- [Tak09] TAKUNOV, B.: *Sensitivitätsanalyse an dem FE-Modell eines Bürogebäudes. Diplomarbeit*. Universität Kassel, Fachgebiet Baustatik, 2009.
- [Var04] VARWIG, J.: *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ), Frankfurt; Beuth Verlag GmbH, 2004.

Verwendete Software

MikTeX Version 2.7 *2007*

TeXnicCenter 1.0 Stable Release Candidate 1 *2008*

JabRef 1.8.1 *2005*

Microsoft Excel 2007 *2007*

Adobe Acrobat 9 Pro Extended Version 9.1.2 *2009*

Autodesk: AutoCAD 2005 *2005*

A Anhang

A.1 Bürohaus X

Position	Pos.-Nr.	Teil von	Anmerkung
Decken	D1.1		
	D2.1		
	D3.1		
	D4.1		Dachdecke
Gründung	F0.1		Streifenfundament
	F0.2		Einzelfundament
	F0.3		Bodenplatte
Stützen	S1.2		
	S2.2	Vierendeelrahmen V1	
	S2.3	Vierendeelrahmen V1	
	S2.4	Vierendeelrahmen V1	
	S2.5	Vierendeelrahmen V1 + V2	
	S2.7	Vierendeelrahmen V2	
	S3.1		(S2.1, S1.1)
	S3.2	Vierendeelrahmen V1	
	S3.3	Vierendeelrahmen V1	
	S3.4	Vierendeelrahmen V1	
	S3.5	Vierendeelrahmen V1 + V2	
	S3.6		(S2.6)
	S3.7	Vierendeelrahmen V2	
	S4.1	Fachwerk	
	S4.2	Fachwerk	
	S4.3	Fachwerk	
	S4.4	Fachwerk	
S4.5	Fachwerk		
S4.6			
S4.8			
S4.9			
Unterzüge	U1.1	Vierendeelrahmen V1	
	U1.3	Vierendeelrahmen V2	
	U2.1	Vierendeelrahmen V1	
	U2.3	Vierendeelrahmen V2	
	U3.1	Vierendeelrahmen V1	
	U3.2	Fachwerk	
	U3.3	Vierendeelrahmen V2	
	U4.2	Fachwerk	
	U4.3		

Abbildung A.1: Positionsliste 1/2

Position	Pos.-Nr.	Teil von	Anmerkung
Wände	W1.4	Vierendeelrahmen V2	(W2.1, W1.1) (W2.2, W1.2) (W2.3, W1.3) (W2.5)
	W1.5		
	W1.6		
	W2.6		
	W3.1		
	W3.2	Vierendeelrahmen V2	(W3.4, W2.4)
	W3.3		
	W3.5		
	W3.6		
	W3.7		
	W4.3		
W4.4			
Diagonalen	X4.1	Fachwerk	
	X4.2	Fachwerk	
	X4.3	Fachwerk	
	X4.4	Fachwerk	
Anschlüsse	A01	Fachwerk	Untersatz - Stütze
	A02	Fachwerk	Untersatz - Diagonale
	A03		Fachwerk (UZ) - Wand (Zug)
	A04		Fachwerk (UZ) - Hauptstütze
	A05	Vierendeelrahmen	Untersatz - Stütze / Wand
	A06		Abhängung V1/V2 - FW1
	A07		Decke - Stütze
	A08		Decke - Wand
	A09		Untersatz - Wand
	A10		Untersatz - Stütze
	A11		Stütze - Streifenfundament
	A12		Wand - Streifenfundament
	A13		Hauptstütze - Einzelfundament
	A14		Wand - Bodenplatte

Abbildung A.2: Positionsliste 2/2

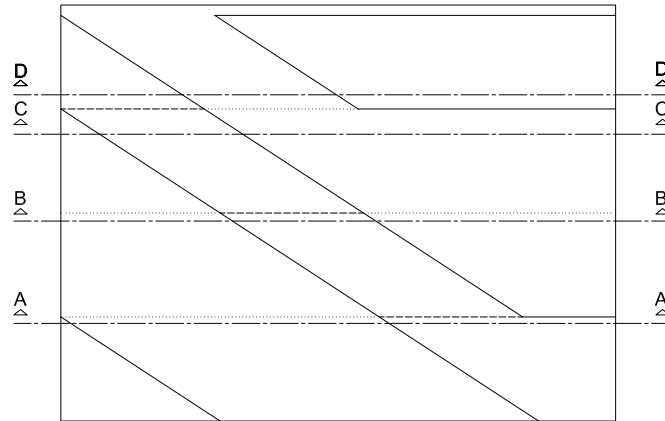


Abbildung A.3: Bürohaus X: Schnittführung [Lie09]

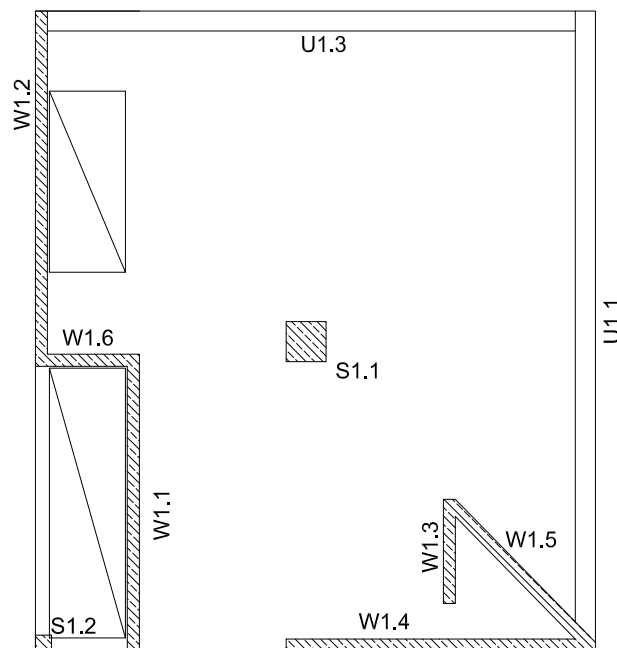


Abbildung A.4: Bürohaus X: Grundriss Erdgeschoss [Lie09]

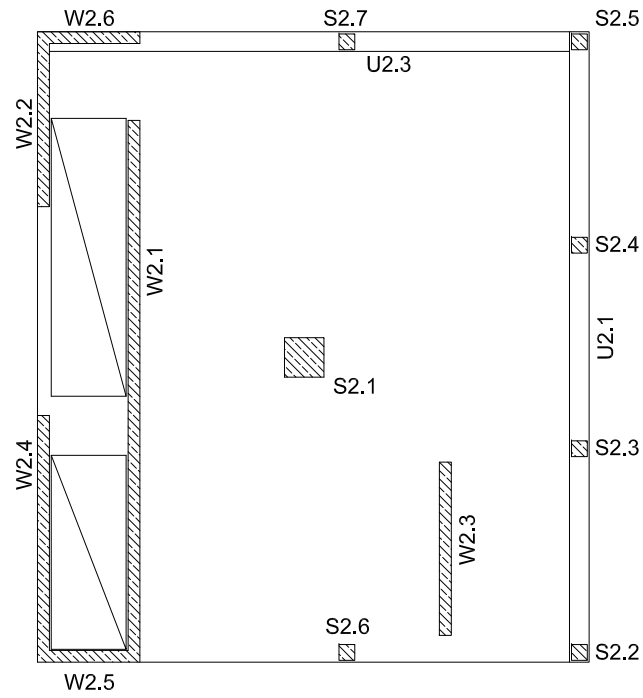


Abbildung A.5: Bürohaus X: Grundriss 1. Obergeschoss [Lie09]

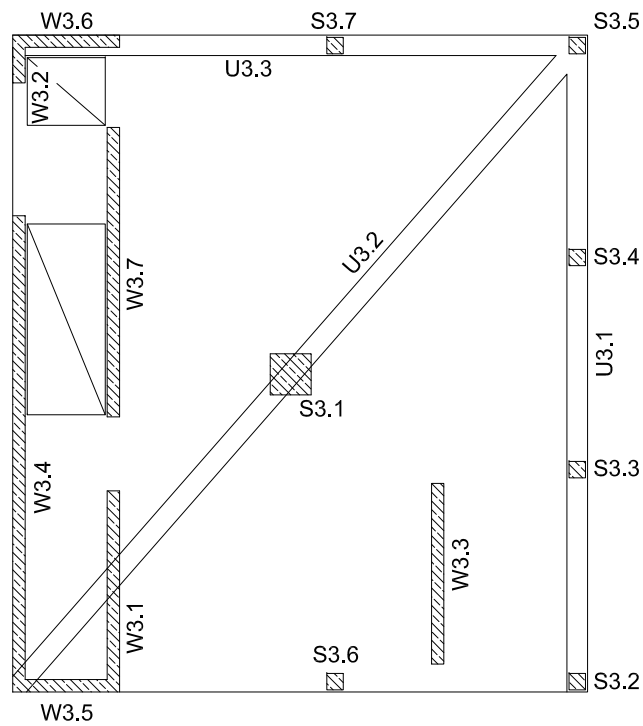


Abbildung A.6: Bürohaus X: Grundriss 2. Obergeschoss [Lie09]

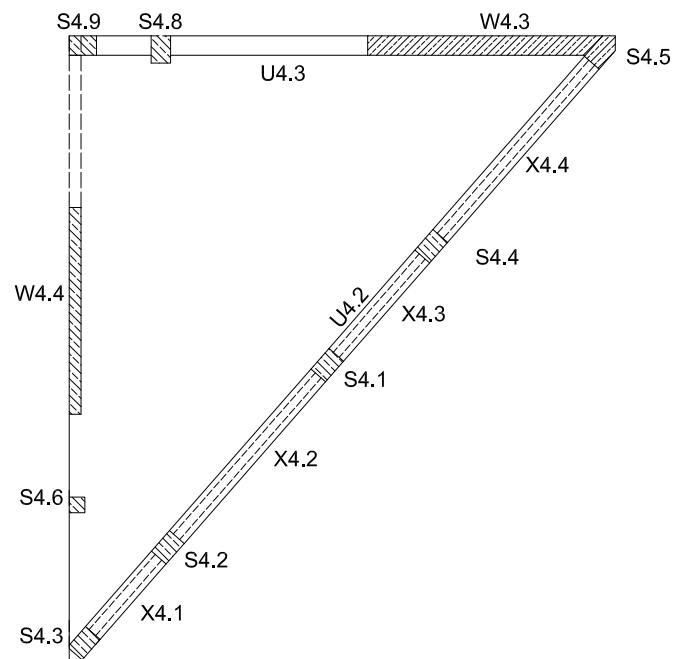


Abbildung A.7: Bürohaus X: Grundriss Dachgeschoss [Lie09]

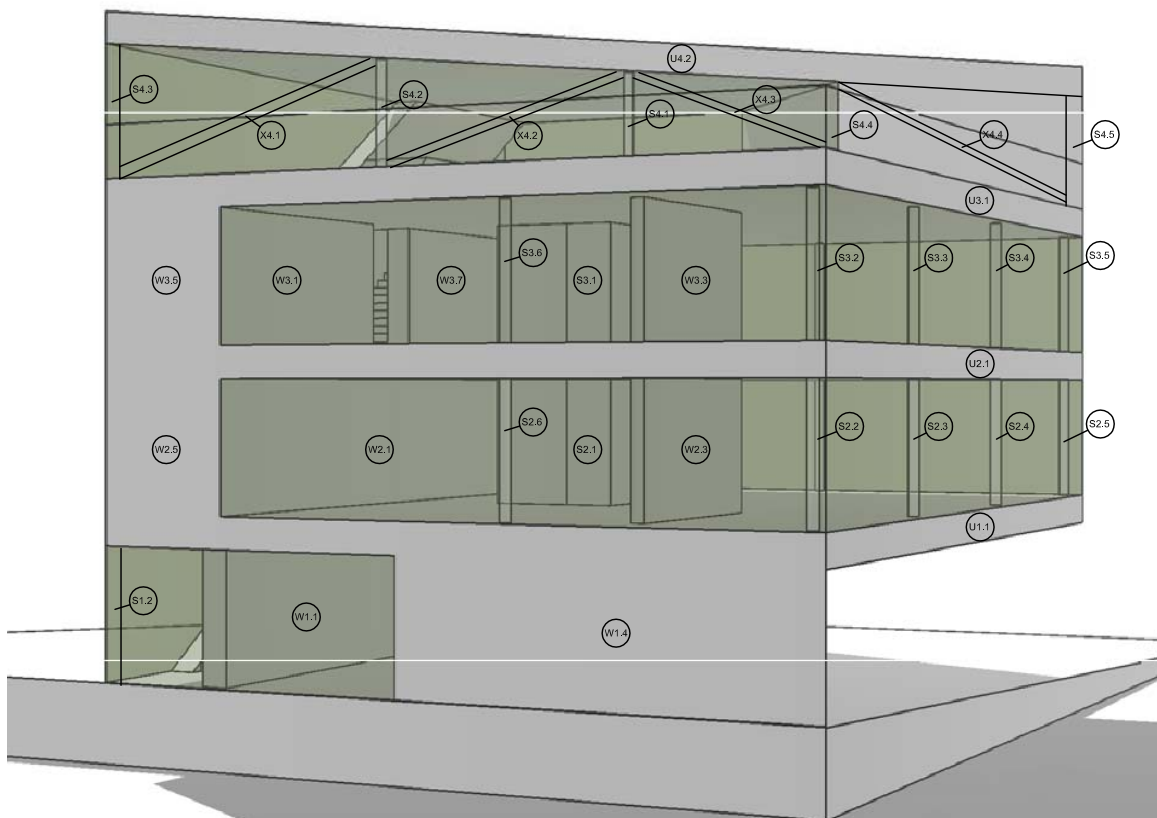


Abbildung A.8: Bürohaus X: Ansicht 1

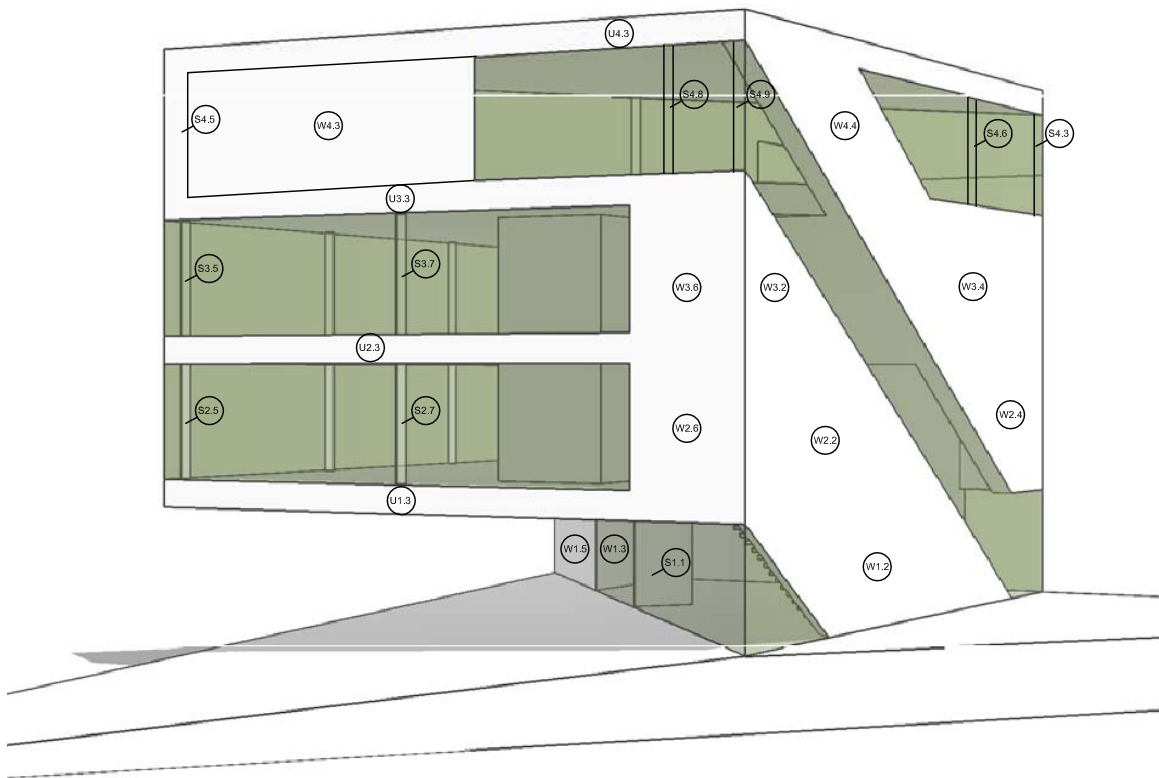


Abbildung A.9: Bürohaus X: Ansicht 2

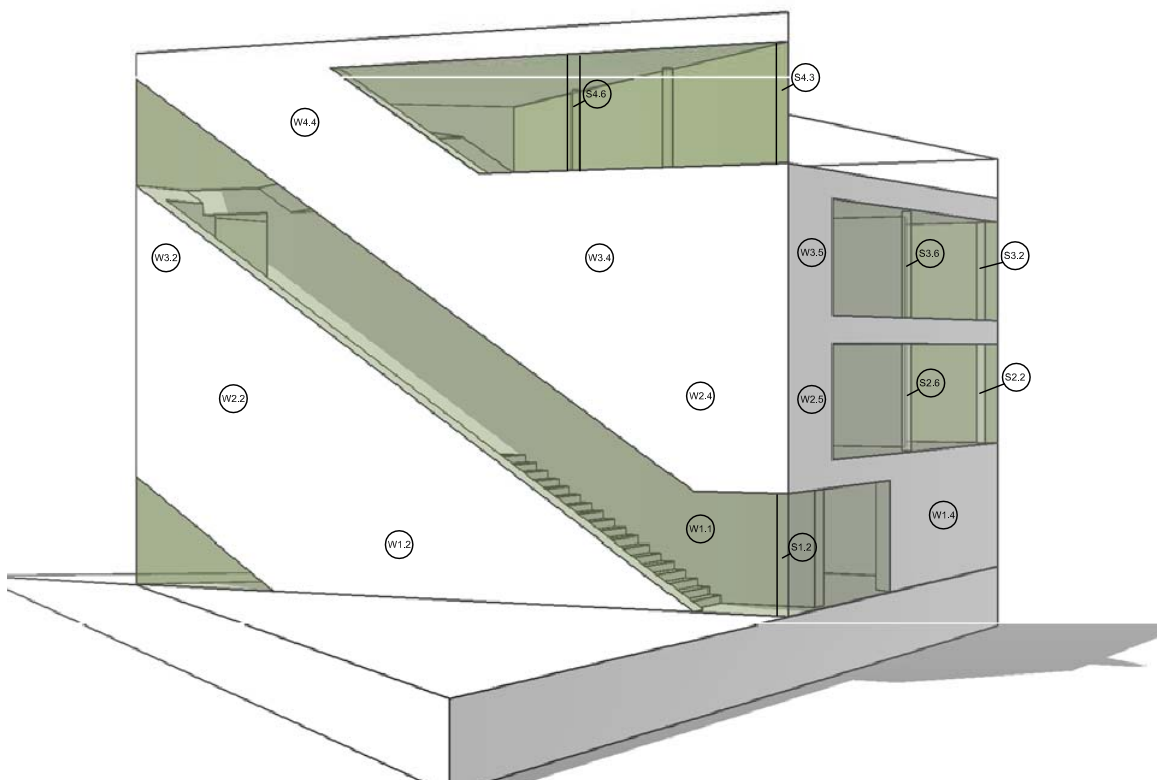


Abbildung A.10: Bürohaus X: Ansicht 3

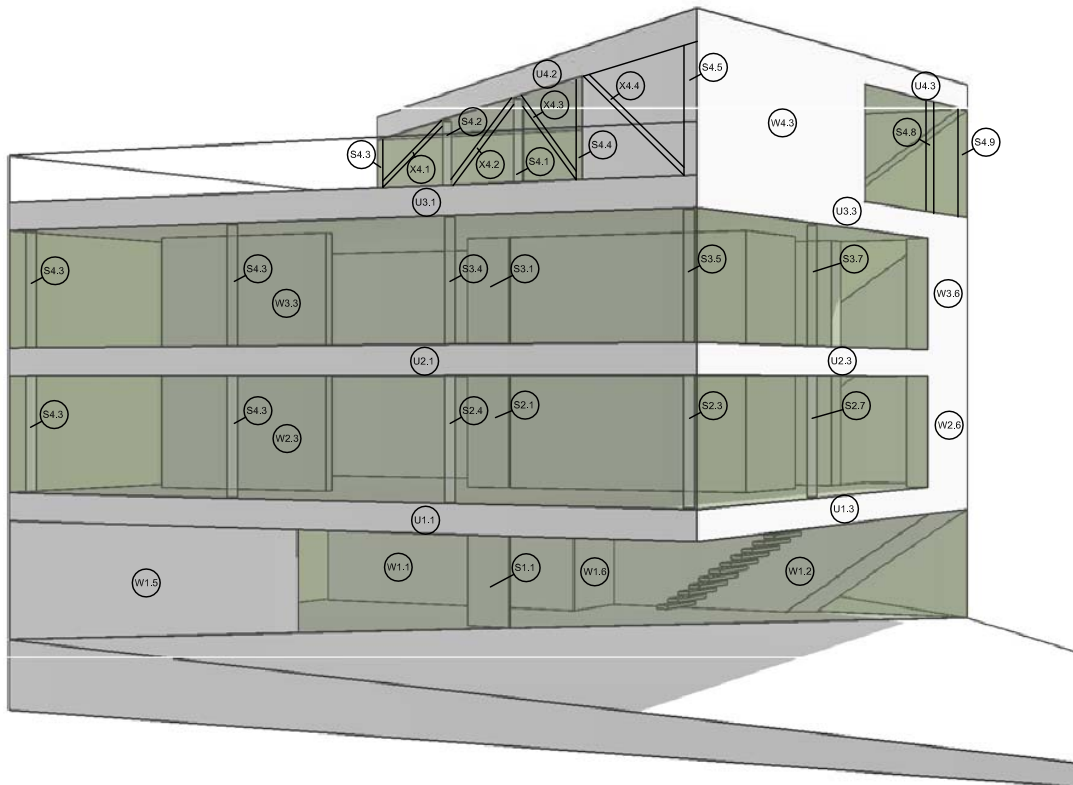


Abbildung A.11: Bürohaus X: Ansicht 4

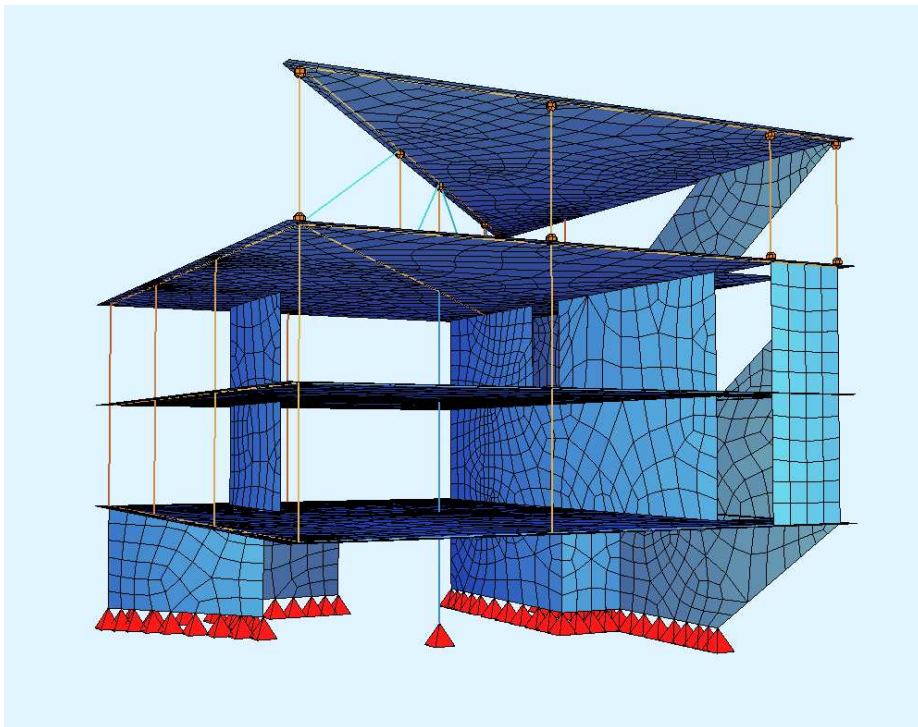


Abbildung A.12: FE-Modell: Ansicht 1 [Tak09]

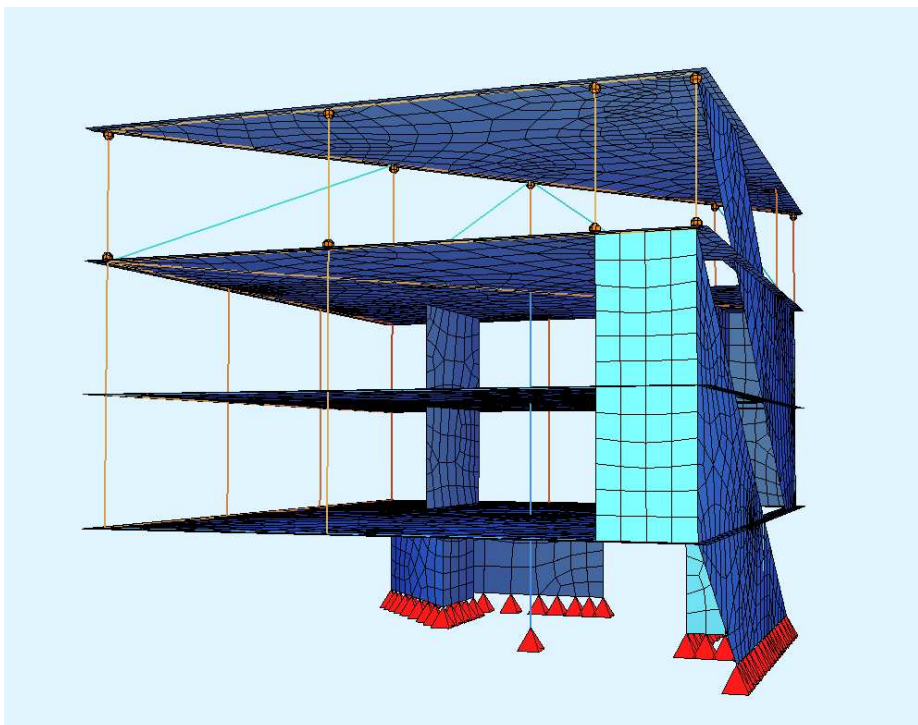


Abbildung A.13: FE-Modell: Ansicht 2 [Tak09]

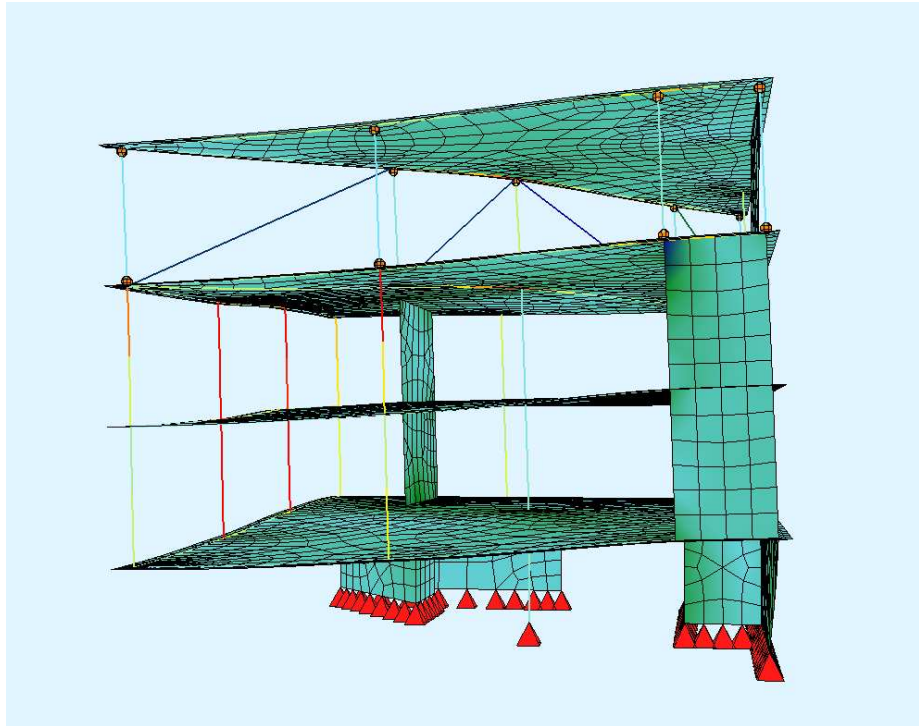


Abbildung A.14: FE-Modell: Ansicht 3 [Tak09]

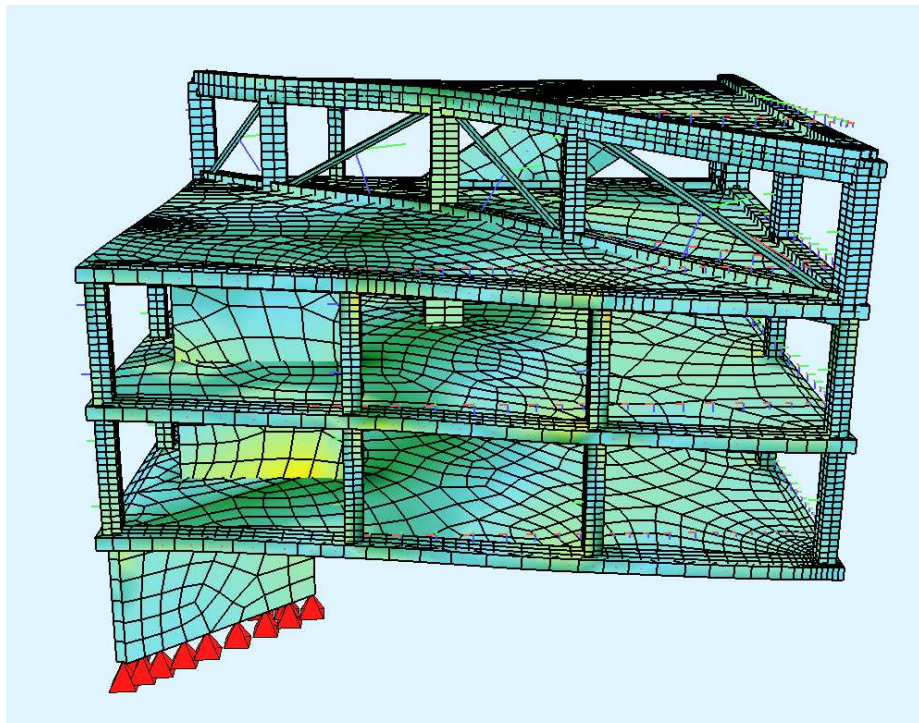


Abbildung A.15: FE-Modell: Ansicht 4 [Tak09]

A.2 Sitzungsmappe

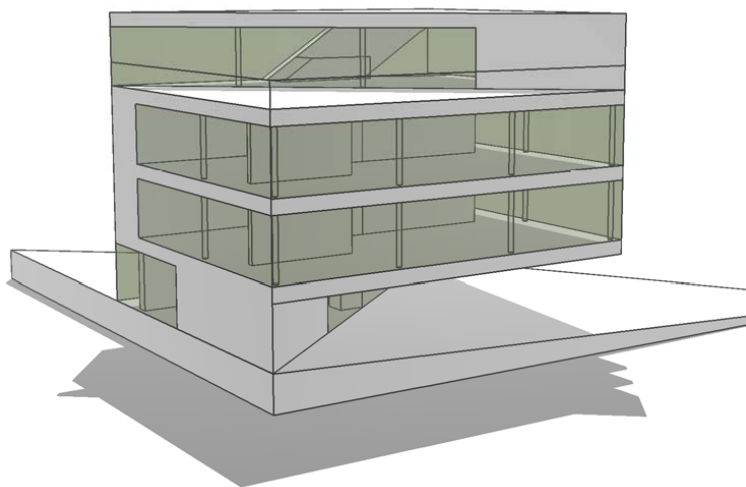
Einladung zu einer

Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

im Rahmen des **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse – Projekts**
(FMEA-Projekt)

am **18.06.2009** um **13:00 Uhr** in unserem Besprechungsraum.

Grundlage der Sitzung ist die Planung des Projekts „Bürohaus X“.



Inhalt

1. Informationen zur FMEA	3
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) – was ist das?.....	3
Wofür wurde sie entwickelt und in welchen Bereichen findet sie heute Anwendung?.....	3
FMEA im Bauwesen: wo und wie wendet man sie an?.....	3
Welches Ziel wird damit verfolgt?.....	3
Wer ist an diesem Projekt beteiligt und von wem wird es gefördert?	3
Was erwarten wir uns von einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung?	4
Wer ist an dieser Sitzung beteiligt?.....	4
2. Vorstellung des Projekts „Bürohaus X“	5
Beschreibung.....	5
Statisches Konzept und globaler Lastabtrag	5
Anhang	6
Ansichten.....	6
Grundrisse und Schnitt.....	8
Funktionsmodell.....	10
Lastabtrag Rahmen und Fachwerk.....	12

1. Informationen zur FMEA

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) – was ist das?

Das Ziel einer FMEA ist es, potentielle Fehler frühzeitig zu erkennen, um diese schon im Vorfeld auszuschließen bzw. deren Folgen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Sie ist grundsätzlich als allgemeingültiges Konzept konstruiert, die eine Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen ermöglicht.

Wofür wurde sie entwickelt und in welchen Bereichen findet sie heute Anwendung?

Entwickelt wurde die FMEA Anfang der 60er Jahre von der NASA, um eine Qualitätssicherung für die Apollo-Missionen zu gewährleisten. Nach dem Einsatz in der Luft- und Raumfahrtindustrie wurde sie 1977 erstmals auch in der Automobilindustrie, bei der Ford Motor Company, eingesetzt. Eine Norm existiert in Deutschland seit 1980. Insbesondere durch die Automobilindustrie findet eine stetige Weiterentwicklung statt. Mittlerweile wird sie vermehrt auch in der Dienstleistung und im Projektmanagement angewendet.

FMEA im Bauwesen: wo und wie wendet man sie an?

Neben einigen anderen Bereichen die später folgen, soll im ersten Schritt eine System-FMEA für den Entwurf und die Bemessung (Planungsphase) entwickelt werden. Sie wird nach dem Erstellen des statischen Konzepts angewendet (nach den HOAI-Leistungsphasen 2 und 3, vor LP 4). Der Schwerpunkt liegt auf der Sicherstellung der Standsicherheit.

Welches Ziel wird damit verfolgt?

Mit der Einführung der FMEA im Bauwesen soll die Qualität bei Bauprojekten sichergestellt werden. Viele erfahrene Ingenieure haben im Laufe ihres Arbeitslebens ein intuitives Verständnis für Tragwerke und wesentliche, kritische Stellen entwickelt, das sich oftmals nur schwer erklären und in Worte fassen lässt. Die FMEA bietet eine Plattform, auf der auch insbesondere diese Erfahrungen genutzt werden können.

Konkret sollen mögliche Fehler in der Planung bereits vor Baubeginn erkannt und behoben werden. Auch für evtl. erst später erkannte bzw. erkennbare Fehler sollen mögliche Maßnahmen entwickelt werden um deren Auswirkungen zu minimieren.

Wer ist an diesem Projekt beteiligt und von wem wird es gefördert?

Beteiligt an dem Forschungsprojekt „Tragwerk-FMEA zur präventiven Fehlervermeidung“ sind wir (die Eisfeld Ingenieure), gemeinsam mit den Ingenieurbüros WTM Engineers Hamburg und Werner Sobek Frankfurt für die Praxis sowie die Uni Kassel und die TU München für die Forschung. Das Projekt läuft über 21 Monate mit 65 Mannmonaten und hat im Januar 2009 begonnen, es wird unter anderem vom bvpi (Bundesvereinigung der Prüfeningenieure) gefördert.

Was erwarten wir uns von einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung?

Diese Sitzungen haben sich bereits stark bewährt und bilden den eigentlichen Kern des Systems. Hier wird das Projekt einem bereichsübergreifend zusammengesetzten Team vorgestellt und ausführlich erörtert. Somit kann ein Einbringen aller Erfahrungen und allen Wissens aus den verschiedenen an der Produktentstehung beteiligten Abteilungen/Bereichen sichergestellt werden. Bei einseitig zusammengestellten Teams haben sich in der Praxis z.Tl. erhebliche Mängel gezeigt, da häufig nur aus einer eingeschränkten Sichtweise heraus gedacht und wichtige kritische Punkte übersehen wurden.

In dieser Sitzung soll das Tragkonzept des Gebäudes vorgestellt werden. Im Anschluss daran folgt eine Diskussion aller Beteiligten über mögliche Fehler in der Planung. Diese werden dokumentiert. Es erfolgt die Bewertung aller aufgezeigten möglichen Fehler hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung (Auswirkung) und der Entdeckungswahrscheinlichkeit.

Die Sitzung dauert ca. 2 Stunden.

Wer ist an dieser Sitzung beteiligt?

Uwe Wolf	aus Sicht des Aufstellers
Michael Eisfeld	aus Sicht des Verantwortlichen
Wolfgang Eisfeld	aus Sicht des Prüfers
Yousef Salamah	aus Sicht des Konstrukteurs
Borys Takunov	Berechnung des FE-Modells
Tobias Vogt	Organisation und Vorbereitung der Sitzung

2. Vorstellung des Projekts „Bürohaus X“

Beschreibung

Geschossanzahl: 4

Material: Stahlbeton, Verbundbauweise (Stützen, Unterzüge), Stahlseile (Diagonalen Fachwerk)

Geschosshöhe: 3 m (Gesamthöhe 12 m)

Grundrissform: Erd- und Dachgeschoss dreiecksförmig, 1. und 2. Obergeschoss rechteckig

Besonderheit: Auskragung der oberen Geschosse über Erdgeschoss (ohne Abstützung)

Decken: Dicke = 30 cm, im Bereich der Auskragung Cobiaxdecken

Statisches Konzept und globaler Lastabtrag

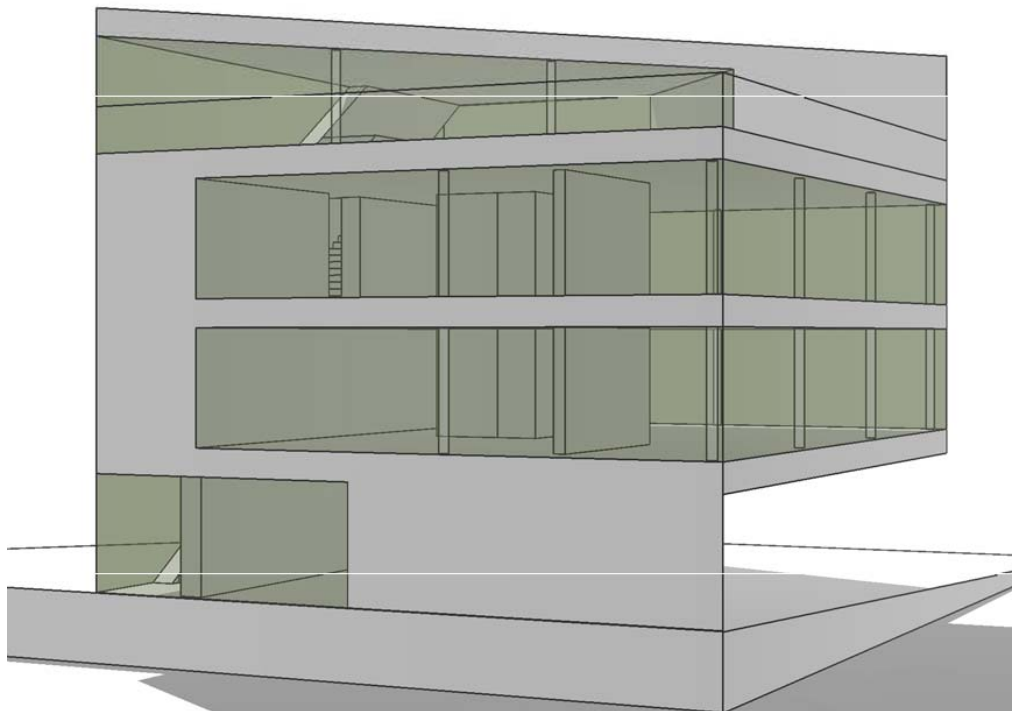
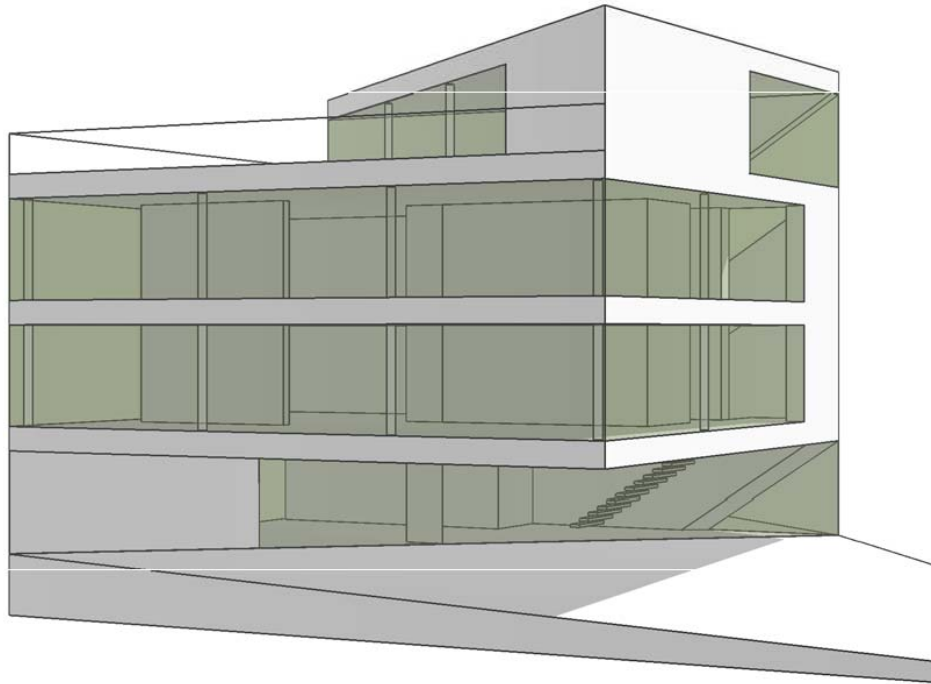
Aussteifung: innere und äußere Wände, vorwiegend im Bereich der Treppe (s. Grundrisse)

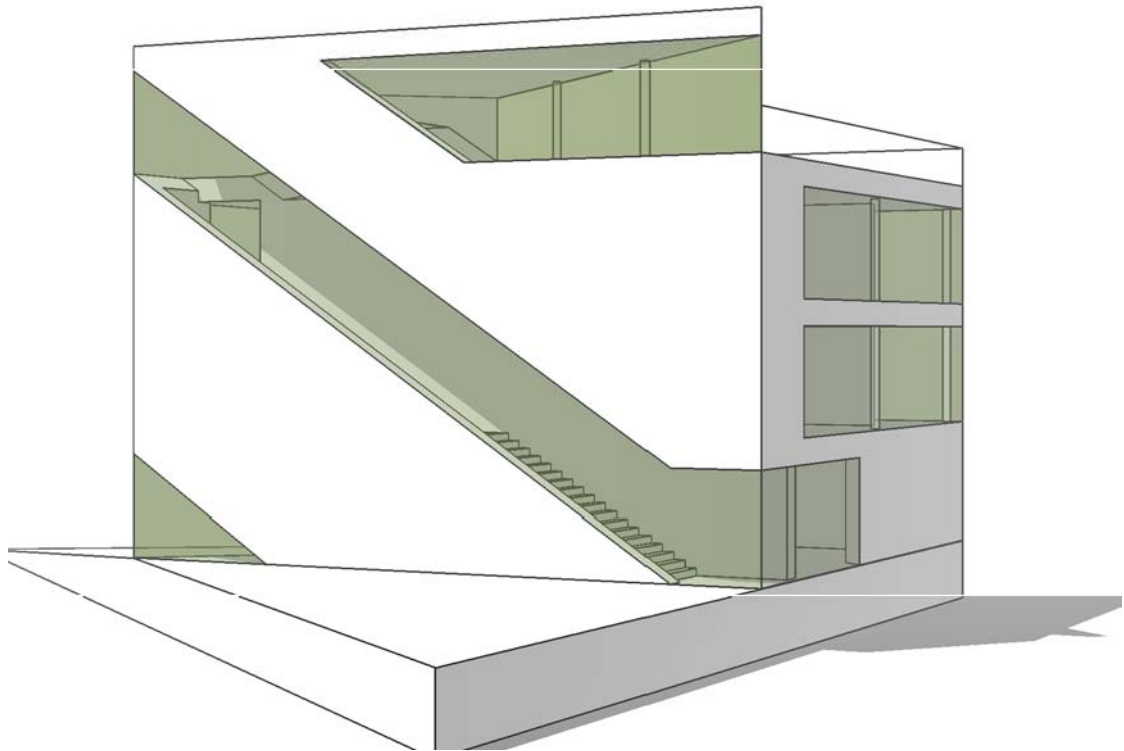
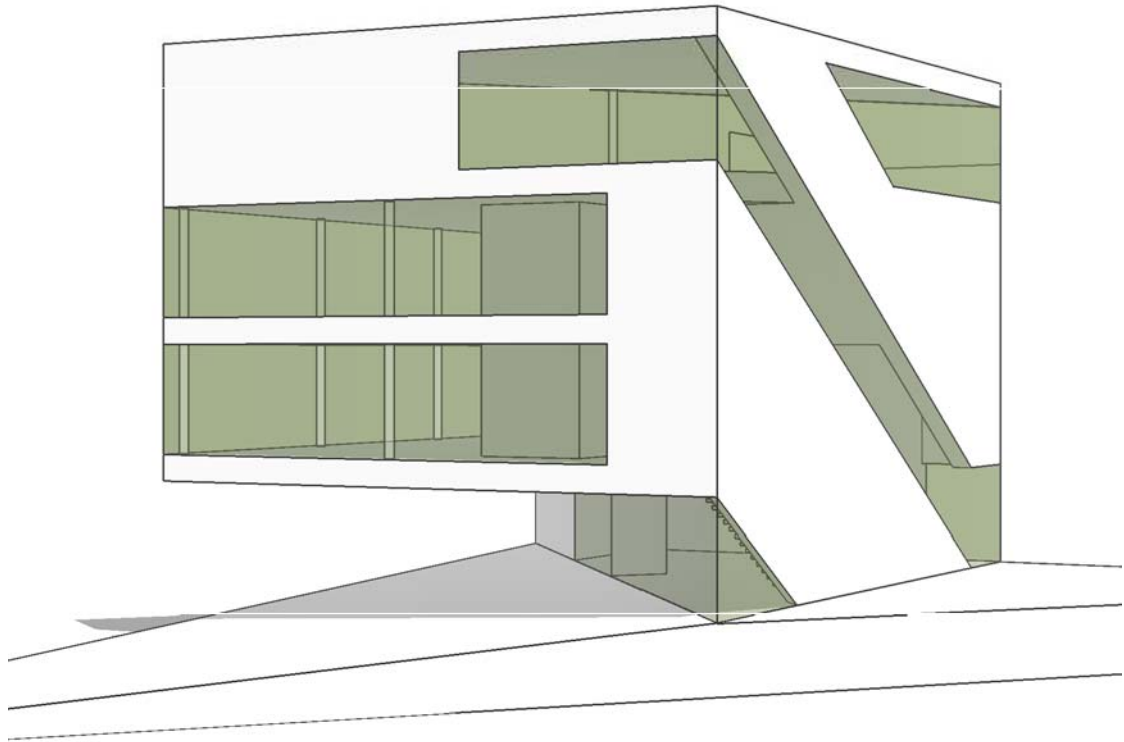
Vertikale Lasten: Aufnahme durch (Dach-)decken, Abtragung über Stützen und Wände in Fundamente

Auskragung: Aufnahme durch Vierendeelrahmen, Abtragung durch Fachwerk (s. Bauteilzeichnungen)

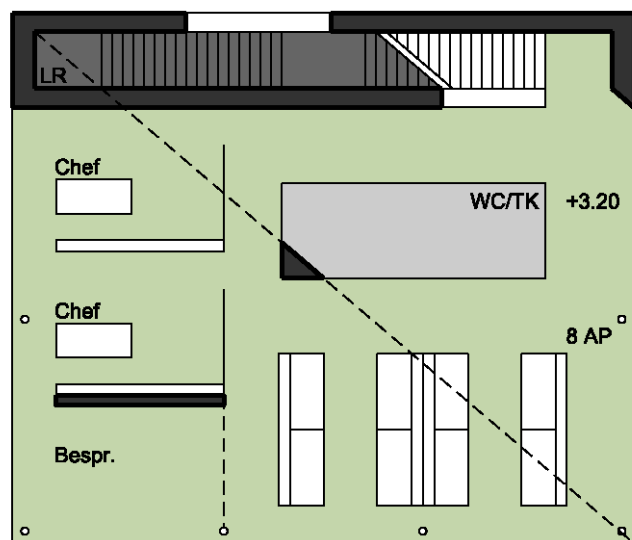
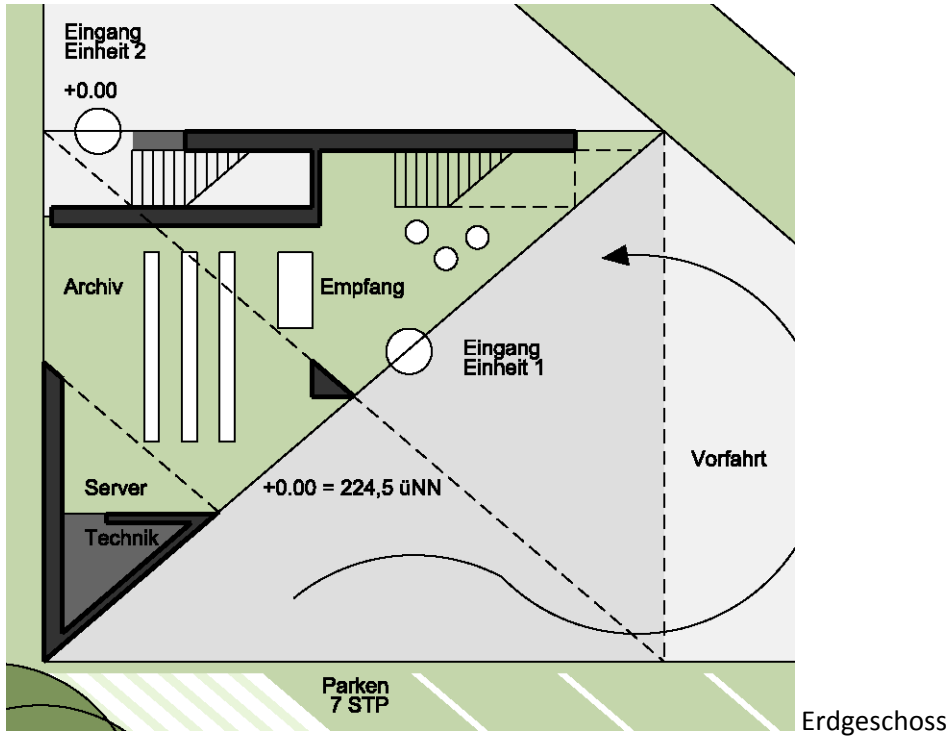
Anhang

Ansichten



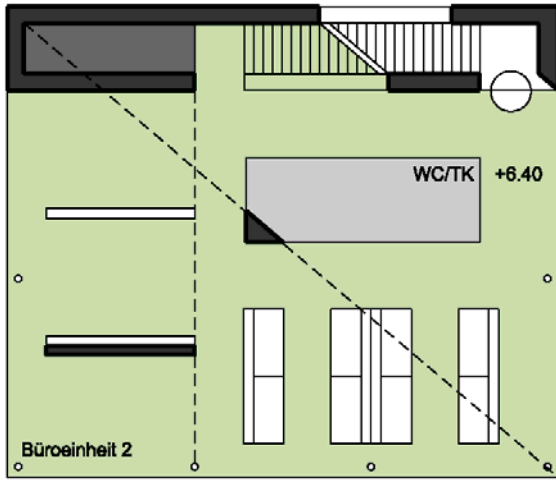


Grundrisse und Schnitt



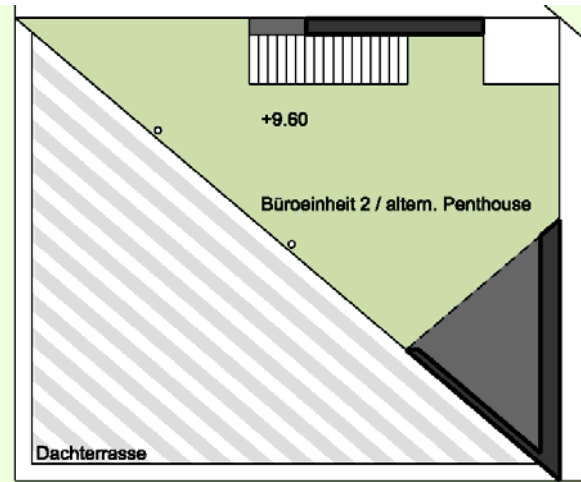
Obergeschoss E1
BGF = 211 qm

1. Obergeschoss

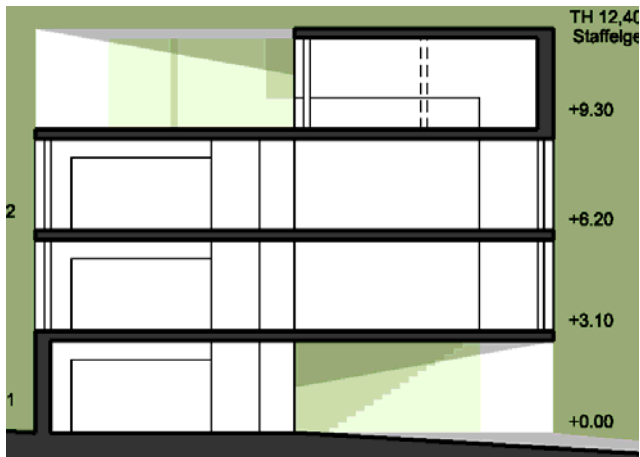


Obergeschoss E2
BGF = 228 qm

2. Obergeschoss

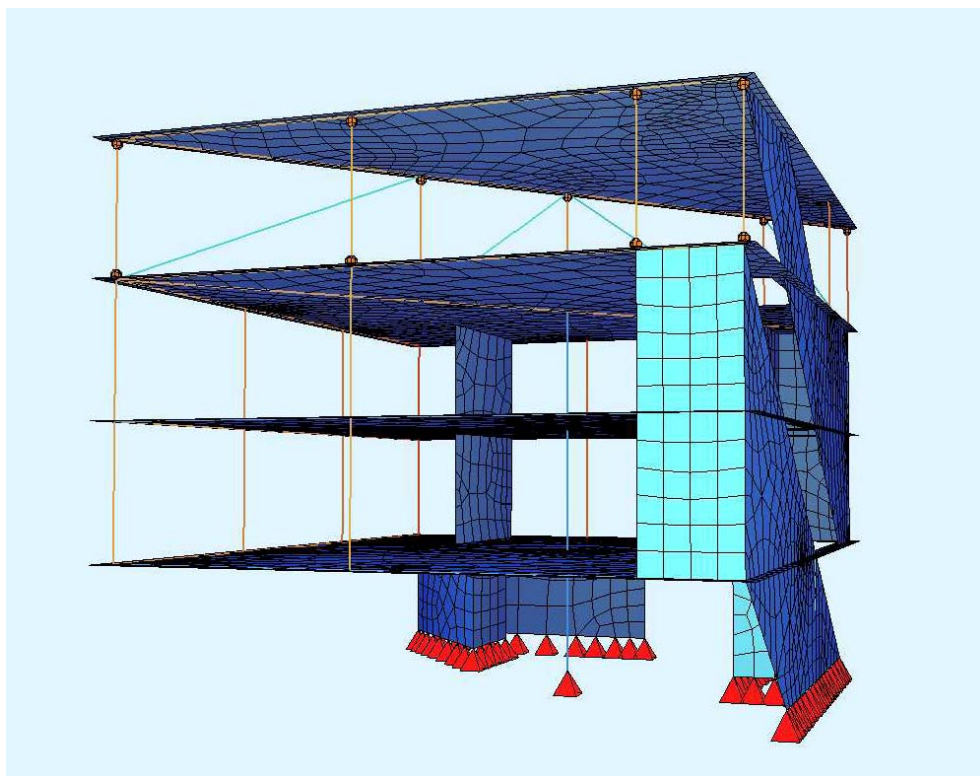
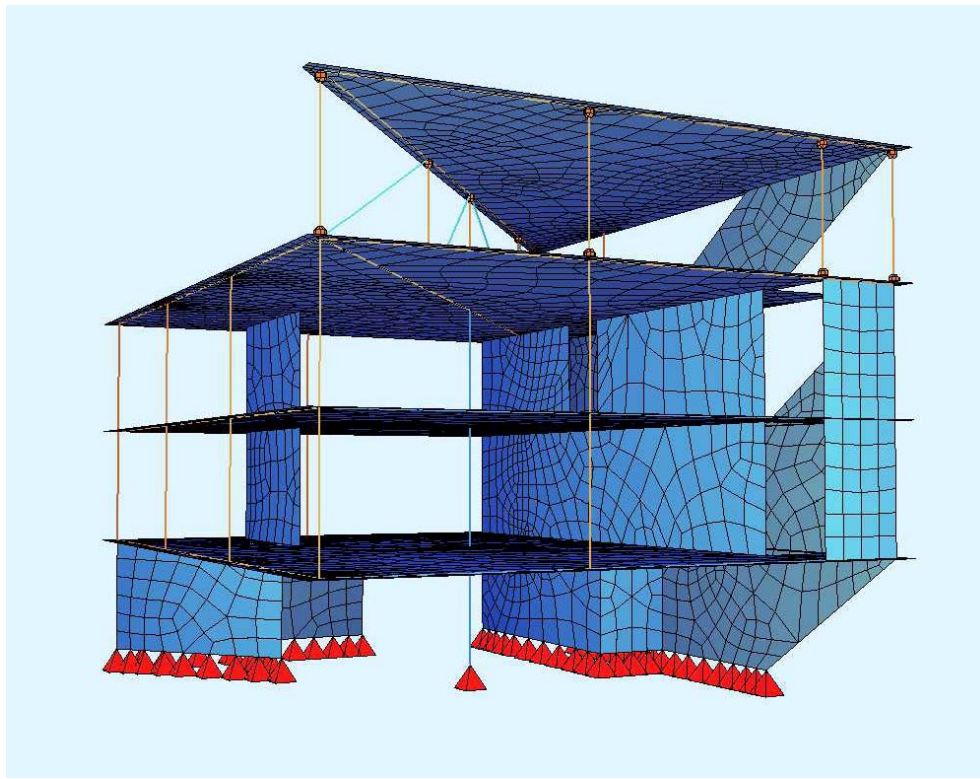


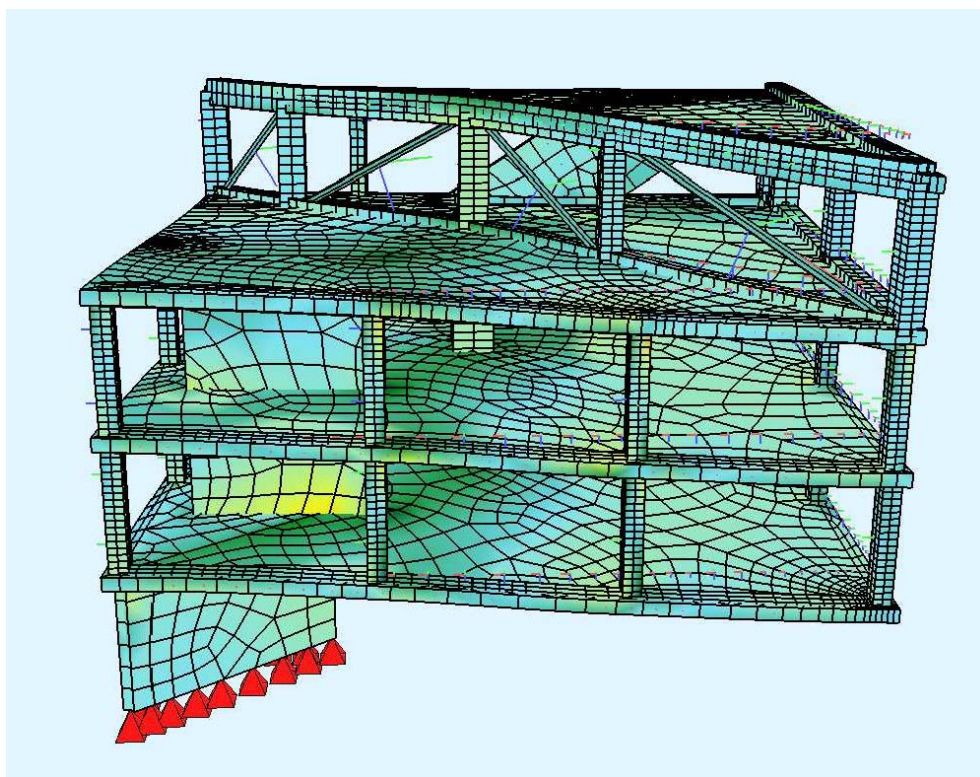
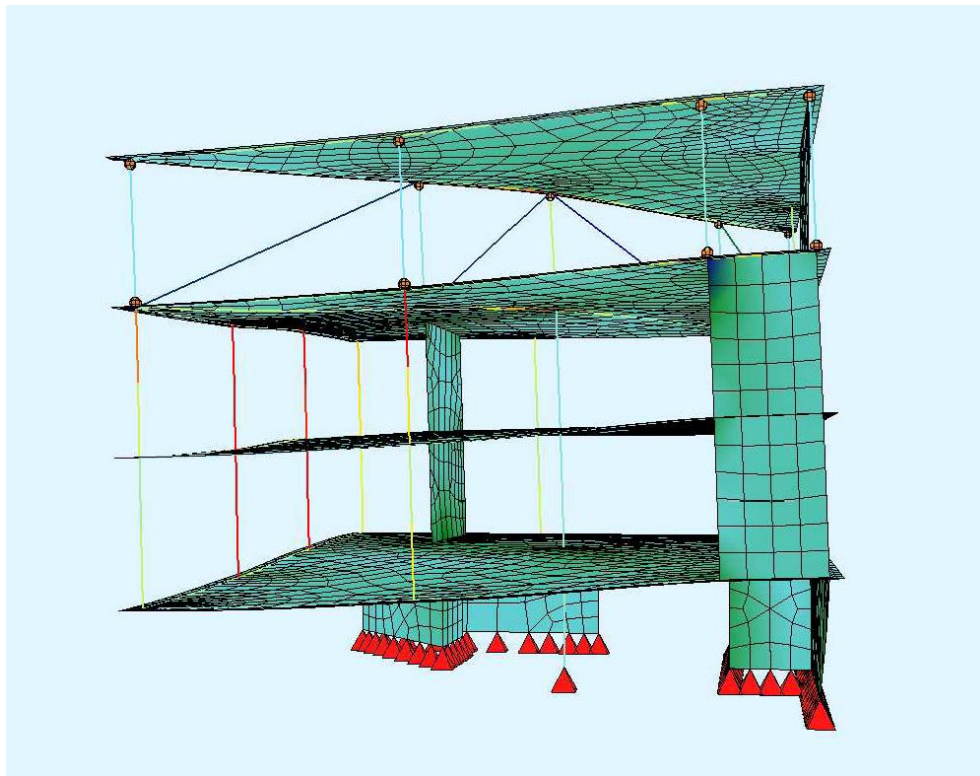
Dachgeschoss



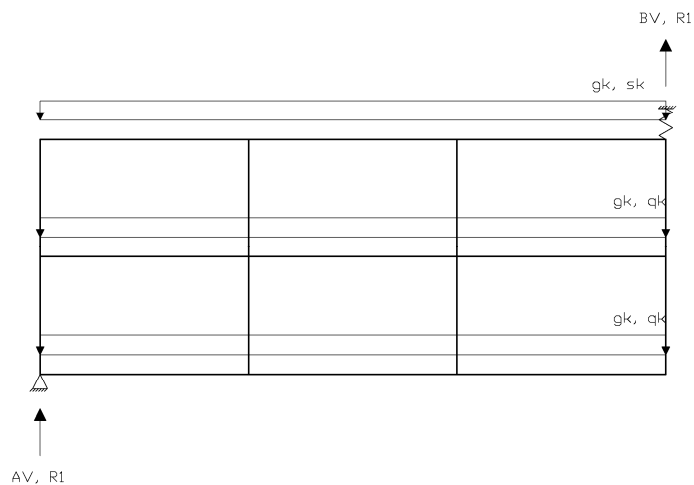
Schnitt

Funktionsmodell

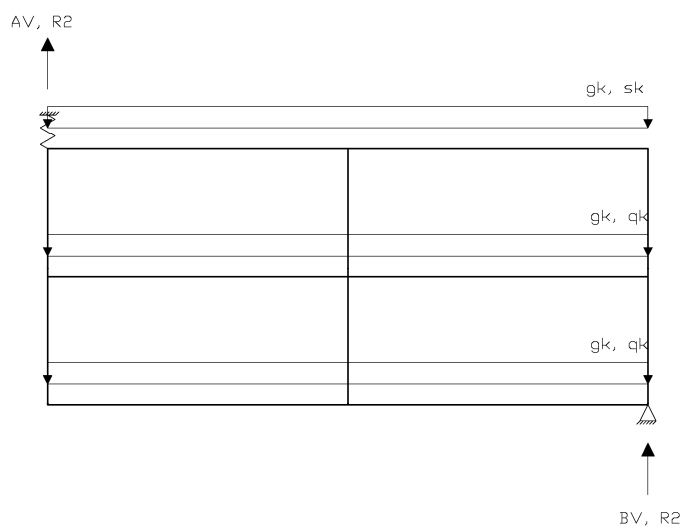




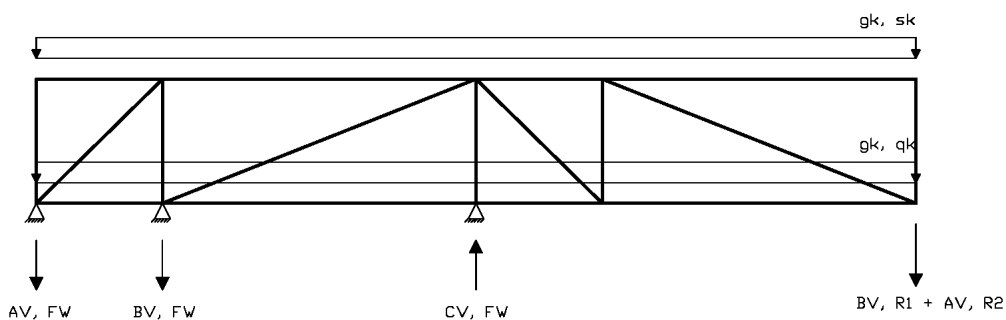
Lastabtrag Rahmen und Fachwerk



Vierendeelrahmen 1



Vierendeelrahmen 2



Fachwerk

A.3 Formblätter für Anwendungsbeispiel

Sammlung möglicher Fehlerarten

Ergebnisse der Sitzung vom 18.06.2009

kritische Stellen:	Fachwerk: Bauteile, Anschlüsse Vierendeelrahmen Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk Zugverankerung Fachwerk - Wand Hauptstütze
---------------------------	---

Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart	Fehlernr.
Hauptstütze	S3.1 (S2.1, S1.1)	gibt nach (Verformungen)	01a
		versagt komplett	01b
Gründung / Einzelfundament	F0.2	große Setzung	02
Vierendeelrahmen-Stütze	(S.2.2, S.2.3, S2.4, S2.5, S2.7, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.7)	gibt nach (Verformungen)	03a
		versagt komplett	03b
Vierendeelrahmen-Riegel	(U1.1, U1.3, U2.1, U2.3, U3.1, U3.3)	gibt nach (Verformungen)	04a
		versagt komplett	04b
Fachwerk-Gurt	(U3.2, U4.2)	gibt nach (Verformungen)	05a
		versagt komplett	05b
Fachwerk-Stütze	(S4.1, S4.2, S4.3, S4.4, S4.5)	gibt nach (Verformungen)	06a
		versagt komplett	06b
Fachwerk-Diagonale	(X4.1, X4.2, X4.3, X4.4)	gibt nach (Verformungen)	07a
		versagt komplett	07b
Anschluss Vierendeelrahmen: Riegel-Stütze	(A05)	gibt nach (Verformungen)	08a
		versagt komplett	08b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	08c
Anschluss Vierendeelrahmen - Fachwerk	(A06)	gibt nach (Verformungen)	09a
		versagt komplett	09b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	09c
Anschluss Fachwerk an zugbeanspruchte Wand	(A03)	gibt nach (Verformungen)	10a
		versagt komplett	10b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	10c
Anschluss Fachwerk: Gurt- Stütze	(A04)	gibt nach (Verformungen)	11a
		versagt komplett	11b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	11c
Anschluss Fachwerk: Diagonale- Gurt	(A02)	gibt nach (Verformungen)	12a
		versagt komplett	12b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	12c

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Hauptstütze S3.1 (S2.1, S1.1)
Funktion	Aufnahme der Lasten aus Decken und Fachwerk und Weiterleitung in die Fundamente

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	2	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Auflagerabsenkung für Fachwerk	1	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Schnittgrößen-ermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-rahmen)	3	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	12	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Hauptstütze							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Auflagerverlust für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	3	Hauptstütze versagt (stürzt ein)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	1	5	Uwe Wolf 30.6.2009
	5			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen		1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	
Auflagerverlust für Fachwerk -> Versagen Fachwerk und Vierendeelrahmen			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	1	5	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Gründung / Einzelfundament unter Hauptstütze FO.2					Bewertung der Fehler: - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) - Bedeutung der Fehlerfolge (B) - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)				
Funktion		Aufnahme der Lasten aus dem Gebäude und Weiterleitung in den Boden									
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin		
Stärkere Setzung der Hauptstütze	1	große Setzung des Fundaments unter der Hauptstütze	falsche Bodenkennwerte zugrundegelegt		3	genauere Bodenuntersuchungen durchführen	2	<u>18</u>	Michael Eisfeld 10.7.2009		
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	2		Fundament nicht ausreichend dimensioniert	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	1	6	Michael Eisfeld 10.7.2009		
Auflagerabsenkung für Fachwerk	1		Lasten aus Hauptstütze größer als erwartet	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	2	12	Michael Eisfeld 10.7.2009		
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-Rahmen)	3										

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Vierendeelrahmen-Stütze (S.2.2, S.2.3, S2.4, S2.5, S2.7, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.7)
Funktion	Teil des Vierendeelrahmens; Aufnahme der Lasten im Bereich der Auskrugung

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Lasten innerhalb des Rahmens lagern sich um, Reduzierung der Gesamtsteifigkeit des Rahmens	2	VR-Stütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrener Kollegen durchsprechen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
				fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	2	8
fehlerhafte Bemessung	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	8				

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Vierendeelrahmen-Stütze							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Lasten lagern sich um, stärkere Beanspruchung der Riegel und bestimmter Anschlüsse	4	VR-Stütze versagt komplett	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlüssig prüfen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Vierendeelrahmen-Riegel (U1.1, U1.3, U2.1, U2.3, U3.1, U3.3)
Funktion	Teil des Vierendeelrahmens; Aufnahme der Lasten im Bereich der Auskrugung

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

Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Lasten innerhalb des Rahmens lagern sich um, Reduzierung der Gesamtsteifigkeit des Rahmens	2	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
		fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2					
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen				

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Vierendeelrahmen-Riegel							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Lasten lagern sich um, stärkere Beanspruchung der Riegel und bestimmter Anschlüsse	4	VR-Riegel versagt komplett	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlüssig prüfen	1	4	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Fachwerk-Gurt (U3.2, U4.2)
Funktion	Teil des Fachwerks; Aufnahme der Lasten aus Auskragung über Vierendeelrahmen und Abhängung

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

Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformungen im Fachwerk, Steifigkeit des gesamten Fachwerks nimmt ab	FW-Gurt gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrener Kollegen durchsprechen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Reduzierte Steifigkeit des Fachwerks führt zu größeren Verformungen in den Vierendeelrahmen	4	fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
		fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Fehlernummer: 05

A Anhang

Bauteil / Anschluss		Fachwerk-Gurt						Verantwortlicher / Termin	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	
Mögliche Fehlerfolgen das Fachwerk verliert seine Tragfähigkeit, Lasten aus Auskragung können nicht mehr hinreichend aufgenommen werden; große Schäden bis hin zu Teileinsturz	5	FW-Gurt versagt komplett	Mögliche Fehlerursachen fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
fehlerhafte Bemessung	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Fachwerk-Stütze (S4.1, S4.2, S4.3, S4.4, S4.5)
Funktion	Teil des Fachwerks; Aufnahme der Lasten aus Auskragung über Vierendeelrahmen und Abhängung

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformungen im Fachwerk, Steifigkeit des gesamten Fachwerks nimmt ab	3	FW-Stütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
Reduzierte Steifigkeit des Fachwerks führt zu größeren Verformungen in den Vierendeelrahmen	4			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	3	24
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk-Stütze							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen das Fachwerk verliert seine Tragfähigkeit, Lasten aus Auskragung können nicht mehr hinreichend aufgenommen werden; große Schäden bis hin zu Teileinsturz	5	FW-Stütze versagt komplett	Mögliche Fehlerursachen fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Fehlernummer: 07

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk-Diagonale (X4.1, X4.2, X4.3, X4.4)							
Funktion		Teil des Fachwerks; Aufnahme der Lasten aus Auskragung über Vierendeelrahmen und Abhängung							
		Bewertung der Fehler:							
		- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)							
		- Bedeutung der Fehlerfolge (B)							
		- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)							
		- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformungen im Fachwerk, Steifigkeit des gesamten Fachwerks nimmt ab	3	FW-Diagonale gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrener Kollegen durchsprechen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Reduzierte Steifigkeit des Fachwerks führt zu größeren Verformungen in den Vierendeelrahmen	4		fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk-Diagonale							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen das Fachwerk verliert seine Tragfähigkeit, Lasten aus Auskragung können nicht mehr hinreichend aufgenommen werden; große Schäden bis hin zu Teileinsturz	5	FW-Diagonale versagt komplett	Mögliche Fehlerursachen fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Vierendeelrahmen: Anschluss Riegel-Stütze (A05)
Funktion	Teil des Vierendeelrahmens; Aufnahme der Lasten im Bereich der Auskrugung

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Lasten lagern sich um, stärkere Beanspruchung einzelner Bauteile und umliegender Anschlüsse	2	Anschluss Riegel-Stütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrener Kollegen durchsprechen	3	12	Uwe Wolf 30.6.2009
				Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	3	12	Uwe Wolf 30.6.2009
				Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	12	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Vierendeelrahmen: Anschluss Riegel-Stütze
----------------------------	---

Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen Lasten lagern sich um, stärkere Beanspruchung einzelner Bauteile und umliegender Anschlüsse	Anschluss Riegel-Stütze versagt komplett	Mögliche Fehlerursachen fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
		fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
		fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	8	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Vierendeelrahmen: Anschluss Riegel-Stütze							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Planung des Rahmens muss erneuert durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	4	Anschluss Riegel-Stütze nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	zu hohe Lasten	Anschluss für auftretende Lasten bemessen	3	Bemessung des Anschlusses frühzeitig durchführen und bzgl. Ausführbarkeit im Team besprechen	3	36	Yousef Salamah 20.7.2009
				bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten					
			geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt	einfache Geometrien verwenden notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen	2	Anschluss in kleinem Maßstab herauszeichnen	3	24	Yousef Salamah 20.7.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk (A06)
Funktion	Einleitung der Kräfte aus dem Vierendeelrahmen in das Fachwerk

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
durch größere Verformungen stärkere Belastung insbesondere des Vierendeelrahmens	3	Anschluss VR-FW gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrener Kollegen durchsprechen	3	18	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	3	18	Uwe Wolf 30.6.2009
fehlerhafte Bemessung	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk									
Bauteil / Anschluss	Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk								
Mögliche Fehlerfolgen Vierendeelrahmen verliert ein Auflager, große Schäden bis hin zu Einsturz des auskragenden Bereichs	B 5	Möglicher Fehler (Fehlerart) Anschluss VR-FW versagt komplett	Mögliche Fehlerursachen fehlerhafte Lastermittlung	Vermeidungsmaßnahmen Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	A 1	Entdeckungsmaßnahmen Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	E 2	RPZ 10	Verantwortlicher / Termin Uwe Wolf 30.6.2009
	fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009		
	fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009		

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Anschluss des Vierendeelrahmens an das Fachwerk						Verantwortlicher / Termin	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	
Planung der Verbindung muss erneut durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	4	Anschluss VR-FW nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	zu hohe Lasten	Anschluss für auftretende Lasten bemessen	3	Bemessung des Anschlusses frühzeitig durchführen und bzgl. Ausführbarkeit im Team besprechen	3	36	Yousef Salamah 20.7.2009
				bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten					
			geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt	einfache Geometrien verwenden notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen	2	Anschluss in kleinem Maßstab herauszeichnen	3	24	Yousef Salamah 20.7.2009

Fehlernummer: 10

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Anschluss des Fachwerks an die auf Zug beanspruchte Wand (A03)
Funktion	Einleitung der Kräfte aus dem Fachwerk in das Auflager

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformung des Fachwerks	1	Anschluss FW - zugbeanspruchte Wand gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	3	18	Uwe Wolf 30.6.2009
Absenkung der Kragspitze, dadurch Beanspruchung der Vierendeelrahmen	3			Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	3	18	Uwe Wolf 30.6.2009
				Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	18	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Anschluss des Fachwerks an die auf Zug beanspruchte Wand							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen Fachwerk kippt um, Vierendeelrahmen verlieren Auflager, große Schäden bis hin zu Einsturz des auskragenden Bereichs	5	Anschluss FW - zugbeanspruchte Wand versagt komplett	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Anschluss des Fachwerks an die auf Zug beanspruchte Wand							
Mögliche Fehlerfolgen Planung der Verbindung muss erneuert durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	B	Möglicher Fehler (Fehlerart) Anschluss FW - zugbeanspruchte Wand nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	Mögliche Fehlerursachen zu hohe Lasten	Vermeidungsmaßnahmen Anschluss für auftretende Lasten bemessen bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten	A 3	Entdeckungsmaßnahmen Bemessung des Anschlusses frühzeitig durchführen und bzgl. Ausführbarkeit im Team besprechen	E 3	RPZ 36	Verantwortlicher / Termin Yousef Salamah 20.7.2009
	4	geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt	einfache Geometrien verwenden notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen	2	Anschluss in kleinem Maßstab herauszeichnen	3	24	Yousef Salamah 20.7.2009	

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Fachwerk: Anschluss Gurt-Stütze (A04)
Funktion	Einleitung der Kräfte aus dem Fachwerk in das Auflager

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformungen im Fachwerk, Steifigkeit des gesamten Fachwerks nimmt ab	3	Anschluss Gurt-Stütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
Reduzierte Steifigkeit des Fachwerks führt zu größeren Verformungen in den Vierendeelrahmen	4		fehlerhafte Schnittgrößen-ermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss	Fachwerk: Anschluss Gurt-Stütze
----------------------------	---------------------------------

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
das Fachwerk verliert seine Tragfähigkeit, Lasten aus Auskragung können nicht mehr hinreichend aufgenommen werden; große Schäden bis hin zu Teileinsturz	5	Anschluss Gurt-Stütze versagt komplett	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk: Anschluss Gurt-Stütze							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Planung der Verbindung muss erneuert durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	4	Anschluss Gurt-Stütze nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	zu hohe Lasten	Anschluss für auftretende Lasten bemessen	3	Bemessung des Anschlusses frühzeitig durchführen und bzgl. Ausführbarkeit im Team besprechen	3	36	Yousef Salamah 20.7.2009
				bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten					
		geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt	einfache Geometrien verwenden	notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen	2	Anschluss in kleinem Maßstab herauszeichnen	3	24	Yousef Salamah 20.7.2009

Fehlernummer: 12

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk: Anschluss Diagonale-Gurt (A02)						
Funktion		Einleitung der Kräfte aus dem Fachwerk in das Auflager						
Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
größere Verformungen im Fachwerk, Steifigkeit des gesamten Fachwerks nimmt ab	Anschluss Diagonale-Gurt gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Reduzierte Steifigkeit des Fachwerks führt zu größeren Verformungen in den Vierendeelrahmen	Anschluss Diagonale-Gurt gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Schnittgrößen-ermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und Plausibilität prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
	Anschluss Diagonale-Gurt gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	3	24	Uwe Wolf 30.6.2009
			Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

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

15.7.2009; Seite 1 / 3

Formblatt für Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

Eisfeld Ingenieure

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk: Anschluss Diagonale-Gurt							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Mögliche Fehlerfolgen das Fachwerk verliert seine Tragfähigkeit, Lasten aus Auskragung können nicht mehr hinreichend aufgenommen werden; große Schäden bis hin zu Teileinsturz	5	Anschluss Diagonale-Gurt versagt komplett	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
			fehlerhafte Schnittgrößenermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
	Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen								
			fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	1	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	10	Uwe Wolf 30.6.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss		Fachwerk: Anschluss Diagonale-Gurt					
Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Planung der Verbindung muss erneuert durchgeführt werden; Verzögerungen und zusätzliche Kosten	Anschluss Diagonale-Gurt nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	zu hohe Lasten	Anschluss für auftretende Lasten bemessen	3	3	36	Yousef Salamah 20.7.2009
			bei Überbeanspruchung frühzeitig Anschluss neu auslegen oder Alternative erarbeiten				
		geometrische Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt	einfache Geometrien verwenden	2	3	24	Yousef Salamah 20.7.2009
			notwendige, kompliziertere Anschlusspunkte genau planen				

A.4 Globaler Lastabtrag in DIN A3

xxx-PLATZHALTER für DIN A3-Blatt-xxx

xxx-PLATZHALTER für Rückseite des DIN A3-Blatts-xxx

A.5 Gliederung für Richtlinie „Tragwerk–FMEA“

1. *Vorbemerkungen*
2. *Einleitung*
 - Hintergrund, grundsätzliche Überlegungen
 - Abgrenzung der Tragwerk-FMEA gegenüber anderen möglichen FMEA-Arten und Einordnung in Leistungsphasen
3. *Anwendungsbereich*
 - Bauwerksklassen
 - Vorschrift für Anwendungsnotwendigkeit und -umfang in Abhängigkeit von Gebäudeklassen, consequence classes und den daraus resultierenden Robustheitsklassen
4. *Verweisungen*
5. *Begriffe*
6. *Zweck und Aufgabenstellung, Zielspezifikation*
7. *Vorgehensweise Tragwerk-FMEA*
 - Grundlegende Hinweise und Anforderungen an das FMEA-Team
 - Statisches Konzept und Strukturanalyse
 - Funktionsanalyse
 - Fehleranalyse
 - Risikobewertung durch Risikoprioritätszahl
 - Optimierung
 - Darstellung der Ergebnisse
8. *Fehlerkategorien*
 - Konzeptionelle Fehler
 - Fehler in Ermittlung der Einwirkungen
 - Fehler in Modellierung
 - Fehler in Berechnung und Bemessung
 - Fehler in Details
9. *Literaturhinweise*