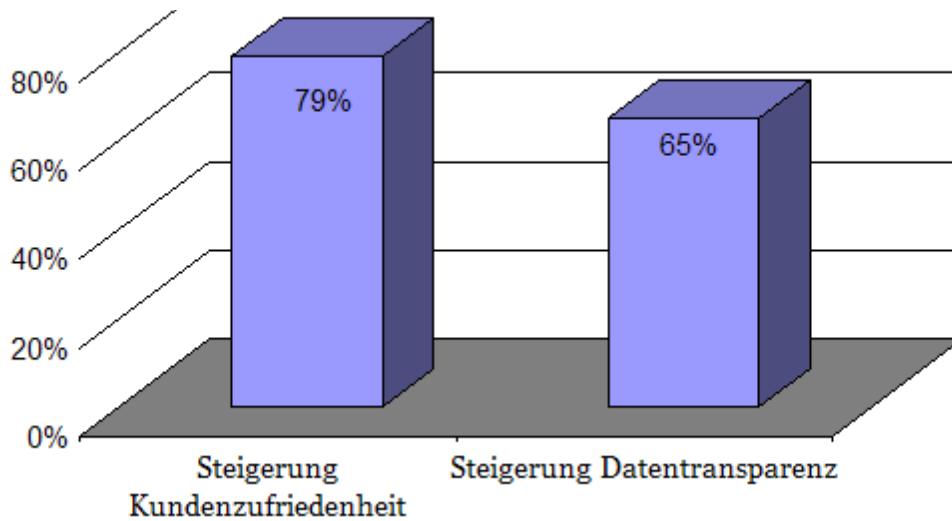


Qualitätssicherung in der Tragwerksplanung



Inhaltsverzeichnis

1.	Motivation	2
2.	Projektumfang	3
	Ist-Zustand und Zielspezifikation (AP1-AP4 mit Bericht D1)	4
	Entwurf des QS-Systems (AP5-AP7 und AP9 mit Bericht D2)	4
	Leitfaden (AP8 und AP 15 mit Bericht D3)	5
	Fallstudien in Büros (AP10 mit Bericht D4)	5
	Bauteilbibliotheken und Fehlerkataloge (AP11-AP 12 mit Bericht D5)	6
	Fehleranalysemodell und Lastpfadmethode (AP16 und AP18 mit Bericht D6).....	7
	Lastpfadmethode u. Modellbibliothek (AP 17 und AP 18 mit Berichten D7a und D7b).....	7
	Softwareprototyp (AP17 und AP19 mit Bericht D8).....	8
	Nutzerevaluierung der Software (AP20-AP22 mit D9).....	10
	Arbeitsblätter für Bauwerksklassen (AP22 und AP23 mit Bericht D10)	10
3.	Ergebnisse und deren Marktmigration	10
4.	Zusammenfassung	11

1. Motivation

Die gesellschaftlich und politisch gewollte Verkürzung von Genehmigungsverfahren sowie die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen führen zu veränderten Planungs- und Bauprozessen. Desweiteren bringen die aktuelle Normung sowie der Computer mit seinen Berechnungsmöglichkeiten eine Informationsflut mit sich, die kaum mehr von Ingenieuren und Prüferingenieuren durch die traditionelle Arbeitsweise zu beherrschen ist. In Zeiten immer stärker werdenden Kosten- und Termindrucks resultiert daraus ein Anstieg an Planungsfehlern, die für die steigende Zahl von Bauschäden - im schlimmsten Fall den Einsturz eines Gebäudes – verantwortlich sind.

Präventive Qualitätssicherung, die über die EN ISO 9001 hinausgeht, ist in der heutigen Tragwerksplanung Mangelware, es sei denn das „Vier-Augen-Prinzip“ findet für größere Bauvorhaben in Form von internen Büroaudits oder der bautechnischen Prüfung Anwendung. Wie dieses „Vier-Augen-Prinzip“ ausgestaltet wird, bleibt allerdings dem/n Einzelnen überlassen. Man kann somit für einen Großteil der Tragwerksplaner behaupten, dass keine standardisierte Qualitätssicherung existiert, die auf einer einheitlichen Prüfmethodik basiert und auf die vorhandene computergestützte Arbeitspaxis angepaßt ist. Obwohl die bei der Qualitätssicherung durchgeführten Schritte von Büro zu Büro und von Prüferingenieur zu Prüferingenieur verschieden sind, besteht ein breiter Konsens unter den Praktikern, was eine gute Qualitätssicherung fern ab von „zeitlichen Nöten“ des Prüfenden auszeichnet.

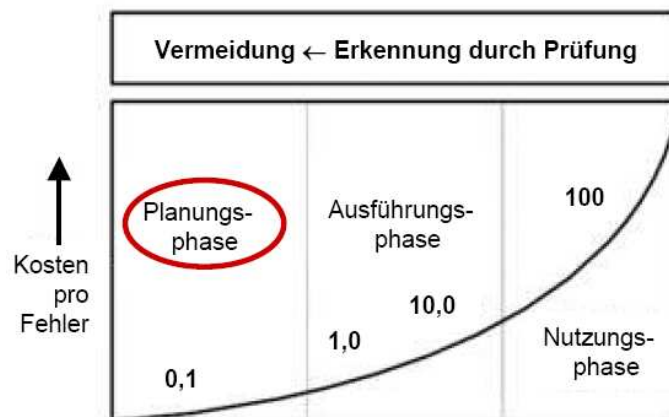


Abbildung 1: Einfluss von Fehlern auf Kosten

An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt „Tragwerk-FMEA¹“ mit dem Ziel an, ein modellbasiertes² Qualitätssicherungssystem (QS-System) für die computerunterstützte Tragwerksplanung auf Grundlage der bekannten und sehr erfolgreich eingesetzten FMEA-Methode (DIN EN 60812) im Maschinenbau zu entwickeln, da ein Großteil der Ursachen für Schäden an Bauwerken aus Planungsfehlern herrühren und diese den größten Einfluss auf die Kosten haben.

Das Titelbild zeigt die prozentuale Steigerung der Kundenzufriedenheit und Datentransparenz im Maschinenbau durch Anwendung der FMEA-Methode. Wenn dieses Potential nur annähernd in der Tragwerksplanung durch die Tragwerk-FMEA ausgeschöpft werden kann, wäre das ein großer Erfolg auf lange Sicht.

¹ Die FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse) ist eine analytische Methode, um qualitativ die Auswirkungen eines Bauteilfehlers auf die Zuverlässigkeit des Gesamt- oder eines Teilsystems zu bestimmen. Solch einem Ausfallscenario wird ein Risiko zugeordnet, welchem der Ingenieur dann gegebenenfalls präventiv durch eine Fehlervermeidungsstrategie begegnen kann.

Da zum Thema modellbasierte FMEA erste Erfahrungen ausschließlich im Bereich der Luftfahrtindustrie ohne die Anbindung von FE-Programmen gewonnen wurden, ergeben sich für das Projekt „Tragwerk-FMEA“ folgende Fragestellungen:

F1: Wie lässt sich die modellbasierte FMEA, die für Produkte in Serienfertigung entwickelt wurde, auf die Planung von Einzelartefakten wie Baukonstruktionen übertragen und um numerische Berechnungen erweitern?

F2: Wie schätzen Ingenieure bzw. Prüferingenieure heutzutage Folgen von Planungsfehlern ab, und wie kann dies in die Entwicklung der modellbasierten FMEA für Tragwerke einfließen?

F3: Wie werden Daten aus Berechnungsprogrammen bauteilbezogen abstrahiert, damit Ingenieure ein Verständnis über das globale Tragverhalten anhand eines mechanischen Modells erlangen?

F4: Wie muss eine bauteilbezogene Lastpfadmethode mit integralen Schnittgrößen ausgestaltet werden, um das Tragverhalten – auch von Fehlverhalten – abzubilden und zu simulieren?

Im Folgenden wird das Projekt mit seinen einzelnen Arbeitspaketen kurz beschrieben, wobei auf die oben genannten Fragestellungen eingegangen wird. Der interessierte Leser wird auf die ausführlichen Projektberichte verwiesen (siehe Liste der Berichte und der durchgeführten Projekt- und Diplomarbeiten im Anhang).

2. Projektumfang

Die untere Darstellung zeigt die Projektstruktur. Das Projekt besitzt fünf Projektphasen, denen die jeweiligen Arbeitspakete mit ihren Projektberichten (sogenannte deliverables) zugeordnet sind.

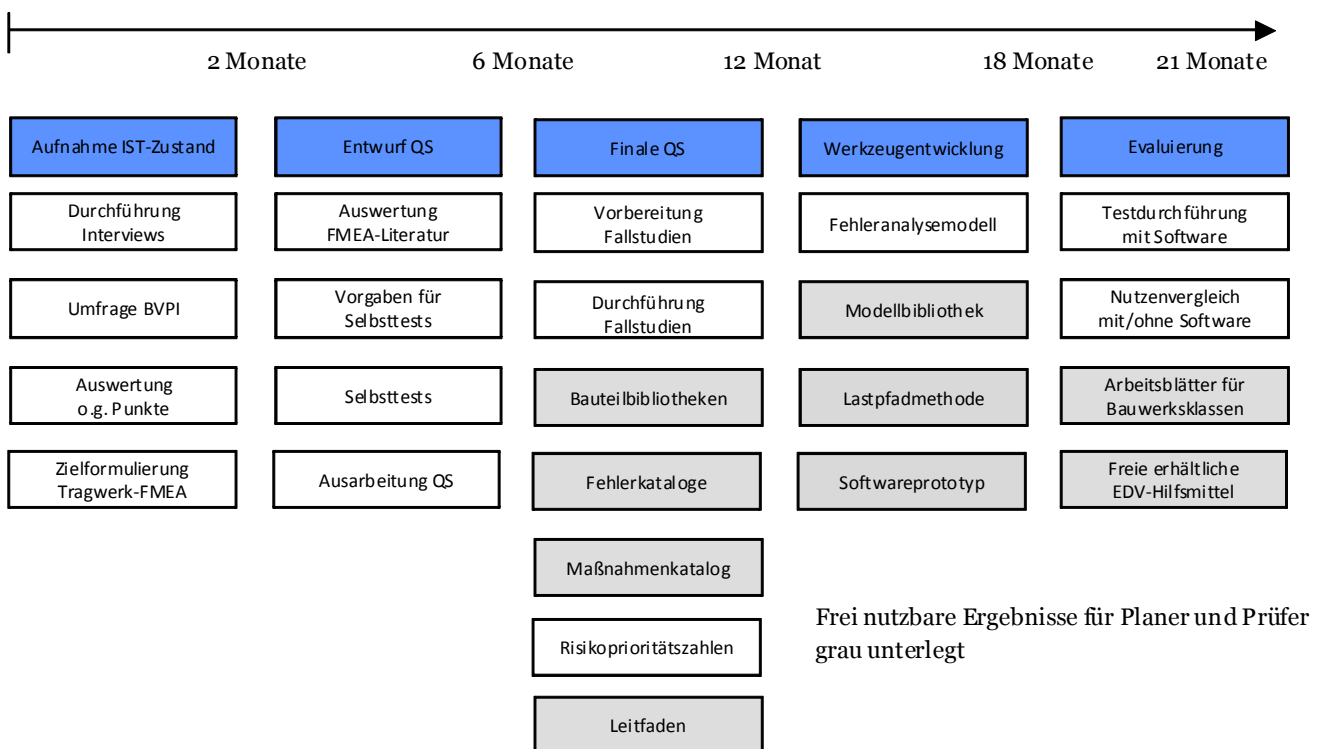


Abbildung 2: Projektstruktur

² Modellbasiert bedeutet, dass dem Entscheidungsprozess bei einer FMEA-Sitzung ein mechanisches Modell zu Grunde liegt, um die Auswirkungen von Bauteilfehlern auf andere Bauteile zu berechnen. Dieses Modell wird umso wichtiger, je komplexer der Lastabtrag des Bauwerks ist, da selbst erfahrene Ingenieure kaum noch in der Lage sind, a priori das Tragverhalten zu prognostizieren – im Besonderen bei Bauteilschwächungen.

Ist-Zustand und Zielspezifikation (AP1-AP4 mit Bericht D1)

Trotz computerbasierter Tragwerksplanung sinkt die Qualität der Bauwerke. Daher wird zu Beginn begründet, wie eine präventive risikobezogene Qualitätssicherung diesen Missstand ändern kann. Denn Ziel sollte sein, die Qualität zu verbessern, d.h. Planungsfehler und damit verbundene Schäden durch vertretbaren Aufwand in der Praxis zu vermeiden und dadurch wirtschaftlicher zu planen. Die momentane Situation in der Praxis wird genauer beleuchtet, indem Ergebnisse einer Umfrage, die unter den Prüfsingenieuren durchgeführt wurde, zum Stand der QS und der vorherrschenden Fehler in der Praxis diskutiert werden. Auf dieser Grundlage wird unser Vorschlag zur präventiven QS skizziert. Er greift das vorhandene Risiko eines Bauwerks auf, festgelegt über die Konsequenzklasse, die Honorarzone und die Robustheit des Tragwerks, auf dessen Basis der Umfang der Tragwerk-FMEA festgelegt und nach den frühen Projektphasen im Team von den Planungsbeteiligten durchgeführt wird.

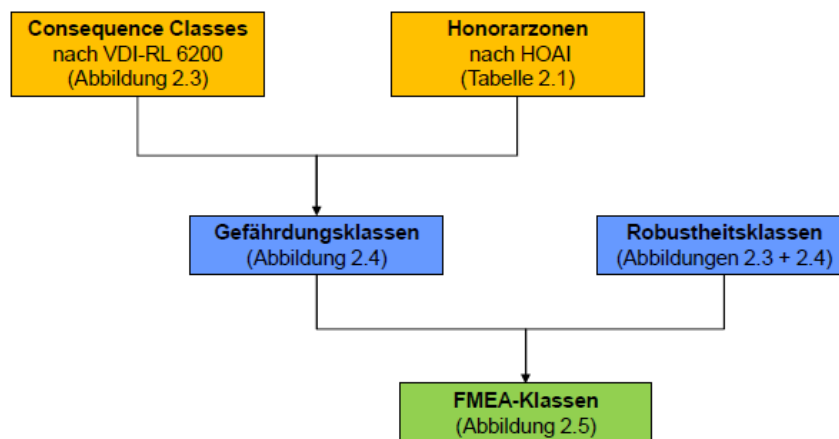


Abbildung 3: Ermittlung der FMEA-Klasse eines Bauwerks

Die Methode der System-FMEA wird kurz erläutert und die Methode der qualitativen Verhaltensmodellierung eingeführt, um die Arbeitsschritte des Ingenieurs formal auf ein berechenbares Modell abzubilden. Das Ergebnis ist die modellbasierte „Tragwerk-FMEA“, die eine computerunterstützte Arbeitsumgebung für komplexe Bauvorhaben dem Planer bereitstellen soll. Sie bettet sich in den bekannten Planungsablauf nach den Leistungsphasen Vor- bzw. Entwurfsplanung ein, bevor in den darauffolgenden Phasen der prozentual höchste Arbeitsaufwand nach HOAI anfällt.

Entwurf des QS-Systems (AP5-AP7 und AP9 mit Bericht D2)

Zur Entwicklung einer Prüfmethode „Tragwerk-FMEA“ werden zwei Fallstudien, die in unterschiedlichen Büros durchgeführt worden sind, vorgestellt und ausgewertet. Bei den Studien wurde ein gemeinsames Referenzbeispiel benutzt. Die aus der Auswertung der beiden Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Ableitung einer einheitlichen Methodik, die als Grundlage zur Erarbeitung des Leitfadens dient. Die Prüfmethode wird zu Beginn bezogen auf das Anwendungsgebiet „Tragwerksplanung“ kurz erläutert. Das Augenmerk liegt auf einer sinnvollen Organisation der Team-Sitzung, einer schnellen Erstellung der erforderlichen Unterlagen für die Tragwerk-FMEA sowie der Darstellung des ingenieurmäßigen Schlussfolgerns zur Bestimmung der Fehlerfolgen auf System- und Tragwerksebene. In den Anhängen finden sich der globale Lastabtrag, eine genauere Beschreibung des Referenzbeispiels sowie die Ergebnisse der beiden Fallstudien.

Leitfaden (AP8 und AP 15 mit Bericht D3)

Im vorliegenden Leitfaden werden erstmals Regeln zur Durchführung einer FMEA im Bauwesen formuliert. Zu Beginn werden Begriffe und Definitionen zur Tragwerk-FMEA eingeführt und kurz erläutert. Folgende Vorgehensweise für eine Tragwerk-FMEA wird empfohlen, wobei einzelne Arbeitsschritte dem gewöhnlichen Planungsprozess entstammen:

1. Ermittlung des notwendigen Umfangs eine FMEA:

- Einordnung des Bauwerks in eine Gefährdungsklasse,
- Erstellen des statisch-konstruktiven Entwurfs (samt Vorbemessung),
- Einordnung des Bauwerks in eine Robustheitsklasse,
- Ermittlung des FMEA-Klasse.

2. Funktionsanalyse mit Darstellung des globalen Lastabtrags bzw. der zu untersuchenden Teile

3. Durchführung des Fehleranalyse und Optimierungssitzung:

- Fehleranalyse,
- Risikobewertung,
- Ggf. Optimierung,
- Dokumentation der Ergebnisse.

4. Planungs- und ausführungsbegleitende Kontrolle und ggf. Anpassung

Für alle Arbeitsschritte werden die erforderlichen Parameter eingeführt und erläutert. Dabei werden die Konsequenzklasse, der Schwierigkeitsgrad und die Robustheit eines Tragwerks als diejenigen Parameter definiert, aus denen sich der Umfang der FMEA ableiten lässt. Tabellarische Hilfsmittel, die auf typische Projekte in der Tragwerksplanung anwendbar sind, werden zur Verfügung gestellt.

Fallstudien in Büros (AP10 mit Bericht D4)

Auf Grundlage zweier im Rahmen des Gesamtprojektes erstellter Diplomarbeiten wurde für den von der WTM Engineers GmbH betrachteten mehrgeschossigen Büro- und Geschäftshauskomplex SPV17-20 in der HafenCity Hamburg eine FMEA-Sitzung durchgeführt.

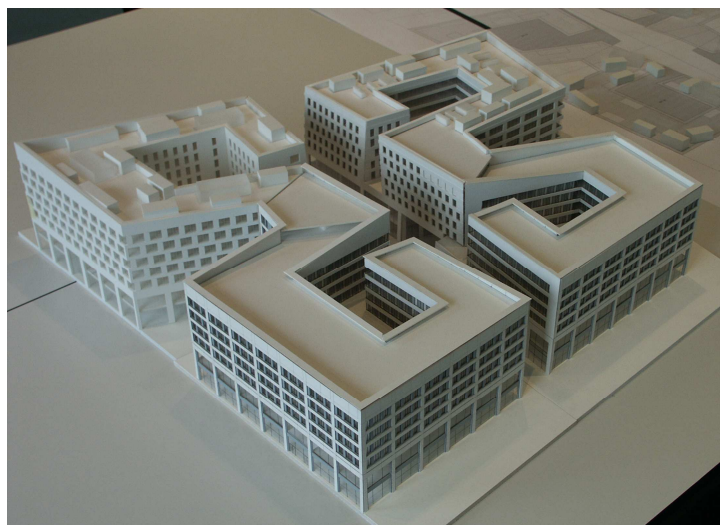


Abbildung 4: Fallstudie WTM Engineers

Dabei lag das Augenmerk auf einer sinnvollen Organisation der FMEA-Sitzung, einer schnellen Erstellung der zusätzlich erforderlichen Unterlagen zur Durchführung der Tragwerk-FMEA sowie der Darstellung des ingenieurmäßigen Schlussfolgerns zur Bestimmung der Fehlerfolgen auf System- und Tragwerksebene.

Aus der Diskussion während der FMEA-Sitzung ergaben sich für die Weiterentwicklung der Tragwerk-FMEA zwei wesentliche Fragestellungen:

- Wie lässt sich die Zuordnung der Bewertungskriterien, insbesondere für die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, die offensichtlich stark von der persönlichen Einschätzung jeden Teilnehmers abhängig sind, objektivieren?
- Wie können die in den Formblättern festgehaltenen Maßnahmen wirksam über alle Leistungsphasen bis zur Ausführung verfolgt werden?

Diese Fragestellungen wurden bei der Erarbeitung des Leitfadens berücksichtigt. Das Büro Werner Sobek Frankfurt konnte leider keine Fallstudie durchführen.

Bauteilbibliotheken und Fehlerkataloge (AP11-AP 12 mit Bericht D5)

In enger Abstimmung mit den übrigen Projektbeteiligten und auf die programmtechnischen Bedürfnisse zugeschnitten, wurde eine Systematik entwickelt, mit der sich für einzelne Tragelemente und deren Anschlüsse an benachbarte Bauteile (Lasteinleitung, Lastweiterleitung) Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen systematisch darstellen lassen. Im Einzelnen enthalten die Datenblätter folgende Angaben:

- *Structural Element Name* und *Structural Element Info*: Angaben zum statischen Grundsystem, zum Material und zur vorherrschenden Beanspruchung.
- *Fault Type*: Angaben zu Fehlerarten, die Bauteilen und Anschlüssen/Auflagern des Bauteils auftreten können.
- *Cause*: Mögliche Ursachen, die zu den genannten Fehlerarten führen, mit Angaben der Bewertungszahlen für die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten der Fehlerursachen (Diese sind objektbezogen und nicht zu verallgemeinern).
- *Reaction force, reaction stiffness*: Qualitative Größenordnung der aus der jeweiligen Fehlerart resultierenden Steifigkeits- und Schnittgrößenänderungen für die Bereiche Anfang, Ende und Mitte eines Bauteils. Die entsprechenden Werte werden in ihrer Größenordnung plausibel abgeschätzt, sie basieren nicht auf genaueren struktur- oder werkstoffmechanischen Untersuchungen.
- *Maximum exceedance*: Angabe der maximalen Überschreitung der Bauteilwiderstände. Ab der genannten Überschreitung treten die angegebenen Steifigkeitsreduzierungen ein.
- *Condition*: Mit dieser Definition wird ein Bezug zwischen Fehlerart und maßgebender maximaler Überschreitung hergestellt.
- *Comment*: Beschreibung des Fehlers im Wortlaut.

Jedes Datenblatt enthält eine isometrische Darstellung des betrachteten Tragelementes mit allen geometrischen Parametern. Die Datenblätter wurden für zwei vergleichsweise einfache und überschaubare Projekte, Pergola (Holz, Mauerwerk, Stahlbeton) und üblicher Stahlbetonhochbau vollständig bearbeitet. Die in diesem Zusammenhang dokumentierten Tragelemente ermöglichen dem erfahrenen Ingenieur eine einfache und schnelle Adaption auf andere Anwendungsbeispiele.

Fehleranalysemodell und Lastpfadmethode (AP16 und AP18 mit Bericht D6)

Zu Beginn wird das Modellkonzept der Tragwerk-FMEA mit seinen relevanten Eigenschaften erarbeitet, das als Basis für einen Softwareprototypen dient. Die Modellierung deckt zwei verschiedene Aspekte ab:

- Das Modell des FMEA-Prozesses. Es beruht im Kern auf der Kategorisierung von relevanten Effekten - der Veränderung von Steifigkeiten infolge von Bauteilchwächungen - wodurch die Tragfunktion eines Bauteils beschrieben wird. Als Extremfall einer Fehlerauswirkung kann ein lokales Bauteilversagen auftreten, das wiederum zu Instabilitäten von Teilen des Tragwerks führt, woraus eine weitere Kette von anschließenden Bauteilversagen infolge des initialen Fehlers resultieren kann.
- Das Modell zur Berechnung der Lastverteilung im Tragwerk, wobei das Tragwerk als strukturelle Beschreibung durch seine Bauteile und deren Parameter sowie den Lastabtrag definiert ist. Die Berechnung basiert auf einem FE-Modell mittels Einflussfunktionen. Zum Zwecke der Tragwerks-FMEA ist das FE-Modell für Fehlerszenarien zu berechnen, die auf Transformationen des initialen Tragwerks beruhen.

Es werden formal die benötigten Repräsentationen und ihre Beziehungen untereinander definiert. Danach werden die zentralen Konzepte für „Fehler“, „Effekt“ und die darzustellenden Informationen als Ergebnisse der Analyse in Form der FMEA-Tabelle beschrieben. Abschließend wird die Nutzung der Einflussfunktionen zur Berechnung der Fehlerauswirkungen abschließend erläutert.

Lastpfadmethode u. Modellbibliothek (AP 17 und AP 18 mit Berichten D7a und D7b)

Die Aufgabe des Tragwerksplaners ist es, die Standsicherheit eines Gebäudes zu garantieren. In der Regel wird er die Statik mithilfe eines FE-Programms aufstellen. Entscheidend für die Qualität der Statik ist, dass der Aufsteller die Grenzen und die Möglichkeiten des Programms kennt und insbesondere, dass er mit den Grundlagen der finiten Elemente vertraut ist. Die FMEA setzt dies eigentlich zwingend voraus, denn die Güte eines Entwurfs und damit die Standsicherheit eines Tragwerks hängen entscheidend von dem Verständnis des Tragwerkplaners für die Grundlagen der Statik und damit für die Grundlagen der Methode der finiten Elemente ab. In diesem Dokument werden daher die wesentlichen Eigenschaften der finiten Elemente dargestellt und die Punkte erörtert, die für den Tragwerksplaner wichtig sind, damit er zu einer vernünftigen Diskretisierung eines Tragwerks mit finiten Elementen kommt und lernt, die FE-Ergebnisse richtig einzuschätzen.

Darauf aufbauend informiert der zweite Bericht über die Grundlagen der Sensitivitätsanalyse von Tragwerken mittels finiten Elementen und Einflussfunktionen und zeigt auf, wie die Sensitivitätsanalyse dazu eingesetzt werden kann, um Fragen wie:

- Was ist der maßgebende Lastpfad in einem Tragwerk?
- Wie sieht der kritische Pfad (Kollaps) aus?
- Wie ändern sich die Schnittkräfte, wenn sich die Steifigkeiten ändern?
- Wie hängen die Spannungen an den höchst beanspruchten Stellen von den Steifigkeiten der benachbarten Bauteile ab?

zu beantworten. Sie hat somit das Ziel, FE-Programme dahingehend zu erweitern, dass sie nicht nur reine Rechenergebnisse liefern, sondern im Sinne der FMEA auch in der Lage sind, einen Tragwerksentwurf als Ganzes zu beurteilen, Abhängigkeiten zu entdecken, Lastpfade darzustel-

len, die Verfolgung von Tragwerksänderungen zu ermöglichen und so den Tragwerksplaner auf mögliche Schwachstellen bzw. Gefahren hinzuweisen, was die originäre Aufgabe der FMEA-Methode ist.

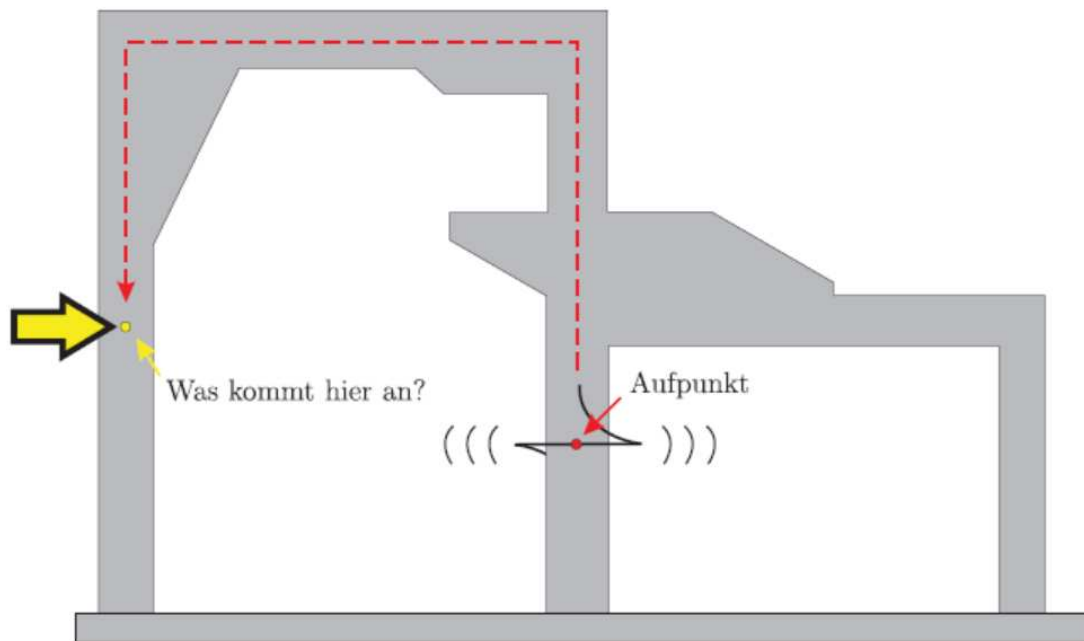


Abbildung 5: Einflussfunktion einer Querkraft für Stielpunkt infolge Spreizung in Aufpunkt

Bei der Sensitivitätsanalyse kommen Einflussfunktionen zum Einsatz, mit denen man Folgen von lokalen Bauteiländerungen durch das Tragwerk bis zu Punkten des Interesses berechnen kann.

Softwareprototyp (AP17 und AP19 mit Bericht D8)

Es wird der Softwareprototyp beschrieben, der auf dem zuvor im Projekt erarbeiteten Fehleranalysemodell und der Lastpfadmethode mittels Einflussfunktionen beruht. Dabei wird im Einzelnen auf die grundsätzlichen Anforderungen, die Schlüsselideen und die Softwarearchitektur eingegangen. Der Prototyp „Tragwerk-FMEA“ greift auf die folgenden im Projekt entwickelten Module zurück:

- NumericalComputation: Hier werden am Tragwerk die Änderungen von Schnittgrößen infolge einer lokalen Bauteilschwächung bestimmt.
- EffectandFaultDefinition: In diesem Modul werden für die geänderten Schnittgrößen die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen abgeleitet, sofern Bauteilwiderstände infolge einer lokalen Schwächung in irgendeinem Bemessungsschnitt überschritten sind. Das Resultat ist ein geändertes mechanisches Modell, das als Basis für den nächsten Propagierungsschritt dient.
- Visualizer: Er dient zur Auswahl von Fault- und EffectElements sowie zur Darstellung der Ergebnisse (Ausnutzung von Bauteile, kritischer Pfad, etc.).
- QFE: In diesem Modul wird die Propagierung von Fehlern infolge von Schnittgrößenänderungen und die daraus resultierenden Überschreitungen der Beanspruchbarkeiten auf andere Bauteile durchgeführt. Als Basis dient ein qualitatives Constraint-Netz, das als Knoten die Effects und Faults besitzt und deren Abhängigkeiten untereinander durch Relationen repräsentiert werden.

- TableEditor: Er dient zum Anzeigen und Editieren der Ergebnisse und stellt das FMEA-Formblatt zur abschließenden Dokumentation bereit.

Die folgende Abbildung stellt den schrittweisen Ablauf einer Tragwerk-FMEA bei Unterstützung durch den Softwareprototypen dar.

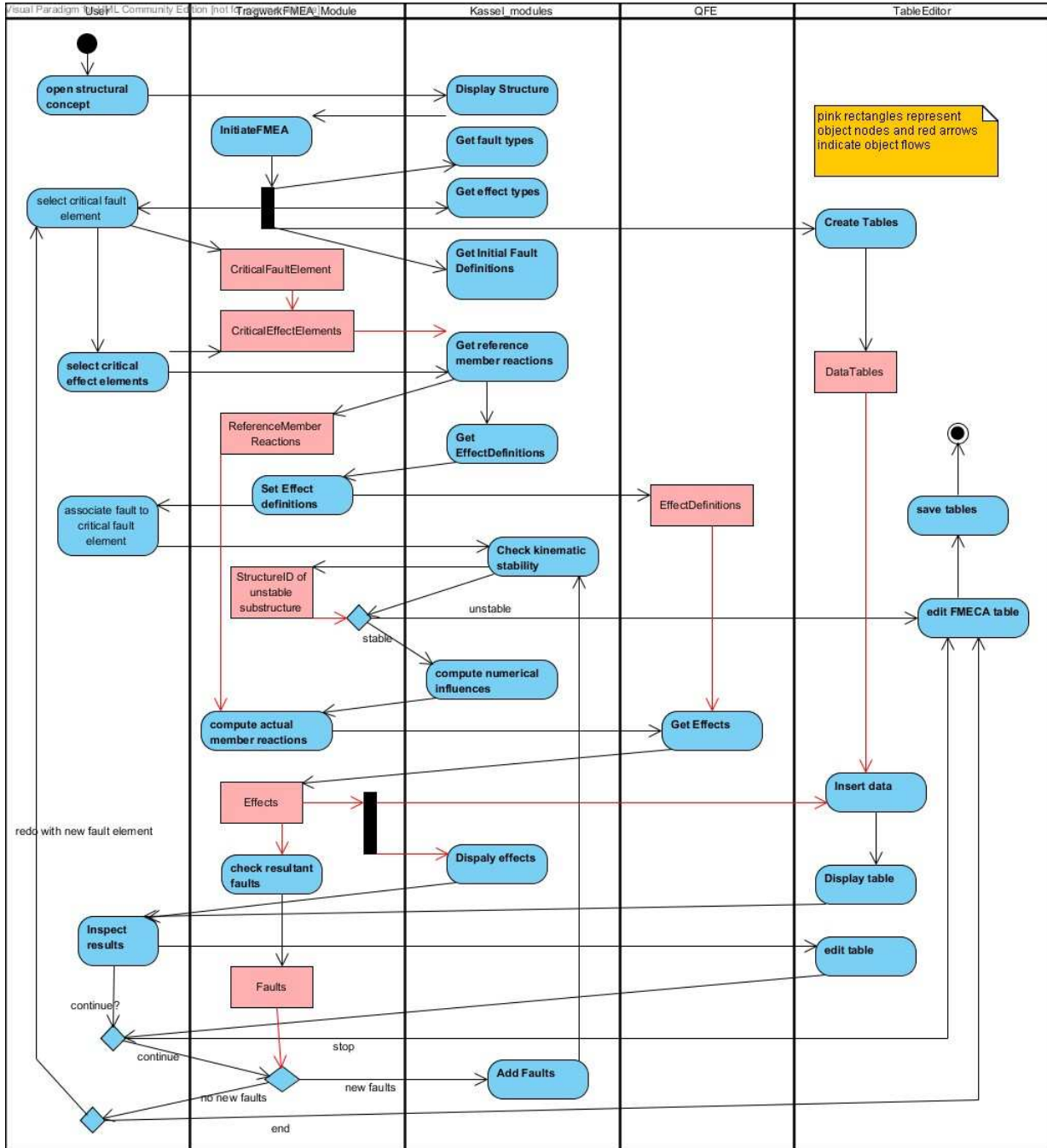


Abbildung 6: Ablaufdiagramm einer FMEA-Sitzung

Nutzerevaluierung der Software (AP20-AP22 mit D9)

Die Software zur Tragwerk-FMEA wird in den teilnehmenden Büros installiert, und es wird für die vorliegenden Fallstudien eine nochmalige Tragwerk-FMEA durchgeführt. Danach wird durch Interviews mit den teilnehmenden Büros ein Soll-Ist-Vergleich erstellt, der die am Anfang gestellten Fragen erörtert:

- Entsteht für die beteiligten Büros ein Mehrwert durch die Software?
- Können mit der Software Folgen von Planungsfehlern besser abgeschätzt werden?
- Bildet das qualitative Modell das Ingenieurverständnis über den Lastabtrag sinnvoll ab?
- Können auch Kollapsvorgänge durch die Software simuliert werden?

Auf Grundlage dieser Rückmeldung wird entschieden, ob die Software bis zur Marktreife weiter entwickelt werden soll, sofern dafür geeignete Finanzierungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Arbeitsblätter für Bauwerksklassen (AP22 und AP23 mit Bericht D10)

Aufgrund der „Open-Source“-Charakteristik des im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Software-Prototyps können ebenso Ressourcen, die ursprünglich für das Arbeitspaket 23 vorgesehen waren, dafür eingesetzt werden, beispielhaft, an der Planungs- und Baupraxis kleinerer und mittlerer Projekte orientierte FMEA-Arbeitsblätter mit Fehlerkatalogen zu entwickeln. Dazu werden beispielhaft ein klassischer Massivbau (Mauerwerkswände und Stahlbetondecken) auf der einen und ein Holzhaus (Holzrahmenelemente und Brettstapeldecken) auf der anderen Seite ausgewählt. Die FMEA-Arbeitsblätter umfassen alle Planungs- und Ausführungsphasen von der Vorplanung bis zur Fertigstellung des Rohbaus:

1. Ermittlung des notwendigen Umfangs einer FMEA,
2. Durchführung der Fehleranalyse und Optimierungssitzung zum Tragwerksentwurf und zu wesentlichen statisch-konstruktiven Konzepten und Details,
3. Ausarbeitung eines Planungs- und ausführungsbegleitenden Kontrolle Dokuments zur Qualitätssicherung und -kontrolle,
4. Hinweise zur Kontrolle der Ausführungsplanung,
5. Hinweise zur Überwachung der Ausführung.

Darüber hinaus werden an der FMEA-Struktur orientierte Hinweise für die Wartung und Pflege der Baukonstruktion gegeben.

3. Ergebnisse und deren Marktmigration

Das erarbeitete QS-System umfasst einen Leitfaden zur Durchführung der Tragwerk-FMEA, das auf die speziellen Anforderungen des Bauwesens eingeht und manuell für einfachere Tragkonstruktionen angewandt werden kann. Weiterhin steht ein Softwareprototyp zur Verfügung, der den Ingenieur bei komplexeren Tragkonstruktionen unterstützt. Der Prototyp beruht auf zwei verschiedenen Techniken:

1. Einflussfunktionen, um Auswirkungen von Fehlern im Tragwerk zu verfolgen, und
2. qualitativen Schließen, um das Tragwerk mit seinem Berechnungsmodell infolge von Überlastungen konsistent zu schwächen.

Erst die Vereinigung dieser beiden Ansätze aus verschiedenen Forschungsbereichen erlaubt es, den FMEA-Prozess modellbasiert formal auf den Computer abzubilden und seine Korrektheit sicherzustellen, was gerade bei einer sicherheitsrelevanten Unterstützung durch den Computer wichtig für die Akzeptanz in der Praxis ist.

Als Ergebnisse stehen der Leitfaden, der dem BVPI übergeben wird, um diesen als Richtlinie zu veröffentlichen, und die erarbeiteten Methoden zu den Einflussfunktionen zur Verfügung. Diese Methodik wird den Softwarehäusern bei einem Workshop in der ersten Jahreshälfte 2011 vorgestellt. Weiterhin sind verschiedene Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften (Advanced Informatics, der Bauingenieur, Der Prüferingenieur, Computers & Structures, etc.) sowie eine Symposium mit den betroffenen Interessengruppen (BVPI, Ingenieurbüros, Bauaufsicht, etc.) geplant. Zur schnellen Verbreitung in der Praxis stehen die Arbeitsblätter für die Bauwerksklassen zur Verfügung. Alle Informationen werden über die Projektwebseite www.tragwerk-fmea.de veröffentlicht und darüber der breiten Masse der Ingenieure zugänglich gemacht.

4. Zusammenfassung

Das Projekt hat eine geschlossene Lösung zur QS in der Tragwerksplanung nach der Leistungsphase 2 und 3 der HOAI entwickelt. Das erarbeitete QS-System geht über die EN ISO 9001 sowie die generische FMEA-Methode hinaus, da es nicht nur formale Schritte und erforderliche Dokumente definiert, sondern auch tragwerksplanungsbezogene Inhalte. Das im Projekt entwickelte QS-System beruht auf zwei Säulen:

- dem Leitfaden zur „Tragwerk-FMEA“, der den Prozess der Qualitätssicherung mit seinen einzelnen Schritten in Abhängigkeit des vorhandenen Risikos (Kosequenzklasse, Honorarzone, Robustheit) definiert.
- den Methoden zur Einflussfunktion, die bei Bauwerken mit komplexem Lastabtrag erlauben, Folgen von Bauteilschwächungen bis hin zu Kollapsvorgängen abzuschätzen.

Das entwickelte QS-System ist über die bearbeiteten Bauwerksklassen hinaus skalierbar, so dass eine breite Anwendungsbasis sichergestellt ist. Der Leitfaden samt Arbeitsblättern kann sofort von Tragwerksplanern angewendet werden. Die Methode der Einflussfunktionen bedarf noch einer Implementierung durch die Softwarehäuser, da die Einflussfunktionen bisher nur prototypisch umgesetzt wurden.

Als langfristiges Forschungsziel kann die Tragwerk-FMEA um die FMEA in der Konstruktion und der Ausführung ergänzt werden. Damit ergäbe sich eine geschlossene Qualitätssicherung für die Tragwerksplanung, da die Tragwerk-FMEA nur einen ersten Schritt in die richtige Richtung darstellt.

Projektdaten

Laufzeit: Januar 2009 bis Februar 2011

Umfang: 67 Mannmonate

Partner:

Eisfeld Ingenieure AG, Kassel

Institut für Baustatik und Baudynamik, Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel

Lehrstuhl IX, Fakultät für Informatik der TU München

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel

WTM Engineers GmbH, Standort Hamburg

Werner Sobek Frankfurt GmbH & Co. KG

OCC'M GmbH

Finanzierung:

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Bundesvereinigung der Prüferingenieure für Bautechnik e.V.

Eisfeld Ingenieure AG

O'CCM GmbH

SOFiSTiK AG

Werner Sobek Frankfurt GmbH & Co. KG

WTM Engineers GmbH

Projektberichte

D1 - Zielspezifikation

D2 - Fallstudien mit Referenzbeispiel

D3 - Leitfaden „Tragwerk-FMEA“

D4 - Fallstudie zu WTM-Teilprojekt

D5 - Bauteilkatalog

D6 - Modellierung des „Tragwerk-FMEA“-Prozesses

D7a - Standsicherheitsnachweise mit Finiten Elementen

D7b – Sensitivitätsanalyse von Tragwerken

D8 - Softwarebeschreibung „Tragwerk-FMEA“-Prototyp

D9 - Nutzerevaluierung des Softwareprototypen

D10 - Arbeitsblätter für Bauwerksklassen

Diplom- und Projektarbeiten

Liening, D. (2009) Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), Diplomarbeit Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Otaibi W. (2010) FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) eines Tragwerks, Masterarbeit Universität Kassel.

Otaibi W. (2009) Sensitivitätsanalyse an ebenen und räumlichen Rahmen, Diplomarbeit Universität Kassel.

Otaibi W. und Takunov B. (2010) Überführung eines 3D- in ein 2D-Modell, Projektarbeit Universität Kassel

Takunov B. (2010) Sensitivitätsanalyse mittels Einussfunktionen, Masterarbeit Universität Kassel.

Takunov B. (2009) Sensitivitätsanalyse an dem FE-Modell eines Bürogebäudes, Diplomarbeit Universität Kassel.

Vogt T. (2009) Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien, Projektarbeit Universität Kassel.

Vogt T. (2009) Erarbeitung eines Leitfadens zur Anwendung der FMEA für Tragwerke, Masterarbeit Universität Kassel.

Weidinger N (2010) Entwicklung eines 3D-Visualisierers auf Basis von Constraint-Based Programmierung, Diplomarbeit Universität Kassel.