

Qualitätssicherung im konstruktiven Ingenieurbau

Dr.-Ing. **Michael Eisfeld** MSc, Eisfeld Ingenieure Kassel
Univ.-Prof. Dr. **Peter Struss**, TU München



Zusammenfassung

Die heutigen Planungsprozesse sind aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen stark verkürzt, iterativ und damit anfällig für Fehler. Um das Auftreten solcher Fehler und der damit verbundenen Schadensfolgen während der Ausführung und Nutzung des Bauwerks zu vermeiden, hat der Gesetzgeber die hoheitliche Prüfung und Bauüberwachung als Form der präventiven Qualitätssicherung eingeführt. Durch die immer komplexer werdenden, mit Hilfe des Computers geplanten Bauwerke, stößt die heutige Prüfmethodik an ihre Grenzen. Dieser Beitrag stellt daher eine standardisierte modellbasierte Prüfmethodik vor, die auf der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) nach DIN EN 60812 basiert. Die Methode erlaubt in einfacher Weise das Risiko infolge eines Fehlers und seiner Auftretenshäufigkeit objektiv abzuschätzen und Maßnahmen zur Risikoreduzierung einzuleiten.

1. Konstruktive Schadensursachen

Die gesellschaftlich und politisch gewollte Verkürzung von Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen führen zu verkürzten Bauprozessen. Dies hat bei immer stärker werdendem Kosten- und Termindruck wachsende Risiken für Planungs- und Ausführungsfehler im konstruktiven Ingenieurbau zur Folge, die für die steigende Zahl von Bauschäden - im schlimmsten Fall den Einsturz eines Gebäudes - verantwortlich sind. In Zeiten von Standsicherheitsnachweisen, bei denen Einzelpositionen für Bauteile vom Tragwerksplaner nachgewiesen und zu Teiltragsystemen und diese nachträglich zum Gesamttragwerk mit wohldefinierten Schnittstellen zusammengefügt wurden, konnten durch die vorherrschende Prüfmethodik, die auf der Erfahrung des einzelnen Prüfsachverständigen beruhte, grobe Fehler und damit schlimmere Folgen für die Standsicherheit ausgeschlossen werden. Dabei stellte der Prüfsachverständige die Richtigkeit der Einzelpositionen und darauf aufbauend händisch den Lastabtrag zwischen

diesen sicher. Leider weicht aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die „klassische“ statische Berechnung immer mehr dem „globalen“ Standsicherheitsnachweis, der auf einem dreidimensionalen Berechnungsmodell ohne Bauteilbezug (siehe Abbildung 1) beruht. Die Folgen sind die Aktivierung verdeckter Lastabtragsreserven, unentdeckte Modellierungsfehler und die konstruktive Nicht-Ausbildung wichtiger Verbindungsknoten zwischen in der Genehmigungsphase. All dies führt zu einer verringerten Robustheit des Tragwerks, die mit einer reduzierten Tragwerkssicherheit einhergeht und der Prüfer im einzelnen bewerten muss.

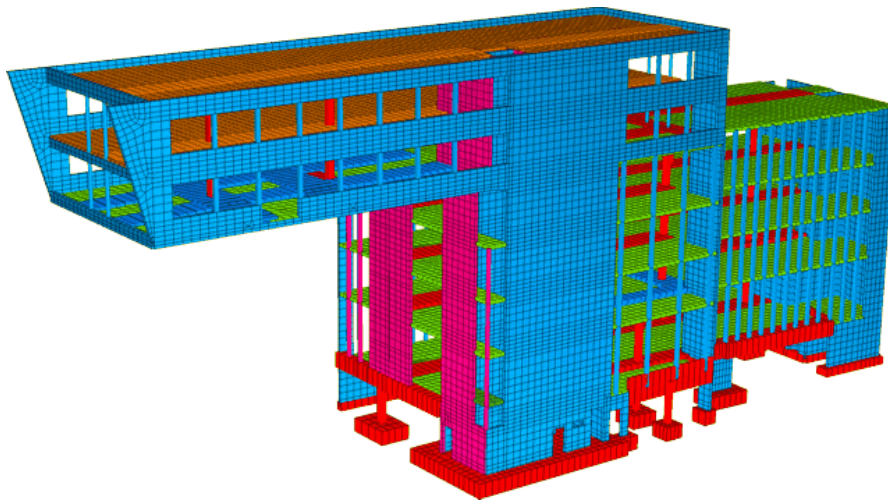


Abbildung 1: Tragwerksmodell aus Knoten und Elementen

Die einzige Methodik, die dem Prüfer heutzutage bleibt, ist durch eine Vergleichsberechnung sicherzustellen, dass für das ihm durch den Planer vorgelegte Tragwerk ein Gleichgewichtszustand existiert. Dieser kann natürlich von dem gewählten abweichen, was die vollständige Kontrolle der Bauteile und Verbindungen bei vertretbarem Aufwand nahezu unmöglich werden lässt. Nur welche Bauteile und Verbindungen bestimmen maßgeblich die Tragwerkssicherheit und Robustheit?

Die für die Robustheit und Zuverlässigkeit maßgebenden Stellen durch ein methodisches Vorgehen herauszufinden ist Sinn und Zweck der standardisierten FMEA [1]. Sie erlaubt auf der Ebene der Systemelemente, die kritischen Stellen des Tragwerks zu erkennen und Planungsfehler, die in gebauter Form Schäden verursachen, durch geeignete Maßnahmen auszuschließen, also die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens zu verringern [2]. Die FMEA ist als Methode zur präventiven Fehlervermeidung genormt und besitzt einen hohen Verbreitungsgrad in unterschiedlichen Industriebereichen, im Besonderen im Maschinenbau und der Automobilindustrie, wo sie seit Jahren erfolgreich angewendet wird [3].

2. Anwendung der System-FMEA

Die FMEA-Methode ist seit 1980 genormt und als System-FMEA (im folgenden kurz als FMEA bezeichnet) seit 1996 für die Automobilentwicklung in der VDA 4 Teil 2 als Richtlinie definiert [4]. Ziel der FMEA ist die qualitative Untersuchung von Systemelementen (SE) auf Fehlerarten (FA) und deren Auswirkungen auf das übergeordnete System als Fehlerfolgen (FF) sowie das Auffinden ihrer Fehlerursachen (FU). Es handelt sich also um eine induktive Methode, bei der durch Betrachtungen von SE auf FF übergeordneter Systeme geschlossen wird [3]. Die FMEA wird nach dem Entwurf des Systems durchgeführt, um möglichst früh Schwachstellen zu entdecken, da 80% aller Fehler, die während der späteren Lebensdauer auftreten, auf Schwachstellen in der Planung beruhen, oder Wiederholungsfehler sind. Hinzu kommt, dass je später ein Fehler entdeckt wird, desto höher die Kosten für seine Beseitigung sind (siehe Abbildung 2).

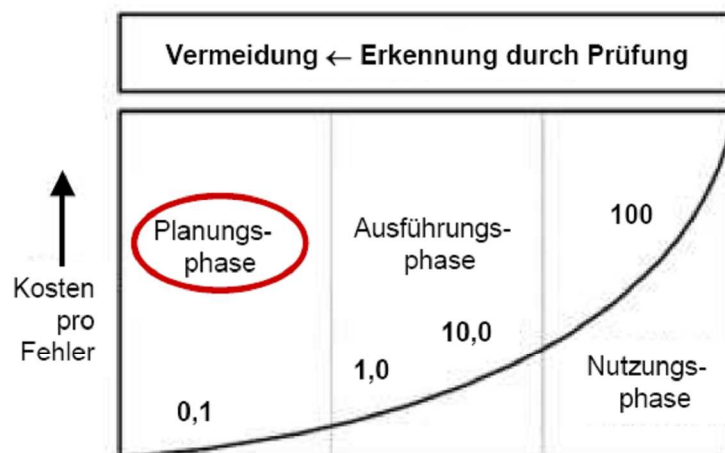


Abbildung 2: Kostenentwicklung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Fehlererkennung aus [3]
Bei der FMEA wirken verschiedene Personen mit, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Als Grundlage für die Durchführung einer FMEA sowie die Erfassung von FA dienen verschiedene Informationen, wie zum Beispiel Lastenhefte, Zeichnungen, Fehlerkataloge, Schadensstatistiken und Normen. Eine konkrete FMEA umfasst in Abhängigkeit der Zieldefinition, welche den Umfang sowie die Randbedingungen beschreibt, folgende Arbeitsschritte:

1. Strukturbeschreibung: Auflistung aller SE und deren Schnittstellen sowie deren Synthese zu Teilsystemen und dem betrachteten Gesamtsystem.
2. Funktionsanalyse: Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen den SE in Form eines Funktionsnetzes für ein- und ausgehende Zustandsgrößen und Erstellung von

Funktionsbäumen für übergeordnete Teilsysteme (Abbildung 3 verdeutlicht für ein SE die Zusammenhänge).

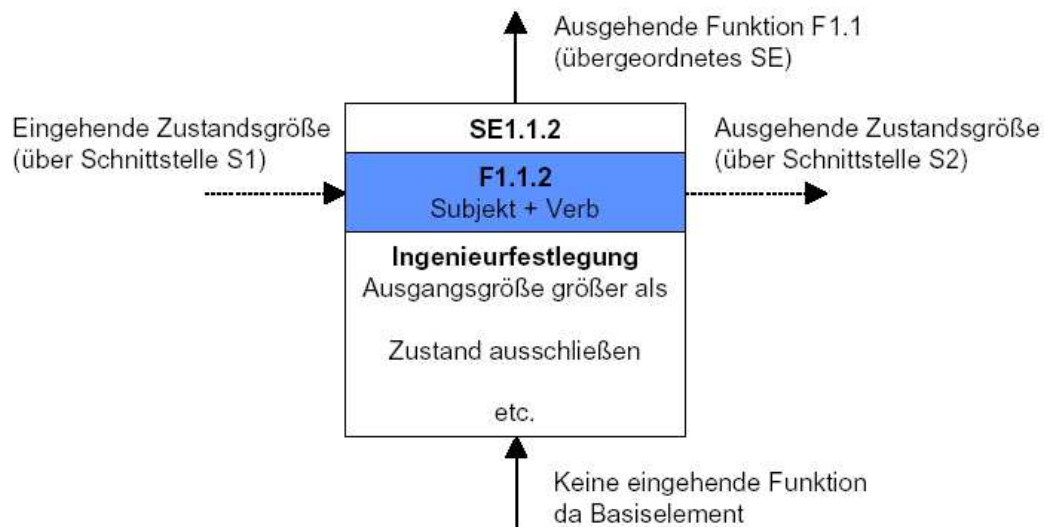


Abbildung 3: Funktionsbeschreibung für SE

3. Fehleranalyse: Bestimmung der FU – z. Bsp. Material, unzulässige Belastung, falsche Auslegung, zu geringe Kontrolle - und der FF für jede potentielle FA sowie die Auswertung der daraus resultierenden FF auf das übergeordnete Teilsystem bzw. das Gesamtsystem.
4. Risikobewertung: Berechnung des Risikos über die Risikoprioritätszahl $RPZ = B \times A \times E$ nach Bedeutung (B) der FF, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der FU und gegebener Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) der FU und FA.
5. Optimierung: Verringerung des Risikos durch mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der A oder FF, was zur Revision des Systementwurfes führen kann.

Die obigen Arbeitsschritte werden solange durchlaufen, bis eine vorher festgelegte Risikogrenze für RPZ nicht mehr überschritten wird. Das Ergebnis wird in standardisierten Formblättern erfasst, in denen Maßnahmen, Verantwortliche und erstellte Dokumentationen festgehalten werden. Dokumentationen umfassen Ziele der FMEA, Übersicht der Systemstruktur, Funktionsnetze und –bäume, Teammitglieder sowie die Bewertungskataloge für B, A und E [5].

Es existieren computergestützte Werkzeuge für diesen Prozess. Die derzeit verwendeten erfüllen im wesentlichen die Funktion von Editoren zum Erfassen der Analyseergebnisse und automatisieren lediglich deren Strukturierung. Der Prozess bleibt trotz dieser Unterstützung aufwändig und sehr zeitintensiv, da die eigentliche Analyse von Fachleuten händisch und

(zumindest in der Theorie) bei Entwurfsänderungen erneut durchzuführen ist. Die Art des Schlussfolgerns ist jedoch wiederholend, aber schwierig für Experten, da diese Abhängigkeiten zwischen FA, FU und FF auf verschiedenen Hierarchieebenen des Systems gleichzeitig berücksichtigen müssen.

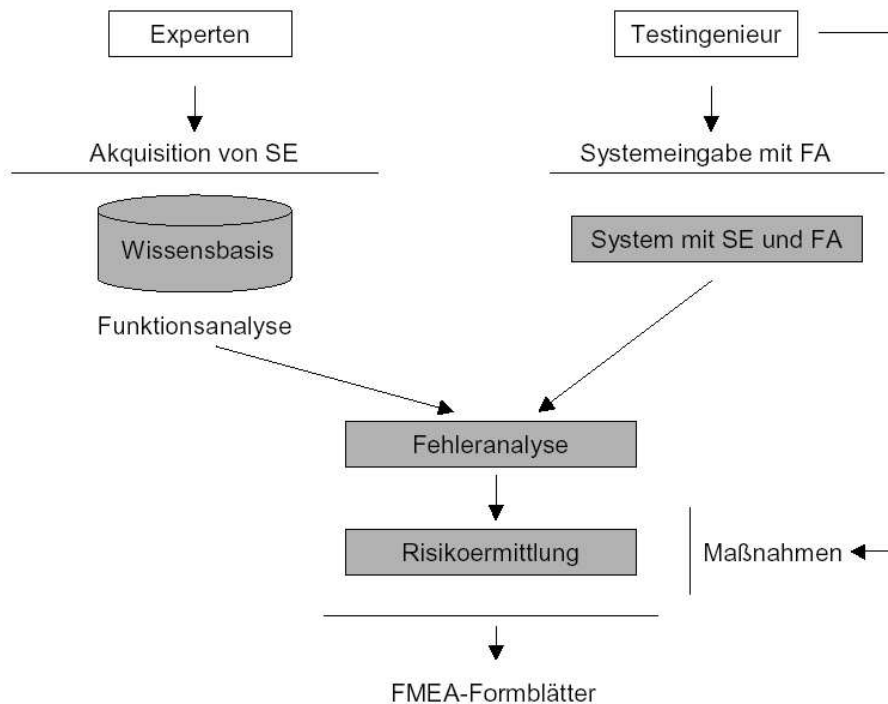


Abbildung 4: Softwarearchitektur mit Tätigkeiten

Um die Durchführung der FMEA in der Praxis für den Ersteller zu erleichtern, sind die obigen Arbeitsschritte so weit wie möglich zu automatisieren. Hierzu kann die komponentenbasierte Verhaltensmodellierung (VM) von physikalischen Systemen, wie sie seit Anfang der 80er Jahre erforscht wird, herangezogen werden [6]. Sie findet heutzutage zum Beispiel ihre Anwendung in der präventiven Qualitätssicherung in der Luftfahrtindustrie [7]. Dabei wird die VM für komplexe Systeme benutzt, um eine neue Generation von FMEA-Werkzeugen zu entwickeln, in denen auch das Ableiten von Fehlverhalten (Berechnung der FU und FF für gegebenen FA) automatisiert und somit der Aufwand für den Qualitätssicherungsprozess erheblich reduziert wird (Ausschalten von Fehlerquellen im manuellen Prozess sowie schnelle Anpassung bei Entwurfänderungen). Grundlage dieser Umsetzung bildet eine Wissensbasis, in der für die SE mit bestimmten FA die FU als „Fehlverhalten“ über Zustandsgrößen sowie FF auf höherer Ebene als abstrahierte Funktionsmerkmale abgelegt sind. Abbildung 4 verdeutlicht die Architektur des modellbasierten Softwaresystems mit den korrespondierenden Tätigkeiten, die bei einer FMEA durchgeführt werden müssen.

Der Experte baut zuerst über die Akquisitionskomponente die Wissensbasis auf, die als Grundlage zur Erstellung einer konkreten FMEA erforderlich ist. In dieser können die funktionalen Abhängigkeiten in Templateform zwischen den SE abgeleitet werden. Danach erstellt der Testingenieur die Systembeschreibung mit möglichen FA. Für die Beschreibung des Systems sowie die instanziierten Templates wird eine Fehleranalyse in Form einer Constraint-Netz-Propagierung durchgeführt. Hier werden vom System die FU sowie FF ermittelt, da die generellen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen SE und Teilsystemen bekannt sind. In der Wissensbasis sind ebenso Auftretenswahrscheinlichkeiten und Bedeutungen der Fehler abgelegt, so dass nach Festlegung von Maßnahmen durch den Testingenieur zur Entdeckung einer FF oder einer FU die Risikoprioritätszahlen vom Softwaresystem ermittelt werden. Dieser Prozess kann solange iterativ durchlaufen werden, bis festgelegte Risikogrenzen nicht mehr überschritten werden. Die Software erstellt nun automatisch die FMEA-Formblätter, welche dem Ingenieur zur Verfügung stehen. Zur umfangreicheren Beschreibung des Softwaresystems mit seinen Komponenten siehe [7].

Die Ausgestaltung des modellbasierten FMEA-Systems muss auf die Gegebenheiten im konstruktiven Ingenieurbau übertragen und angepaßt werden. Hier sind im Besonderen die Unterschiede zu nennen, dass es sich bei Bauwerken um Einzelartefakte im Vergleich zu einer in der Automobilindustrie vorherrschenden Serienfertigung handelt, die durch verschiedene Projektbeteiligte geplant, immer neu berechnet und ausgeführt werden. Die Prüfindgenieure übernehmen dabei die Rolle des Testingenieurs und des Experten, die das Wissen für eine FMEA bereitstellen und das Tragkonzept in Hinblick auf verschiedene Fehler Szenarien testen.

6. Modellbasierte Qualitätssicherung

Um die Anwendung der FMEA im konstruktiven Ingenieurbau für den Bereich der Genehmigungsplanung und die bautechnische Prüfung zu fördern, muss das oben beschriebene System sinnvoll in den heutigen Planungsablauf integriert werden. Dies kann wie folgt geschehen:

1. Die Vereinigung der Prüfindgenieure erstellt die Wissensbasis mit Hilfe der Akquisitionskomponente, da der Stand der Technik in Bezug auf die Tragwerksrobustheit abgebildet werden muss. Sie umfasst die Definitionen von Bauteilen, ihren Schnittstellen untereinander, möglichen FA (Sie können Planungs-, Ausführungs- und auch andere Fehler, die aus der Nutzung resultieren, umfassen. Hier können die bekannten Erhebungen der Bundesvereinigung und der Landesvereinigungen genutzt werden.)

sowie deren FU und FF. Bedeutungen der FF sind von diesen in Bezug auf die Standsicherheit zu definieren. Zusätzlich werden von der Vereinigung die Risikogrenzen für verschiedene Bauwerksklassen in Abhängigkeit der consequence classes nach EN 1990 festgelegt [8].

2. Der Tragwerksplaner erstellt das statische Konzept als Systembeschreibung. Dies kann entweder durch bekannte bauteilorientierte Software oder durch eine einfaches graphbasiertes Eingabetool erfolgen.
3. Für das entworfene Tragsystem legt der verantwortliche Prüfer mögliche FA für die gegebenen Randbedingungen und deren Bedeutung fest und nutzt die Wissensbasis um mit Hilfe der modellbasierten Software das ihm vorgelegte System zu testen. Hier ist zu erwähnen, dass dies ohne eine numerische Berechnung des Gesamtsystems möglich ist, da das Tragverhalten durch genährten Einflussfunktionen im Modell abgebildet werden kann, um den Einfluss von Fehlern auf bemessungsrelevante Stellen zu beurteilen [9].
4. Auf Basis des analysierten Systems kann das vorhandene Risiko automatisch für gegebene Auftretenshäufigkeiten abgeleitet werden. Der Prüfenieur kann jetzt Maßnahmen wie sinnvolle Berechnungen, gezielte Überwachungen bei der Ausführung, etc. anhand der Risikoprioritätenliste vorschlagen, so dass die Risikogrenzen für die jeweiligen Bauwerksklassen nicht überschritten werden.
5. Nach Vorlage dieser Liste hat der Tragwerksplaner seinen Standsicherheitsnachweis gegebenenfalls zu ergänzen oder geeignete Ausführungen durch seine Planung sicherzustellen.
6. Als Ergebnis dieses integrierten Planungs- und Prüfungsprozesses entstehen die standardisierten Formblätter, in denen die Qualitätssicherung für den Bauherren nachvollziehbar und „unabhängig“ von der durchgeführten elektronischen Schnittgrößenberechnung und Nachweisführung dargestellt ist.

Vorteil dieses Vorgehens ist, dass der Prüfenieur seine statische Prüfung und spätere Überwachung gezielt auf die kritischen Stellen mit hohem Einfluss auf die RPZ beschränken kann, ohne das Sicherheitsniveau zu verringern. Zusätzlich dient allen Beteiligten der dokumentierte Prozess im Falle eines Schadens zur rechtlichen Entlastung da sie nachweislich das geplante Tragwerk systematisch auf seine Robustheit überprüft haben. Der Aspekt der Nachweisbarkeit sollte im Besonderen für Tragwerksplaner bei komplexen Planungsprojekten interessant sein, da die Anwendung der FMEA als Beweismittel zur Qualitätssicherung in den Qualitätsnormen gefordert oder empfohlen wird. Abbildung 5 fasst das Vorgehen nochmals zusammen.

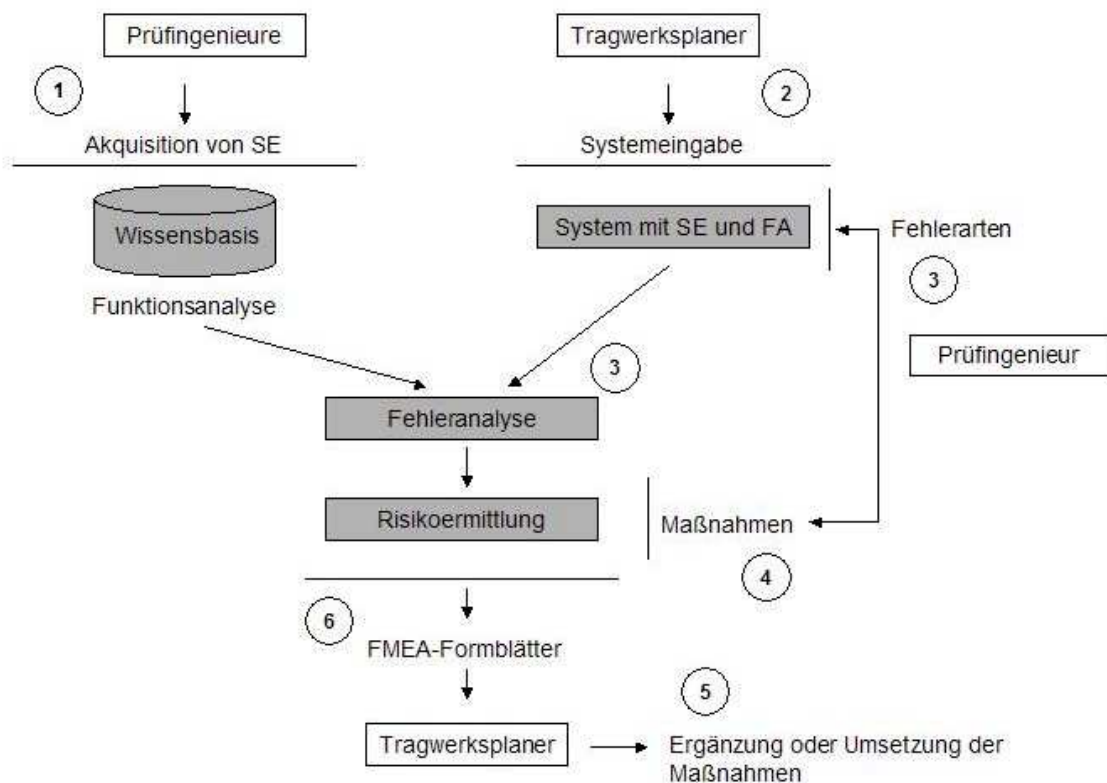


Abbildung 5: FMEA-Vorgehen im konstruktiven Ingenieurbau

7. Abschlussbemerkungen

Heutzutage bedeutet Planen immer mehr Rechnen, da in der Praxis keine Zeit zum Verstehen des Tragverhaltens und der darauf aufbauenden Konstruktion bleibt. Berechnungen und damit Planungen sind aber oft fehlerhaft, so dass bei unzureichenden Kontrollen das Sicherheitsniveau eines Bauwerks in Hinblick auf seine Standsicherheit reduziert wird. DIN 1055-100 fordert daher das Vier-Augen-Prinzip, denn die beaufschlagten Teilsicherheitsbeiwerte beziehen sich lediglich auf Material- und Lastunsicherheiten, nicht aber auf Planungsfehler und Ausführungsfehler [10].

Bisher richtet sich die Qualitätssicherung im Bauwesen hauptsächlich auf die Ausführung von Baukonstruktionen sowie auf die Güte der verbauten Materialien. Erste Ansatzpunkte für eine präventive QS in der Tragwerksplanung wurden bisher diskutiert [11], aber nicht praxisgerecht umgesetzt. So werden statische Berechnungen vor allem auf Grundlage von Erfahrung und Intuition kontrolliert, d.h. es gibt kein Maß, wie und mit welchen Schwerpunkten geprüft werden muss, und wie kritisch das Versagen einzelner Bauteile in Bezug auf die Standsicherheit des Tragwerks ist. Somit ist eine systematische proaktive Qualitätssicherung, wie sie in der Automobil- und Luftfahrtindustrie seit Jahren mit Hilfe der

standardisierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse angewandt wird, aus wirtschaftlichen Gründen für alle am Bau Beteiligten wünschenswert, aufgrund des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit, die der Staat den Bürgern garantiert, unabdingbar [12].

In einem genehmigten Forschungsprojekt [13] werden die Autoren als ersten Schritt ein computerbasiertes Qualitätssicherungssystem wie in diesem Beitrag beschrieben für die Genehmigungsplanung und bautechnische Prüfung von Tragwerken mit Hilfe der System-FMEA und der bauteilorientierten Verhaltensmodellierung entwickeln. Es wird insbesondere um die schnelle und bauteilbezogene Identifikation kritischer Bereiche von Tragwerken, die in der Praxis meistens mit der Finiten-Elemente-Methode berechnet werden, sowie um die klare Definition von Prüfprioritäten mit Hilfe der RPZ gehen. Da zum Thema modellbasierte FMEA erste Erfahrungen ausschließlich im Bereich der Luftfahrtindustrie gewonnen wurden (siehe [7]), hoffen die Autoren in diesem Projekt ein sinnvolles Werkzeug für die konstruktive Ingenieurspraxis zu entwickeln.

Referenzen

- [1] DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth Verlag, 2006.
- [2] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Teubner 1996.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Qualität: FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, DGQ-Band 13-11, 3. Auflage, Beuth Verlag, 2004.
- [4] Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, Teil 2 – System-FMEA, Verband der Automobilindustrie e.V., Henrich Druck+Medien, 1996.
- [5] Bertsche, B. u. Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, Springer Verlag, 2004.
- [6] Struss, P.: Modellbasierte Systeme und Qualitative Modellierung. In: Goerz, G. , Rollinger, C. , Schneeberger, J. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2000.

- [7] C. Picardi, L. Console, F. Berger, J. Breeman, T. Kanakis, J. Moelands, S. Collas, E. Arbaretier, N. De Domenico, E. Girardelli, O. Dressler, P. Struss, B. Zilbermann: AUTAS: a tool for supporting FMECA generation in aeronautic systems. In: Proceeding of the 16th European Conference on Artificial Intelligence 2004 in Valencia, Spain, pp. 750-754.

- [8] EN 1990, Deutsche Version DIN EN 1990: Basic of structural design, Oktober 2002.

- [9] Hartmann, F., Katz, C.: Structural Analysis with Finite Elements, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2007.

- [10] DIN 1055-100, Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, März 2001.

- [11] Andrä, H.-P.: FMEA im Bauwesen als zeitgemäße Form der bautechnischen Prüfung zur Kosten-Nutzen-Optimierung. Beitrag zum Lindauer Bauseminar 2007.

- [12] Andrä, H.-P.: Der Prüfenieur in Deutschland – ein Modell für die Europäische Union. In Fachzeitschrift: Der Prüfenieur (2004), Nr. 25, S. 4-5.

- [13] Tragwerk-FMEA, unveröffentlichter Antrag zur Forschungsinitiative „Zukunft Bau“, Juni 2007.