

Masterarbeit

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) eines Tragwerks

Walid Kh. A. Al Otaibi

Matr.-Nr.24215774

E-Mail: alotaibi@student.uni-kassel.de

23. September 2010

Prüfer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friedel Hartmann

Zweitprüfer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. 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 23. September 2010

Walid Kh. A. Al Otaibi

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung der Arbeit	2
1.2	Gliederung	2
2	Das Bürogebäude X	5
2.1	Kritische Stellen des Bürogebäudes X	7
3	Tragwerk-FMEA	15
3.1	Umfang der Tragwerk-FMEA am Bürogebäude	16
3.1.1	Gefährdungsklasse	17
3.2	Risikobewertung (B x A x E) auf Traggliederebene	19
3.3	Robustheitsklassen	23
4	Die Sensitivitätsanalyse	25
4.1	Theoretische Grundlagen	25
4.1.1	Der Satz von Betti	25
4.1.2	Die Einflussfunktionen	28
4.1.3	Die Finite-Elemente-Methode	31
4.2	Der Einsatz der Sensitivitätsanalyse an einem Tragwerk	36
4.2.1	Herleitung der Formel	37
4.2.2	Vorgehensweise bei der Sensitivitätsanalyse	41

5	Tragwerksanalyse am Beispiel Bürohaus	43
5.1	Vorgehensweise der Analyse	43
5.2	Durchführung der Sensitivitätsanalyse	45
5.2.1	Erstes Szenario	45
5.2.2	Zweites Szenario	51
5.2.3	Drittes Szenario	59
5.2.4	Viertes Szenario	62
6	Maßnahmen zur Risikoreduzierung	65
6.1	Korrektive Maßnahmen	67
6.2	Präventive Maßnahmen	69
7	Zusammenfassung	71
8	Ausblick	73
	Abbildungsverzeichnis	75
	Literaturverzeichnis	77

1 Einleitung

Die computerorientierten Rechnungsverfahren werden zurzeit häufig eingesetzt. Sie stellt eine Entwicklung in der statischen Berechnung dar. Die klassische statische Berechnung basiert auf 2D-Teilsystemen aus dem gesamten System, wobei die modernen Verfahren das 3D-Modell als Einheit in einem EDV-Programm rechnen. Diese Entwicklung der Rechnungsmethode führt zu Problemen in der Prüfung der vorliegenden statischen Rechnungen, da der Output der EDV-Programme enorm und komplex ist. Die Auswirkung eines Fehlers in der Berechnung kann variieren: Sie hängt von den einzelnen Tragelementen, Anschlüssen, Systemreserven und dem globalen Lastfluss ab. Je mehr Systemreserven vorhanden sind, desto besser ist die Robustheit des Tragwerks. Um die Qualität eines Tragwerks zu beurteilen, müssen aus diesen Gründen qualitative Aussagen bezüglich der Standsicherheit und Robustheit des Tragwerks gegeben werden.

Die Problematik der Qualitätssicherung hat in anderen Ingenieurbereichen ‚Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)‘ ins Leben gerufen, um Fehler in der Produktion zu vermeiden bzw. Maßnahmen zur Risikoreduzierung zu bestimmen. Hier stellt sich die Frage: in wie fern kann die FMEA im Bauwesen eingesetzt werden, unter Betrachtung dass im Bauwesen alle Tragwerke Unikate sind? Das Forschungsvorhaben ‚Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse‘ hat Vorschläge bezüglich der Durchführung einer FMEA im Bauwesen gemacht. Diese Vorschläge und Konzepte können in [Vog09b], [del09] und [del10] gefunden werden.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens (kurz bezeichnet als Tragwerk-FMEA) werden mögliche Fehler in Tragwerken frühzeitig lokalisiert, und ihre Einwirkungen auf das gesamte System werden bestimmt. Die Auswirkungen der Fehler sind mit der Sensitivitätsanalyse zu bestimmen. Die Sensitivitätsanalyse beschreibt, wie sich ein Tragwerk durch planmäßige bzw. unplanmäßige (Fehler) Änderungen beeinflussen lässt. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist in erster Linie die Analyse der Auswirkungen möglicher Fehler in einem Tragwerk auf weitere Tragelemente. Es wird dann angenommen, dass die hoch beanspruchten Stellen infolge des Fehlers ausfallen und die Auswirkung dieses Ausfalls werden ermittelt. Konkret werden dabei die möglichen Ausfallszenarien eines Tragwerks bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wird die Sensitivitätsanalyse an einem konkreten Beispiel eingesetzt, und die möglichen Ausfallszenarien dieses Gebäudes werden ermittelt. Die Methode der Sensitivitätsanalyse, die in dieser Arbeit benutzt wird, liefert genäherte Ergebnisse, diese Ergebnisse werden dann mit den exakten verglichen und die Abweichungen werden konkret beurteilt. Die aus dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse sollen der weiteren Entwicklung der FMEA im Bauwesen dienen. Darüber hinaus könnte die Methode der Sensitivitätsanalyse in der Tragwerksplanung und Prüfung von Systemen eingesetzt werden.

1.2 Gliederung

Im Kapitel 2 wird das Bürogebäude X beschrieben, es ist notwendig, die Konstruktion und den Lastabtrag zu verstehen, da in den weiteren Kapiteln dieses Gebäudes als Beispiel für die Berechnung angenommen wird.

Das 3. Kapitel befasst sich mit der Tragwerk-FMEA. Es wird die Klassifizierung der Tragwerke behandelt, und den Umfang der durchzuführenden FMEA wird anhand dieser Klassifizierung bestimmt. Im Anschluss daran werden die Risiken behandelt, es wird eine Methode angegeben werden, mit der man die Risiken bewerten

kann, und Beispiel Risiken am Bürogebäude X werden ermittelt. Danach wird die Robustheit des Gebäudes beurteilt.

Im Kapitel 4 wird die Sensitivitätsanalyse behandelt. In diesem Abschnitt werden einige theoretischen Grundlagen der Statik, die für die Sensitivitätsanalyse eine Rolle spielen gefasst. Darüber hinaus wird die Herleitung der benutzten Formel vorgestellt, und die Vorgehensweise bei der folgenden Berechnungen wird an dieser Stelle präsentiert.

Das 5. Kapitel stellt die Rechenbeispiele dar, Dabei werden die äquivalenten Knotenkräfte, die Überlagerungen und die Eingesetzten Einflussfunktionen behandelt. Weiterhin werden die Abweichungen zwischen gerechneten und exakten Werten beurteilt. Dadurch soll deutlich gemacht werden, in welchen Grenzen die Abweichungen liegen dürfen.

Im Kapitel 6 werden die zu ergreifenden Maßnahmen zu Risikovermeidung behandelt. Die Maßnahmen sich entweder präventiv oder korrektiv, die Unterschiede zwischen beiden Maßnahmen wird deutlich gemacht, und in welchen Leistungsphasen die Maßnahmen durchzuführen sind, wird auch erörtert.

Abschließend wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick der vorgelegten Arbeit dargestellt.

2 Das Bürogebäude X

Das Bürogebäude ist aus vier Geschossen und ist in Stahlbeton- bzw. Stahlverbundbauweise herzustellen. Im Grund Riss hat es die Abmessungen $16\text{ m} \times 14\text{ m}$. Jedes Geschoss ist 3 m hoch, somit hat das Gebäude eine Gesamthöhe von 12 m . Die Erd- und Dachgeschosse haben einen dreieck förmigen Grundriss, und die Grundrisse des 1. und 2.OG sind rechteckig. Der Grundriss des EG und DG ist genau die Hälfte des Grundrisses des 1. und 2.OG, somit kragen die 1. und 2.OG zur Hälfte aus, und es folgt keine Abstützung in diesem Bereich.

Die Decken sind aus Beton C30/37 mit BSt500 bewehrt. Die Dicke der Decken beträgt 30 cm . Die ausgekragten Teile des 1. und 2.OG sind als Cobiaxdecken ausgeführt. Die Stützen und Unterzüge sind aus Beton C40/50 mit S235 bewehrt. Die Wände haben eine Dicke von 30 cm und sind aus Beton C30/37. Die Hauptstütze, die in der Mitte der 1.OG-Grundrisse liegt, hat die Abmessungen $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$. Als wesentliche Tragelemente in diesem Gebäude sind die

- Decken,
- Fachwerk,
- Virendeelträger,
- Unterzüge,
- und Stützen.

Die Aussteifung des Gebäudes wird durch die Außen- und Innenwände gegeben, die überwiegend im Bereich des Treppenhauses liegen. Das Fachwerk im Dachgeschoß ist auch daran beteiligt, und die Decken verteilen die Lasten auf die einzelnen Aussteifungselemente.

Die Vertikale Lasten aus Eigengewicht, Schnee und Verkehr werden über die Wände und Stützen in die Fundamente weitergeleitet. Die Lasten in der Auskragung werden von einem Virendeelträger aufgenommen, der an beiden Seiten auf eine Wand aufliegt. In der Mitte ist der Virendeelträger auf das Fachwerk aufgehängt, das die Lasten in die Hauptstütze und zwei Wänden weiterleitet. Das Fachwerk trägt die Belastungen als Normalkraft ab, und die Virendeelträger trägt die Lasten überwiegend als Biegung ab (Vgl. [AO10, S.3]).

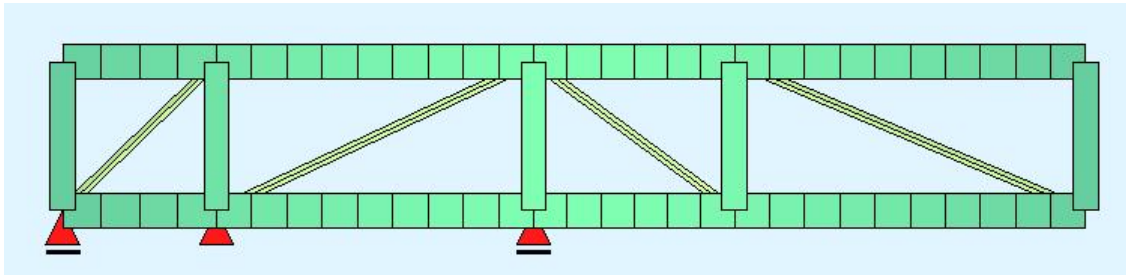


Abbildung 2.1: 2D-Modell des Fachwerks.

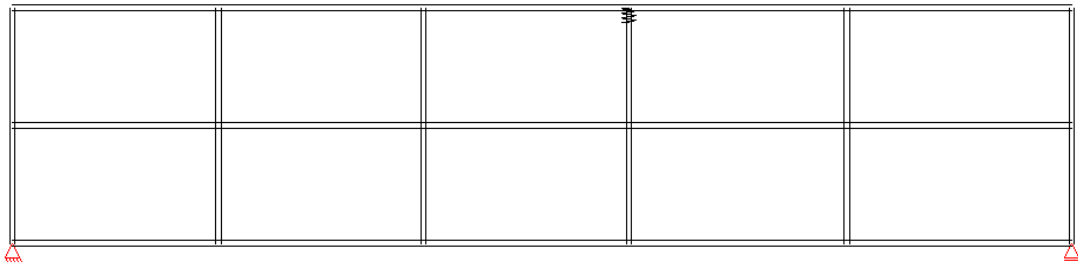


Abbildung 2.2: das Virendeelträger auf eine Ebene dargestellt.

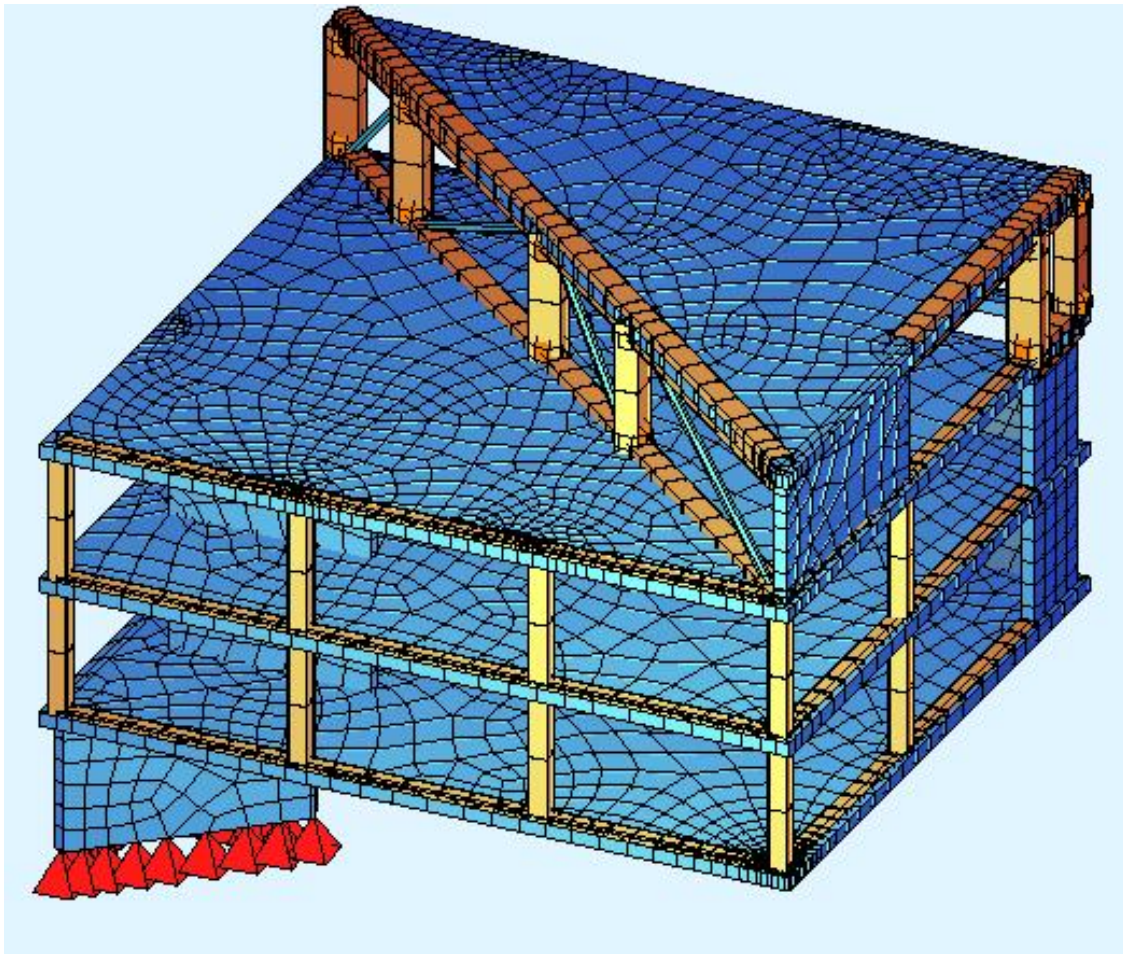


Abbildung 2.3: FEM-Modell des Bürogebäudes.

2.1 Kritische Stellen des Bürogebäudes X

Aus der Beschreibung des Gebäudes kann entnommen werden, dass der Lastabtrag der Auskragung des 1. und 2.OG eine wichtige Rolle in den Gesamtlastfluss spielt. Die Tragelemente sind kritische Stellen für die Standsicherheit des Gebäudes. In diesem Abschnitt werden die kritischen Bauteile und ihre möglichen Fehlerarten zusammengefasst.

Die Hauptstütze verläuft durch das gesamte Gebäude, und das Fachwerk ist darauf gelagert. Die Versagensarten der Hauptstütze sind:

- Verformung,
- Ausfallen,

- Gurte,
- Anschlüsse im Fachwerk,
- Anschlüsse Fachwerk-Wand,
- Anschluss Fachwerk-Vierendeelträger.

Aus dem Diagramm auf Abbildung (2.4) kann entnommen werden, dass das Versagen einer dieser Tragelemente eine Wirkung auf die restlichen Tragelemente hat. Die Durchführung einer Tragwerk-FMEA ist aus diesem Grund sinnvoll. Im Kapitel 3 wird die Tragwerk-FMEA für das Bürogebäude X durchgeführt. Die Auswirkungen, die ein Versagen eines Tragelementes verursachen können, werden mittels der Sensitivitätsanalyse im Kapitel 5 behandelt.

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) (W3.4, W2.4)
	W1.5		
	W1.6		
	W2.6		
	W3.1		
	W3.2	Vierendeelrahmen V2	
	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 2.6: Positionsplan 2/2 [Vog09a].

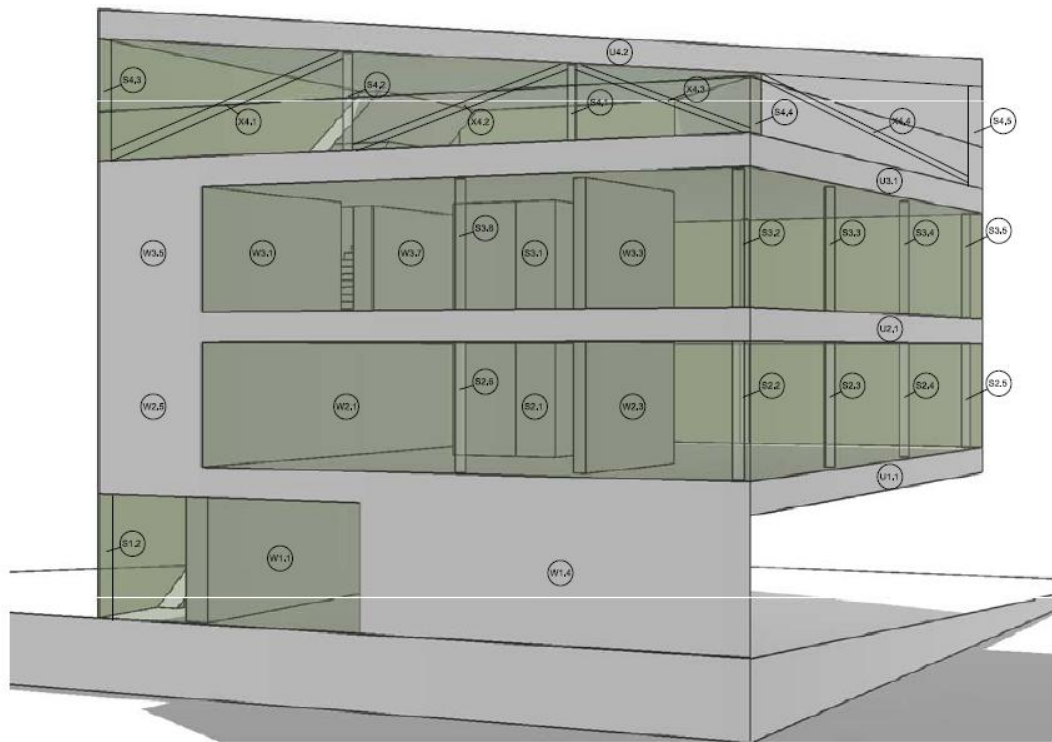


Abbildung 2.7: Bürogebäude X: Ansicht ,1' mit Positionen [Vog09a].

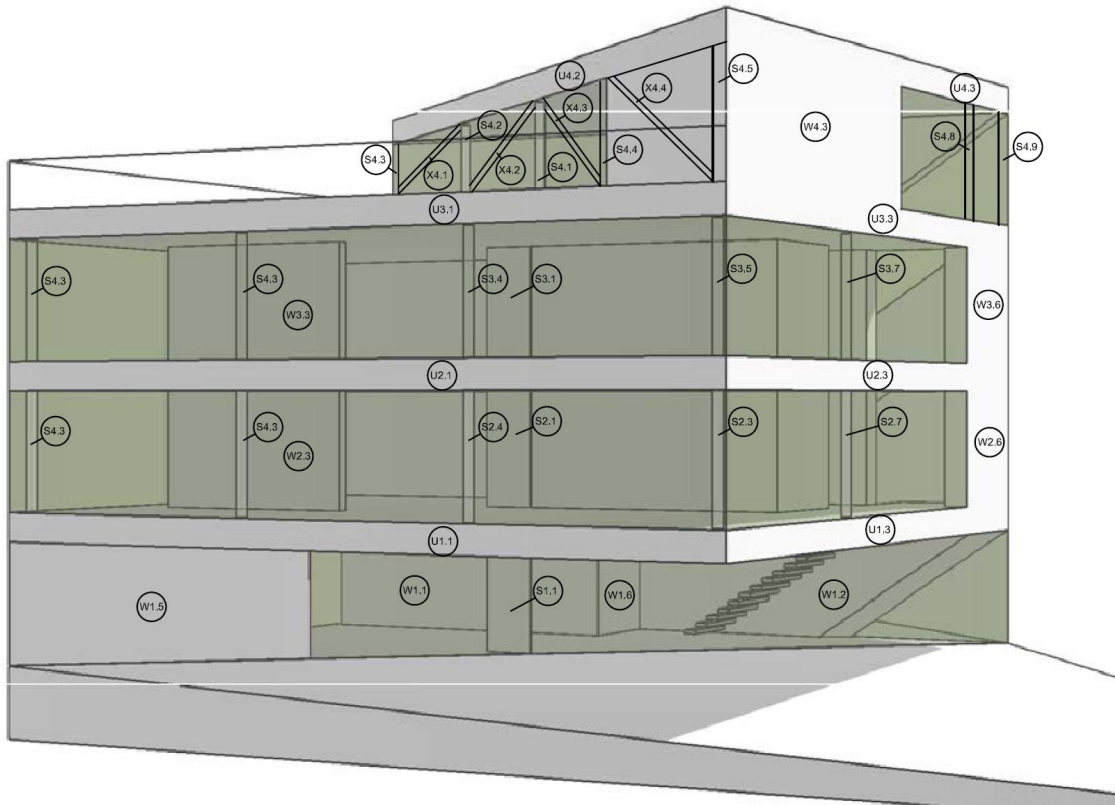


Abbildung 2.8: Bürogebäude X: Ansicht ‚4‘ mit Positionen [Vog09a].

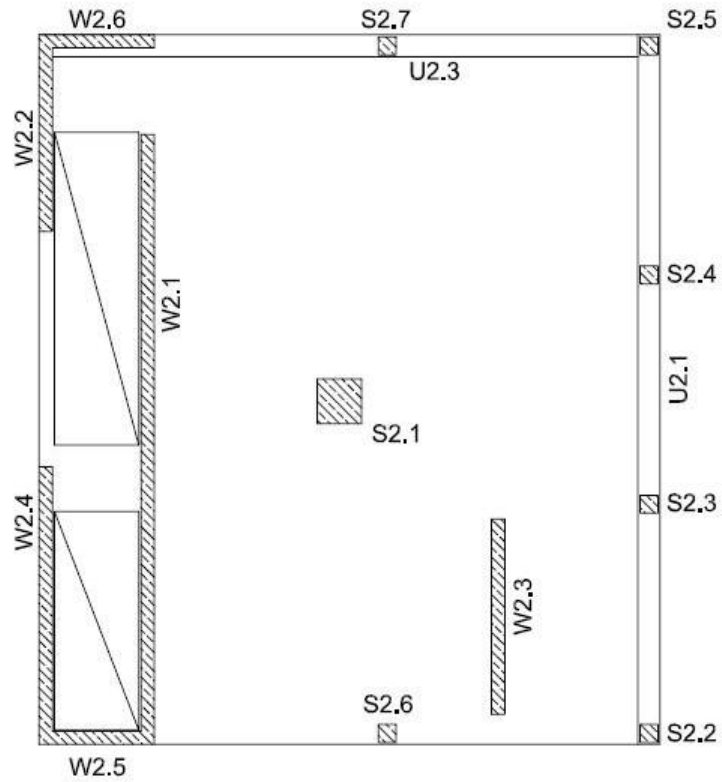


Abbildung 2.9: Bürogebäude X: Grundriss 1. OG [Lie09]

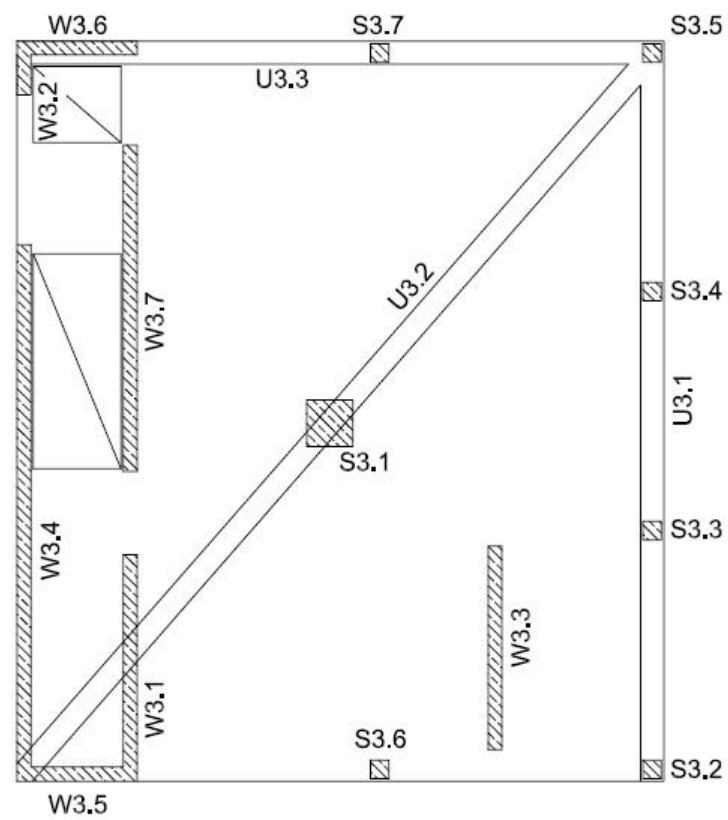


Abbildung 2.10: Bürogebäude X: Grundriss 2. OG [Lie09]

3 Tragwerk-FMEA

Die Tragwerk-FMEA wird nach den vor- und Entwurfsplanung (HOAI-Leistungsphasen 2 und 3) durchgeführt. Sie dient zur Erkennung kritischer Bauteile im Tragwerk. Der Sinn der Tragwerk-FMEA ist, mögliche Fehler in der statischen Berechnung frühzeitig zu erkennen, und sie mit wenig Aufwand und Arbeitszeit zu entfernen.

Für die Durchführung einer Tragwerk-FMEA sind folgende Schritte abzuarbeiten [del09, S.7],

1. Festlegen des erforderlichen Umfangs der Tragwerk-FMEA anhand der vorhandenen Konsequenzklasse und Honorarzone,
2. Durchführung der Tragwerk-FMEA zur qualitativen Bestimmung des globalen Risikos in Abhängigkeit von vorhandenen Risiken ($B \times A \times E$) auf Traggliederebene,
3. Einstufung in eine erforderliche Robustheitsklasse (RK) in Abhängigkeit des vorhandenen Risikos,
4. Festlegen von Maßnahmen (M) zur Risikoreduzierung, die entweder korrektiv zur Änderung am Tragkonzept (Revisionsplan) oder präventiv zur Fehlervermeidung (Maßnahmenplan) im weiteren Prozessablauf benutzt werden,
5. Beginn bei Schritt 2 bei Revision des Tragkonzeptes,

6. Weiterführung in abfolgenden Planungsphasen soweit Tragkonzept oder Maßnahmen geändert werden.

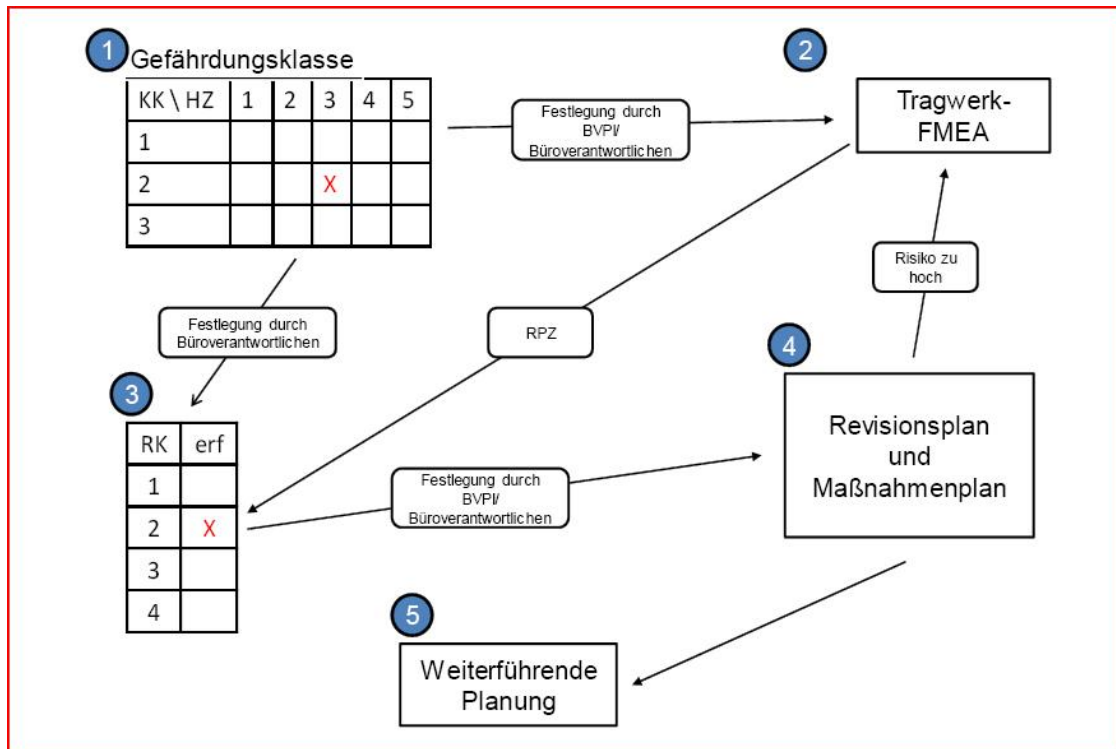


Abbildung 3.1: Grundsätzliches vorgehen bei der Tragwerk-FMEA aus [del09, S.7].

3.1 Umfang der Tragwerk-FMEA am Bürogebäude

Eine ausreichende und wirtschaftliche FMEA hat nicht den selben Umfang für alle Bauwerke, da Bauwerke sich in vielen Aspekten variieren. Aus diesem Grund muss zuerst der Umfang der FMEA festgelegt werden. Der Umfang der FMEA ist von der Gefährdungsklasse (GK) und Gebäudenklasse abhängig. Die Gefährdungsklasse kann anhand der Honorarzonon (HZ) nach HOAI [HOA09, § 5], Konsequenzklassen (CC) nach Eurocode 0 [EUR02] (eine weitere Einteilung der Concequence Classes ist in der VDI-Richtlinie 6200 vorgestellt) und Gebäudenklassen nach der MBO [MBO, § 2 (3)] bestimmt werden.

3.1.1 Gefährdungsklasse

Nach Dressel [Dre09, S.219] werden Bauwerke in Gefährdungsklassen unterteilt. Die Unterteilung ist von Consequence Classes und Honorarzonon abhängig. Im [Dre09] werden die Consequence Classes der Eurocode 0 verwendet. Die verschiedenen Ge-

Schadens- folgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Abbildung 3.2: Consequence Classes nach [EUR02]

fährdungsklassen sind

Gefährdungsklasse 3: Bauwerke mit hohem Gefährdungspotential

Bauwerke der Klasse *CC3*, Sonderbauten im Sinne der MBO, Tragkonstruktionen sehr hohen und hohen Schwierigkeitsgrades (HZ V und IV der HOAI)

Gefährdungsklasse 2: Bauwerke mit mittlerem Gefährdungspotential

Bauwerke der Klasse *CC2*, Gebäude mit einer Evakuierungshöhe von mehr als 7m (Gebäudeklassen 4 und 5 der MBO), Tragkonstruktionen durchschnittlichen Schwierigkeitsgrades (HZ III der HOAI)

Gefährdungsklasse 1: Bauwerke mit geringem Gefährdungspotential

Alle Bauwerke, die nicht in die Gefährdungsklassen 3 und 2 einzustufen sind.

		Honorarzonen / Schwierigkeitsklassen				
		HZ I	HZ II	HZ III	HZ IV	HZ V
consequence Classes	CC 1	1	1	2	3	3
	CC 2	2	2	2	3	3
	CC 3	3	3	3	3	3
		Gebäudenklassen 4 und 5 → GK 2 Sonderbauten nach MBO → GK 3				

Abbildung 3.3: Gefährdungsklassen nach Dressel. ¹

Gefährdungsklasse des Bürogebäudes X

Im Kapitel 2 wurde die Struktur des Bürogebäudes und seinen Lastsabtrag beschrieben. Daraus folgt, dass die Einstufung des Bürogebäudes in die Honorarzone III angemessen ist (HZ III → durchschnittliche Planungsanforderungen). In Abbildung (3.2) sind die verschiedenen Consequence Classes dargestellt. Das Bürogebäude wird in Anlehnung an Abbildung (3.2) in die CC2 eingeteilt. Es folgt nach Abbildung (3.3), dass das Gebäude in die GK 2 eingestuft wird.

Umfang der durchzuführenden Tragwerk-FMEA

Die Gefährdungsklasse gibt an, wie gefährdet ein Bauwerk ist, in Abhängigkeit von dem Schwierigkeitsgrad und den Schadensfolgen. Es bedeutet, dass je höher die Gefährdungsklasse ist, desto genauer muss die Betrachtung eines Tragwerks sein. Die Gefährdungsklasse liefert aber keine weiteren Informationen über das Verhalten des Gebäudes. Die Robustheitsklasse beschreibt das Verhalten eines Tragwerks auf lokale Schwächungen oder Bauteilversagen. Um die Robustheitsklasse eines Tragwerks zu bestimmen, muss zuerst die Tragwerk-FMEA durchgeführt werden, um die Bedeutungen und Einwirkungen von verschiedenen Schwächungen bzw. Fehlern auf das Tragwerk zu bestimmen. Für das Beispiel (Bürohaus X) wird vorgeschla-

¹Eigene Darstellung in Anlehnung auf [Dre09, S.219]

gen, eine Tragwerk-FMEA mit mittlerem Umfang durchzuführen. In Anlehnung an [Vog09b], [Vog09a] und [del09] hat die durchzuführende Tragwerk-FMEA folgende Merkmale

- Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung,
- Darstellen des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragbauteile,
- Gemeinsames Auffindden von kritischen Bauteilen und möglichen Nachwirkungen von Fehlern,
- Risikobewertung mit Hilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ),
- Dokumentation der Ergebnisse in Formblätter.

3.2 Risikobewertung (B x A x E) auf Traggliederebene

Im Kapitel 2 wurde das statische Konzept des Bürohauses X beschrieben, und die kritischen Stellen wurden auch genannt. Im Rahmen einer Tragwerk-FMEA werden die Nachwirkungen von Fehlern und ihre Bedeutung nach dem Auffinden der kritischen Bauteile diskutiert und dokumentiert. Das erlaubt eine gute und übersichtliche Bewertung der möglichen Risiken. Die Risikobewertung wird anhand der Risikoprioritätszahl beurteilt.

$$RPZ = B \times A \times E \tag{3.1}$$

Die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache werden jeweils mit Zahlenwerten zwischen 1 und 5 bewertet. Aus dieser Überlegung werden Risiken nach RPZ geordnet. Die RPZ-werte liegen zwischen ,1'

(kein Risiko) und ,125' (sehr hohes Risiko). Die Bewertung der einzelnen Risiken wird im Formblatt (3.4) nach [DIN06] dokumentiert. Hier ist es zu erwähnen, dass für eine Versagensart nur die größte Zahl der Bedeutung der Fehlerfolgen in die RPZ miteinbezogen wird.

Fehlerkategorien

Nach [Vog09b] können Fehlerursachen in 5 Kategorien unterteilt werden

Konzeptionelle Fehler z.B. versteckte Kinematiken im Tragkonzept

Fehler in Ermittlung der Einwirkungen z.B. falsch ermittelte Lasten

Fehler in Modellierung

Fehler in Berechnung und Bemessung z.B. falsche Schnittgrößenermittlung

Fehler im Details

Beispiele der Risiken und ihrer Folgen

Im Rahmen dieser Arbeit wird keine vollständige Tragwerk-FMEA für das Bürogebäude X durchgeführt, da die Tragwerk-FMEA für das Gebäude bei Eisfeld Ingenieure und WTM Engineers Hamburg schon durchgeführt ist. Die Ergebnisse der beiden Sitzungen sind im [Vog09a] und [del10] zu finden.

Beispiel 1: Ausfall Hauptstütze auf Fachwerk

Im Kapitel 2 wurde bereits erwähnt, dass die Hauptstütze die Lasten aus den Decken und aus dem Fachwerk auf die Fundamente weiterleitet. Beim Versagen der Hauptstütze werden die Lasten aus den Decken auf benachbarten Bauteile umgelagert, was eine mittlere Bedeutung hat (3). Die Hauptstütze ist eine der Auflager des Fachwerks, das statisch bestimmt gelagert ist. Wenn die Hauptstütze versagt, versagt das komplette Fachwerk sowie der Virendeelträger, der vom Fachwerk gehalten wird. Dieser mögliche Fehler hat eine sehr hohe Bedeutung (5).

Wie schon im Kapitel 2 beschrieben ist, hat die Stütze die Abmessungen $100\text{cm} \times 100\text{cm}$, d.h. dass ein Ausfallen der Hauptstütze nicht besonders wahrscheinlich ist ($A = 1$). Da die Stütze ein Haupttragelement für die Tragkonstruktion ist, wird sie sorgfältig bemessen, was die Entdeckung von Fehlern vereinfacht ($E = 1$).

$$RPZ = 5 * 1 * 1 = 5 \quad (3.2)$$

Beispiel 2: Ausfall Stütze im Virendeelträger Der Virendeelträger spielt eine große Rolle in der Auskragung des Gebäudes. Er wird von Lasten aus 3 Decken belastet, und leitet sie an das Fachwerk und die 2 Wände weiter. Das Ausfallen einer Stütze im Virendeelträger hat zur Folge, dass die Schnittgrößen im Virendeelträger sich umlagern, und der Riegel stärker beansprucht wird. Das kann zu komplettem Versagen des Virendeelträgers führen ($B = 4$). Wie im Beispiel 1 wird solch ein wichtiges Tragelement sorgfältig bemessen und dokumentiert ($A = E = 1$).

$$RPZ = 4 * 1 * 1 = 4 \quad (3.3)$$

Beispiel 3: Fachwerkverformung auf Virendeelträger Große Verformungen im Fachwerk können zu reduzierten Steifigkeiten führen, was eine große Verformung im Virendeelträger zur Folge hat ($B = 4$). Die Fehlerursache kann eine fehlerhafte Bemessung, Lastermittlung oder auch Schnittgrößenermittlung sein. Die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache ist in diesem Fall ($A = 2$). Die Entdeckungswahrscheinlichkeit wird in diesem Beispiel mit ($E = 3$) geschätzt.

$$RPZ = 4 * 2 * 3 = 24 \quad (3.4)$$

		Bewertung der Fehler: - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) - Bedeutung der Fehlerfolge (B) - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)							
Bauteil / Anschluss	Funktion	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungs- maßnahmen	A	Entdeckungs- maßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin

Abbildung 3.4: Formblatt zur Fehlerbewertung nach [DIN06].

3.3 Robustheitsklassen

Die Robustheit eines Systems beschreibt seine Fähigkeit seiner Funktion bei einer unvorhergesehenen oder außergewöhnlichen Bedingung rechtzuhalten. Die Robustheit eines Systems liefert Aussagen über das Verhalten des Systems bei lokalen Schwächungen oder Teilsystemversagen. In der VDI-Richtlinie 6200 sind 4 Robustheitsklassen (Abbildung (3.4)) vorgeschlagen worden.

Robustheitsklasse	Bauwerk/Nutzung	Beispielhafte Tragwerke
RC 1	statisch bestimmte Tragwerke ohne Systemreserven Fertigteilkonstruktionen ohne nachträgliche redundante Verbindungen imperfektionsempfindliche Systeme Tragwerke mit spröde-elastischem und sprödem Verformungsverhalten	Einfeldträger stützenstabilisierte Hallentragwerke ohne Kopplungen schlanke Schalentragwerke Tragwerke aus Glas Tragwerke mit Gussbauteilen
RC 2	statisch unbestimmte Konstruktionen mit Systemreserven elastisch-plastisches Tragverhalten	Durchlaufträger eingeschossige Rahmenkonstruktionen Stahlkonstruktionen
RC 3	Konstruktionen mit großer Systemredundanz Tragwerksverhalten und/oder Konstruktionen mit großen plastischen Systemreserven fehlerunempfindliche Systeme	mehrgeschossige Rahmenkonstruktionen vielfach statisch unbestimmte Systeme seilverspannte Konstruktionen überschüttete Bogentragwerke
RC 4	Tragwerke, bei denen alternativ berücksichtigte Gefährdungsszenarien und Versagensanalysen ausreichende Robustheit zeigen	Bemessung für Stützensausfall, Bemessung auf Lastfall Flugzeugabsturz

Abbildung 3.5: Robustheitsklassen für Bauwerke nach [E.V08]

Robustheitsklasse des Bürogebäudes X

Das Bürogebäude besteht aus mehreren Teilsystemen, die zum größten Teil statisch unbestimmt sind. Das Ausfallen der Hauptstütze hat die Auswirkung, dass die Lasten aus der Decken auf benachbarten Bauteile umgelagert werden, was bedeutet, dass die Standsicherheit immer noch vorhanden ist. Die kritischsten Tragelemente sind in diesem Fall das Fachwerk (statisch bestimmt) und der Virendeelträger. Das Ausfallen eines Tragglieds im Fachwerk führt zum kompletten Versagen im Fachwerk, und dann zu riesigen Verformungen im Virendeelträger. Die Verformungen sind so groß, dass die Glasscheiben rausfliegen werden. Aus dieser Betrachtung der

kritischen Stellen im Bürogebäude X wird das Gebäude in die Robustheitsklasse (RC 2) eingestuft.

Eine systematische Vorgehensweise der Tragwerk-FMEA ist im [Vog09b] vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die einzelnen Risiken und Ausfallszenarien des Bürogebäudes X mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse bearbeitet. Die Sensitivitätsanalyse gibt Informationen über das gesamte Verhalten des Tragwerks und die Kräfteumlagerungen bei lokalen Schwächungen.

4 Die Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse mittels ‚Bauteileinflussfunktionen‘ ermöglicht eine Tragwerk-FMEA. Die Sensitivitätsanalyse vereinfacht die Vorhersehbarkeit eines Ausfallszenariums und bestimmt die kritischen Pfade. In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Sensitivitätsanalyse und ihren Einsatz auf einem Tragwerk behandelt.

4.1 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Sensitivitätsanalyse bereitgestellt. Als erstes wird der ‚Satz von Betti‘, seine Herleitung und seiner Zusammenhang mit den ‚Green’schen Identitäten‘ erklärt. Danach werden die Anwendungen der ‚Dirac’sche-Delta-Funktionen‘ beschrieben, die für das Erzeugen einer Einflussfunktion durch das Aufbringen einer Singularität benutzt werden. Anschließend wird der Einsatz der Finiten Elementen Methode (FEM), um eine genäherte Einflussfunktion zu erzeugen, beschrieben.

4.1.1 Der Satz von Betti

Der ‚Satz von Betti‘ spielt in der Statik eine große Rolle. Mit seiner Hilfe können alle Weg- bzw. Kraftgrößen eines Tragwerks bestimmt werden. Mit dem ‚Satz von Betti‘ wird ein allgemeiner Zugang zu den Einflussfunktionen erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wird der ‚Satz von Betti‘ für einen Balken mit konstanter

Biegesteifigkeit EI hergeleitet.¹

Die Differentialgleichung für die Durchbiegung lautet,

$$EIw^{IV}(x) = p(x) \quad \forall x \in [0, l]. \quad (4.1)$$

Setzt man eine virtuelle Verrückung $\hat{w}(x)$ auf den Balken ein, dann erhält man für die virtuelle äußere Arbeit der Belastung $p(x)$ auf den virtuellen Wegen $\hat{w}(x)$ das Integral

$$\int_0^l EIw^{IV}(x)\hat{w}(x) dx, \quad (4.2)$$

nach zweimaliger partieller Integration folgt

$$\begin{aligned} \int_0^l EIw^{IV}(x)\hat{w}(x) dx &= \left[-EIw'''(x)\hat{w}(x) + EIw''(x)\hat{w}'(x) \right]_0^l \\ &+ \int_0^l EIw''(x)\hat{w}''(x) dx. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Setzt man in der Gleichung (4.3) für die Querkraft $V(x) = -EIw'''(x)$ und für das Biegemoment $M(x) = -EIw''(x)$ ein, dann entspricht dies in der Statik dem ‚Prinzip der virtuellen Verrückung‘ und in der Mathematik der ‚ersten Green’schen Identität‘

$$\begin{aligned} G(w, \hat{w}) &= \underbrace{\int_0^l p(x)\hat{w}(x) dx + \left[V(x)\hat{w}(x) - M(x)\hat{w}'(x) \right]_0^l}_{\text{virtuelle äußere Arbeit}} \\ &- \underbrace{\int_0^l \frac{M(x)\hat{M}(x)}{EI} dx}_{\text{virtuelle innere Arbeit}} = 0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Die Glattheitsforderungen müssen erfüllt werden, diese sind für $w(x) \in C^4[0, l]$ und

¹Es wird hier beispielsweise der Satz von Betti für einen Balken mit konstanter EI hergeleitet

für $\hat{w}(x) \in C^2[0, l]$. Das heißt, die vierte Ableitung der Funktion $w(x)$ muss noch stetig sein, und die zweite Ableitung der Funktion $\hat{w}(x)$ muss auch stetig sein.

Vertauscht man in (4.4) $w(x)$ und $\hat{w}(x)$ miteinander, erhält man das ‚Prinzip der virtuellen Kräfte‘

$$\begin{aligned} G(\hat{w}, w) &= \int_0^l \hat{p}(x)w(x) dx + \left[\hat{V}(x)w(x) - \hat{M}(x)w'(x) \right]_0^l \\ &- \int_0^l \frac{\hat{M}(x)M(x)}{EI} dx = 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\forall \hat{w} \in C^4[0, l] \text{ und } w \in C^2[0, l].$$

Subtrahiert man die beiden Identitäten voneinander, so bekommt man den ‚Satz von Betti‘, die zweite Green’sche Identität,

$$B(w, \hat{w}) = G(w, \hat{w}) - G(\hat{w}, w) = 0 \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} B(w, \hat{w}) &= \int_0^l p(x)\hat{w}(x) dx + \left[V(x)\hat{w}(x) - M(x)\hat{w}'(x) \right]_0^l \\ &- \left[\hat{V}(x)w(x) - \hat{M}(x)w'(x) \right]_0^l - \int_0^l \hat{p}(x)w(x) dx = 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Der ‚Satz von Betti‘ beschreibt, dass die Arbeiten, die die Kräfte des ersten Systems auf den Wegen des zweiten Systems leisten, gleich den Arbeiten sind, die die Kräfte des zweiten Systems auf den Wegen des ersten Systems leisten. [Har85], S.56 ff.. Der ‚Satz von Betti‘ kann auch als ‚Satz der Gegenseitigkeit der Verschiebungsarbeit‘ bezeichnet werden, [Mes99].

$G(w, \hat{w}) = 0$	Prinzip der virtuellen Verrückungen
$G(\hat{w}, w) = 0$	Prinzip der virtuellen Kräfte
$B(w, \hat{w}) = G(w, \hat{w}) - G(\hat{w}, w) = 0$	Satz von Betti

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Green'schen Identitäten.

4.1.2 Die Einflussfunktionen

Die Einflusslinien spielen für den Tragwerksplaner eine große Rolle: mit deren Hilfe kann der Tragwerksplaner alle Weg- bzw. Kraftgrößen eines Tragwerks bestimmen. Die Einflussfunktionen erfassen den Einfluss von ortsveränderlichen Lasten auf einzelne Zustandsgrößen. Um eine Einflussfunktion zu erzeugen, bringt man auf das Tragwerk eine der ‚Singularitäten‘ δ_i als Belastung auf, Siehe Tab. (4.2). Die Einflussfunktion ist dann die Biegelinie, die aus diesem Lastfall resultiert.

Duale Belastung			Greensche Funktion
Einzelkraft	δ_0	↓	$G_0(y, x)$
Moment	δ_1	⊙	$G_1(y, x)$
Knick	δ_2	∨	$G_2(y, x)$
Versatz	δ_3	∧	$G_3(y, x)$

Tabelle 4.2: Duale Größen zur Berechnung von Einflussfunktionen am Balken und der schubstarren Platte aus [Car04] S. 17.

Da in der Statik meistens über Energie gesprochen wird, werden die Lasten nicht selber betrachtet, sondern die Arbeit, die diese Lasten auf die virtuelle Verrückung leisten. Eine Einzellast $p = 1$ leistet eine $\delta w(x)$ auf die virtuelle Verrückung δw . siehe [Har07] S.69 ff. Um diese Arbeiten umfassen zu können, werden die ‚Dirac'sche-Delta-Funktionen‘ im nächsten Abschnitt betrachtet.

Die Dirac'sche-Delta-Funktion

Die ‚Dirac'sche-Delta-Funktion‘ lautet wie folgt:

$$\delta_i(y, x) = \begin{cases} 0 & y \neq x \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta_i(y, x) dy = 1. & \end{cases} \quad (4.8)$$

Diese Funktion tritt nur an der Stelle x , und besitzt die Intensität ‚1‘. Wenn ein Dirac-Delta $\delta_i(y, w)$ mit einer beliebigen Funktion $w(y)$ überlagert wird, dann ergibt sich ein Wert von w an der Stelle x , der zu $\delta_i(y, x)$ konjugiert wird. Siehe Tab. (4.2).

Für einen Balken werden die folgenden Formeln hergeleitet:

$$\int_0^l \delta_0(y, x)w(y) dy = w(x) \cdot 1 = w(x) \quad \text{Einzelkraft} = 1$$

$$\int_0^l \delta_1(y, x)w(y) dy = w'(x) \quad \text{Moment} = 1$$

$$\int_0^l \delta_2(y, x)w(y) dy = M(x) \quad \text{Knick} = 1$$

$$\int_0^l \delta_3(y, x)w(y) dy = V(x) \quad \text{Versatz} = 1$$

Für einen Stab, werden aus der Differentialgleichung $-EAu''(x) = p(x)$ folgende Gleichungen hergeleitet:

$$\int_0^l \delta_0(y, x)u(y) dy = u(x) \quad \text{Einzelkraft} = 1$$

$$\int_0^l \delta_1(y, x)u(y) dy = N(x) \quad \text{Versatz} = 1$$

Die Einflussfunktionen in der Statik

Wie im Abschnitt 4.1.1 erwähnt wurde, ist der ‚Satz von Betti‘ ein Zugang zu den Einflussfunktionen. In diesem Abschnitt werden die Einflussfunktionen mit Hilfe des ‚Satzes von Betti‘ berechnet.

Im Abschnitt 4.1.1 wurde der ‚Satz von Betti‘ für einen Balken mit konstanter Biegesteifigkeit EI hergeleitet. Um die Einflussfunktion aus dem ‚Satz von Betti‘ herzuleiten, wird ein gelenkig gelagerter Balken auf starren Lagern als Beispiel genommen.

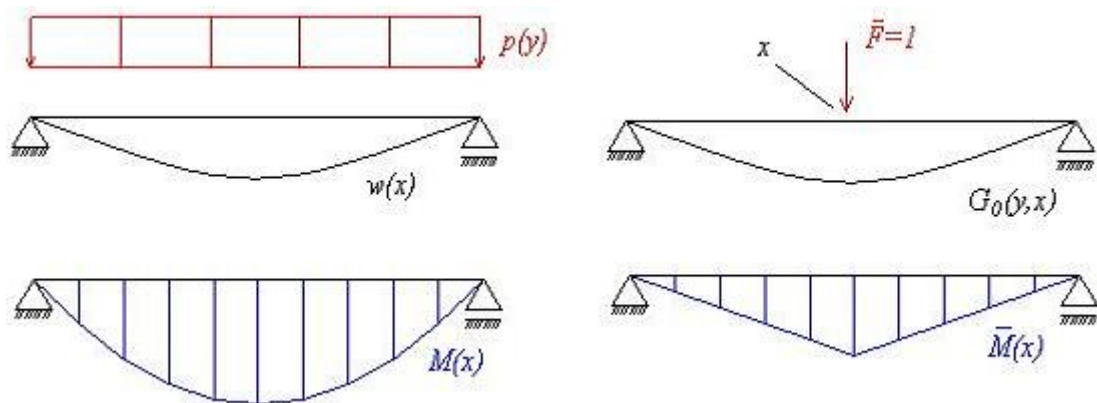


Abbildung 4.1: Ermittlung der Durchbiegung an einem gelenkig gelagerten Balken auf starren Lagern mittels Einflussfunktion.

Wird der ‚Satz von Betti‘ an dem Beispiel auf Abb. (4.1) angewendet, dann folgt aus der Gleichung (4.7) die folgende Gleichung:

$$B(w, \hat{w}) = \int_0^l G_0(y, x) p(y) dy - 1 \cdot w(x) = 0,$$

wobei $w(x)$ die Biegelinie aus der Gleichlast ist und $G_0(y, x)$ die Biegelinie aus der Einzellast $\bar{F} = 1$ ist. Die Funktion $G_0(y, x)$ bezeichnet man in der Mathematik als die ‚Green’sche Funktion‘, und in der Statik entspricht dieser Ausdruck der Einflussfunktion. Die Angriffstelle der Wanderlast wird mit y bezeichnet und die Stelle, an der die Durchbiegung gerechnet werden muss, wird mit der Variable x

bezeichnet. Die Funktion für die Durchbiegung an einer beliebigen Stelle x lautet

$$w(x) = \int_0^l G_0(y, x)p(y) dy. \quad (4.9)$$

Alle Einflussfunktionen kommen auf die Bauart, die in Gleichung (4.9) dargestellt ist, nur die ‚Green’sche Funktion‘ ändert sich. Siehe Tab. (4.2).

4.1.3 Die Finite-Elemente-Methode

Dieser Abschnitt handelt von der Methode der Finiten Elemente, und ihren Einsatzmöglichkeiten in der Statik. Zurzeit werden die FEM-Programme häufiger in der Statik eingesetzt. Die in dieser Arbeit durchgeführte Sensitivitätsanalyse wird mit Hilfe des FEM-Programms ‚SOFiSTiK‘ erarbeitet. Die FEM ist ein Verfahren, in dem die Elementformulierung und die gewählte FE-Netz einen großen Einfluss auf die Genauigkeit dieses Verfahrens haben.

In der klassischen Statik verwendet man die Gleichgewichtsbedingung, die in (4.1) dargestellt ist, um die Biegelinie $w(x)$ eines Balkens zu rechnen, wobei alle möglichen $w(x)$ aus dem unendlichen dimensionalen Verformungsraum V sind. In der modernen Statik, zu der die Methode der finiten Elemente und die Methode der Randelemente zählen, kann gezeigt werden, dass man mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Verrückung und der Betrachtung des ursprünglichen Randwertproblems ein Variationsproblem formulieren kann. Das Variationsproblem lautet nach [Grä02]

$$\begin{aligned} & \text{Finde eine Biegelinie } w(x) \in V, \text{ welche die Variationsgleichung} \\ & a(w, \hat{w}) = (p, \hat{w}) \quad \text{für alle } \hat{w}(x) \in V \text{ erfüllt} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Das Variationsproblem ist so zu lösen, indem die verschiedenen Biegelinien nicht mehr im Raum V zu finden sind, sondern im Raum $V_h \subset V$ siehe Abb. (4.2), somit

lautet das Variationsproblem nach [Grä02]

Finde eine Biegelinie $w_h(x) \in V_h \subset V$, welche die Variationsgleichung

$$a(w_h, \hat{w}_h) = (p, \hat{w}_h) \quad \text{für alle } \hat{w}_h(x) \in V_h \subset V \text{ erfüllt} \quad (4.11)$$

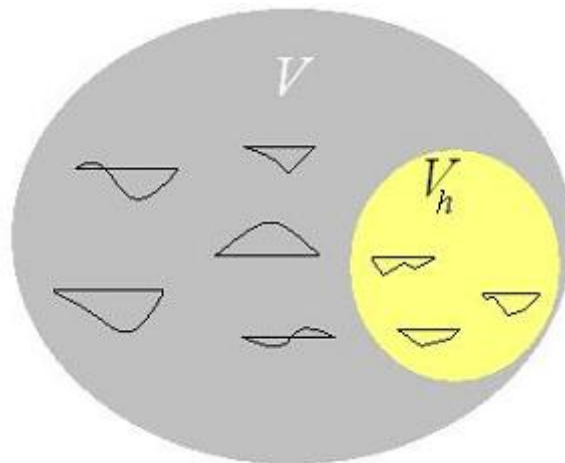


Abbildung 4.2: Alle möglichen Biegelinien, die ein FE-Programm darstellen kann, liegen in der endlichdimensionalen V_h , die in V liegt.

Für $w_h(x)$ wählt man die Ansatzfunktionen $\phi_j(x)$, die den Raum V_h aufspannen und erhält

$$a(w_h, \phi_j) = (p, \phi_j) \quad (4.12)$$

und so ist die FE-Lösung $\hat{w}_h(x)$ eine Entwicklung nach diesen Ansatzfunktionen

$$w_h(x) = \sum_{i=1}^n w_i \phi_i(x), \quad (4.13)$$

w_i ist die Knotenverschiebung und $\phi_i(x)$ ist die zugehörige Einheitsverformung aus

V_h . Aus der Variationsgleichung (4.12) erhalten wir Folgendes

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = K_{ij} &= a(\phi_i, \phi_j) = \int_0^l EI \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx, \\ \mathbf{f} = f_j &= (p, \phi_j) = \int_0^l p(x) \phi_j(x) dx \\ i &= 1, 2, \dots, n \quad \text{und} \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Das führt zu dem berühmten Gleichungssystem $\mathbf{K}\mathbf{w}=\mathbf{f}$, wobei \mathbf{k} die symmetrische Steifigkeitsmatrix ist, \mathbf{w} den Verformungsvektor bezeichnet und \mathbf{f} der Vektor der äquivalenten Knotenkräfte ist. Mehr Informationen und Einsatzmöglichkeiten der Finite-Elementen-Methode findet man in [Har07],[Lin02] und [Wer08].

FEM: Genäherte Einflussfunktionen

Die Einflussfunktionen, die mit Hilfe eines FE-Programms erzeugt werden, sind genäherte Einflussfunktionen, siehe Abschnitt 4.1.3. Die FE-Lösung hat die Bauart wie (4.9), und lautet wie folgt

$$w_h(x) = \int_0^l G_0^h(y, x) p(y) dy. \quad (4.15)$$

Im Gegensatz zu (4.9) wird hier die Projektion der ‚Green’schen Funktion‘ auf V_h verwendet, was bedeutet, dass die FEM-Lösung eine Ungenauigkeit besitzt, diese Ungenauigkeit wird wie folgt berechnet [Har07]:

$$w(x) - w_h(x) = \int_0^l [G_0(y, x) - G_0^h(y, x)] p(y) dy \quad (4.16)$$

Die Ermittlung der Einflussfunktionen mit Hilfe der FE-Methode kann wie im Abschnitt 4.1.2 verlaufen. Man setzt an einen gesuchten Punkt x eine Einzelkraft, ein Moment o.ä. aus Tab. (4.2) ein, und löst diesen Lastfall. Aber das FE-Programm muss diese Belastung in äquivalente Knotenkräften umwandeln, bevor es diesen Lastfall lösen kann, siehe (4.14).

Zur Darstellung einer Einzelkraft $F = 1$ wird ‚wie im Abschnitt 4.1.2 dargestellt,

die ‚Dirac’sche-Delta-Funktion‘ verwendet, und die Einheitsverformungen werden als virtuelle Verrückung eingesetzt. Dabei sieht die ‚Dirac-Delta-Funktion‘ folgendermaßen aus:

$$\int_0^l \delta_0(y, x) \phi_i(y) dy = \phi_i(x), \quad (4.17)$$

siehe [Har07], und die ‚höheren Dirac-Delta-Funktionen‘ lauten für einen Balken:

$$\int_0^l \delta_1(y, x) \phi_i(y) dy = \phi_i'(x) \quad \text{Moment}$$

$$\int_0^l \delta_2(y, x) \phi_i(y) dy = M_i(x) \quad \text{Knick}$$

$$\int_0^l \delta_3(y, x) \phi_i(y) dy = V_i(x) \quad \text{Versatz}$$

Die Arbeiten, die aus der ‚Dirac’schen-Delta-Funktion‘ errechnet werden, sind die nötigen äquivalenten Knotenkräfte.

$$f_i = \int_0^l \delta_0(y, x) \phi_i(y) dy = \phi_i(x). \quad (4.18)$$

Beispiel: Die Einflussfunktion für die Querkraft an der Balkenmitte $V(\frac{l}{2})$ ist mit Hilfe einer Versetzung zu rechnen.

$$f_i = \int_0^l \delta_3(y, \frac{l}{2}) \phi_i(y) dy = V_i(\frac{l}{2})$$

Für diesen Lastfall sind die Querkräfte der Einheitsverformungen ϕ_i an der Stelle $x = \frac{l}{2}$.

Die Einheitsverformungen des schubstarren ‚Bernoulli-Balkens‘ lauten: [Lin02]

$$\phi_1(x) = 1 - \frac{3x^2}{l_E^2} + \frac{2x^3}{l_E^3}$$

$$\phi_2(x) = \left(-\frac{x}{l_E} + \frac{2x^2}{l_E^2} - \frac{x^3}{l_E^3} \right) l_E$$

$$\phi_3(x) = \frac{3x^2}{l_E^2} - \frac{2x^3}{l_E^3} \quad (4.19)$$

$$\phi_4(x) = \left(\frac{x^2}{l_E^2} - \frac{x^3}{l_E^3} \right) l_E.$$

Ein Balkenelement mit konstanter Biegesteifigkeit hat die folgende Querkraft

$$V_i(x) = -EI\phi_i'''(x), \quad (4.20)$$

mit $\phi_i(x)$ als die Biegelinie des Balkens aus der Einheitsverformung sind damit die äquivalenten Knotenkräfte:

$$f_1(x) = V_1(x) = -EI\phi_1'''(x) = -EI \left(\frac{12}{l_E^3} \right)$$

$$f_2(x) = V_2(x) = -EI\phi_2'''(x) = -EI \left(-\frac{6}{l_E^2} \right)$$

$$f_3(x) = V_3(x) = -EI\phi_3'''(x) = -EI \left(-\frac{12}{l_E^3} \right)$$

$$f_4(x) = V_4(x) = -EI\phi_4'''(x) = -EI \left(-\frac{6}{l_E^2} \right)$$

Für einen Balken der Länge $5m$, der in 5 Teile mit gleicher Länge zerlegt wird, folgen die äquivalenten Knotenkräften, die auf der folgenden Abbildung dargestellt sind.

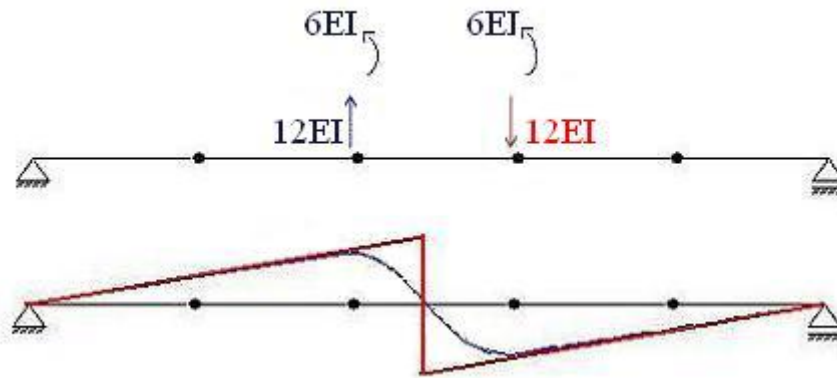


Abbildung 4.3: Oben: Die äquivalenten Knotenkräfte für die FE-Querkraft in der Balkenmitte. Unten: Rot zeigt die exakte Lösung, blau die FE-Lösung.

4.2 Der Einsatz der Sensitivitätsanalyse an einem Tragwerk

In der statischen Berechnung im Bauwesen, werden die Lastannahmen durch Normen und Richtlinien vordifiniert (z.B. DIN 1055-4:2005-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten [DIN05]). In der aktuellen Normen werden die Sicherheitsbeiwerte auf die Einwirkungen und die Bauteilwiderstände gerechnet. Das Sicherheitskonzept liefert keine Aussage über die Wichtigkeit eines Tragelementes für die globale Standsicherheit. Die Sicherheit wird dadurch so definiert,

dass für alle Bauteile und Anschlüsse die auftretenden Einwirkungen zu jeder Zeit durch die vorhandenen geplanten Beanspruchbarkeiten aufgenommen werden können und nur in seltenen Fällen Beanspruchbarkeiten von Einwirkungen überschritten werden. [del09, S.2]

Laut dieser Definition der Standsicherheit sind alle Verbindungen und Tragelemente gleich wichtig, d.h. dass das Versagen eines Elementes gleich das globale Versagen des Tragwerks ist. Dies ist allerdings nicht die Realität, Bauteile ohne Bedeutung zum globalen Lastfluss können ausfallen, ohne dass das Tragwerk einstürzt. Die Sensitivitätsanalyse liefert Aussagen über die Nachwirkung eines Bauteilsversagens auf das gesamte Tragwerk. Fast alle Tragwerke - insbesondere Hochbauten- be-

sitzen Redundanzen im Lastabtrag, welche dazu führen, dass das Tragwerk nach dem Versagen einzelner Tragglieder immer noch seine Standsicherheit gewährleisten kann.

Das Versagen eines Bauelements liefert eine Steifigkeitsänderung in diesem Element. Das führt in statischen unbestimmten Systemen zu der Überlagerung der Schnittgrößen im Gesamtsystem. Dabei können weitere Bauteile überlastet werden und infolgedessen versagen. Das führt zu einer weiteren Schnittgrößenüberlagerung im Gesamtsystem und weitere Bauteile werden dann überlastet. Eine rechtzeitige Erkennung der verschiedenen Ausfallszenarien und kritischen Pfade im System ist aus diesem Grund von großer Bedeutung. In diesem Abschnitt werden Formeln hergeleitet, mit denen die Schnittgrößenüberlagerung gerechnet werden kann, und Aussagen über die Wichtigkeit eines Bauelements äußern.

4.2.1 Herleitung der Formel

Ein Zweifeldträger mit einer konstanten Biegesteifigkeit EI hat Risse in einem bestimmten Bereich $[x_a, x_b]$. In diesem Bereich hat der Zweifeldträger die Biegesteifigkeit $EI = EI + \Delta EI$. Im Abschnitt 4.1.2 wird die Herleitung der Gleichung (4.9) durchgeführt, anhand dieser Gleichung ist

$$M(x) = \int_0^l G_2(y, x)p(y) dy \quad (4.21)$$

diese Gleichung gilt für den ungerissenen Zustand, und

$$M_c(x) = \int_0^l G_2^c(y, x)p(y) dy \quad (4.22)$$

ist der Momentenverlauf in dem gerissenen Zustand. Aus diesen beiden Gleichungen kann die folgende Gleichung formuliert werden

$$M_c(x) - M(x) = \int_0^l [G_2^c(y, x) - G_2(y, x)] p(y) dy \quad (4.23)$$

$G_2(y, z)$ ist die Einflussfunktion für $M(x)$. Diese Gleichung macht die Aussage, dass die Änderung einer Schnitt- bzw. Weggröße kann berechnet werden, wenn über das komplette System integriert wird, und alle Integrationspunkte y in Betracht genommen werden. Das ist aber sehr aufwendig besonders bei großen und komplexen Systemen.

Ein Tragwerk ist im Gleichgewicht, so sind für jede virtuelle Verrückung der virtuellen äußeren Arbeiten gleich den virtuellen inneren Arbeiten

$$\delta A_a = \delta A_i. \quad (4.24)$$

Das gilt auch für die modifizierte Tragwerk

$$\delta A_a^c = \delta A_i^c \quad c = \text{change}. \quad (4.25)$$

Da aber die äußere Lasten konstant bleiben, so muss die virtuelle äußere Arbeit des Ausgangssystems gleich die virtuelle äußere Arbeit des modifizierten Systems sein

$$\delta A_a = \delta A_a^c, \quad (4.26)$$

und werden des Prinzips der virtuellen Verrückungen, müssen daher die virtuelle inneren Arbeiten gleich groß sein

$$\delta A_i = \delta A_a = \delta A_a^c = \delta A_i^c. \quad (4.27)$$

Die Herleitung der Formel wird für einen Zweifeldträger berechnet.

Das Prinzip der virtuellen Verrückungen für diesen Träger lautet

$$\delta A_i = \int_0^l EI w'' \delta w'' dx = \int_0^l p \delta w dx = \delta A_a. \quad (4.28)$$

Wenn aber in einem bestimmten Intervall $[x_a, x_b]$ die Biegesteifigkeit sich

ändert, $EI \rightarrow EI + \Delta EI$, dann ist das Prinzip der virtuellen Verrückung

$$\delta A_i^c = \int_0^l EI w_c'' \delta w'' dx + \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w_c'' \delta w'' dx = \int_0^l p \delta w dx = \delta A_a^c. \quad (4.29)$$

Hierbei ist w_c die Biegelinie an dem modifizierten Träger. Man beachte, dass durch die Modifikation der Steifigkeit, sich die virtuelle innere Energie um einen additiven Term ändert. Jetzt wird eine ganz besondere virtuelle Verrückung gewählt, nämlich die Biegelinie, die sich unter der Wirkung von einem Einzellast $P = 1$ einstellt, der im Punkt x des Ausgangsträgers angreift. Diese virtuelle Verrückung ist die ‚Green’sche Funktion‘ (G_0) aus Tab. (4.2). jetzt lautet das Prinzip der virtuelle Verrückung am Ausgangsträger

$$\delta A_i = \int_0^l EI w'' G_0'' dx = \int_0^l p G_0 dx = \delta A_a. \quad (4.30)$$

Am modifizierten Träger liefert die substitution $\delta w \rightarrow G_0$

$$\delta A_i^c = \int_0^l EI w_c'' G_0'' dx + \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w_c'' G_0'' dx = \int_0^l p G_0 dx = \delta A_a^c. \quad (4.31)$$

In der Gleichung (4.30) ist die linke Seite gleich der Moh’schen Arbeitsgleichung, was bedeutet dass die linke Seite dieser Gleichung die Durchbiegung $w(x)$ im Punkt x

$$\delta A_i = w(x) = \int_0^l EI w'' G_0'' dx = \int_0^l \frac{M M_G}{EI} dx = \int_0^l p G_0 dx. \quad (4.32)$$

Entsprechend dazu am modifizierten System, folgt

$$w_c(x) = \int_0^l EI w_c'' G_0'' dx = \int_0^l \frac{M_c M_G}{EI} dx. \quad (4.33)$$

Wegen der Gleichung (4.27) kann jetzt geschrieben werden, dass

$$w_c(x) + \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w_c'' G_0'' dx = w(x) \quad (4.34)$$

ist, oder

$$w_c(x) - w(x) = - \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w_c'' G_0'' dx. \quad (4.35)$$

Das Integral auf der rechten Seite erstreckt sich nur über den Bereich des Tragwerks, in dem sich die Steifigkeiten ändern. Anders gesagt, durch die Integration über dem modifizierten Bereich kann vorausgesagt werden, wie sich die Biegelinie im Punkt x ändert. Mit dieser Technik können auch andere Änderungen, die Änderungen der Momente, Querkräfte, Lagerkräfte, etc. berechnen. Es muss nur die entsprechende Einflussfunktion als virtuelle Verrückung gewählt werden (siehe Abschnitt 4.1.2).

Bei näherer Betrachtung hat die Formel (4.35) noch einen Nachteil, denn um Änderung in der Durchbiegung zu berechnen, muss die Durchbiegung w_c bekannt sein, weil die Momente aus w_c mit den Momenten aus der ‚Green’schen Funktion‘ G überlagert werden müssen. Aber wenn w_c bekannt ist, ist dann die Formel (4.35) nicht brauchbar...

Die Idee ist naheliegend die Biegelinie w_c durch die Biegelinie w anzunähern, oder anzunehmen, dass die Differenz $w_c'' - w''$ im Intervall $[x_a, x_b]$ orthogonal zu den Krümmungen G'' der Einflussfunktion ist, denn dann folgt

$$\begin{aligned} w_c(x) - w(x) &= - \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w_c'' G'' dx \\ &= - \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) (w_c'' - w'') G'' dx - \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w'' G'' dx \\ &\simeq - \int_{x_a}^{x_b} (EI + \Delta EI) w'' G'' dx. \end{aligned} \quad (4.36)$$

In dieser Formel stammen beide Biegelinien, w und G aus dem Ausgangssystem. Mit ihr kann prognostiziert werden, welchen Einfluss Steifigkeitsänderungen auf die Weg-, Schnittgrößen und die Lagerkräfte eines Tragwerks haben werden. Für einen

Balken lautet die Formel der Änderung in der Durchbiegung

$$w_c(x) - w(x) \simeq - \int_{x_a}^{x_b} \frac{\Delta EI}{EI} \frac{M M_0}{EI} dx. \quad (4.37)$$

Die allgemeine Formel der Änderung lautet

$$j(e_u) \simeq - \int_{x_a}^{x_b} \Delta EI w'' G'' dy \simeq - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\Delta EI}{EI} \frac{M M_i}{EI} dx, \quad (4.38)$$

wobei $j(\cdot)$ eine Funktion ist,

$$j(u) = w(x) \quad j(w) = M(x) \quad \text{usw.} \quad (4.39)$$

angenommen dass $e_u = u_c - u$, daraus folgt

$$j(e_u) = j(u_c) - j(u). \quad (4.40)$$

Die verschiedenen Anwendungen der Sensitivitätsanalyse im ebenen und Räumlichen Systemen sind im [Har07] beschrieben werden. Die Formel (4.38) kann auch als

$$j(e_u) \simeq - \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M M_i}{EI_c} dx, \quad (4.41)$$

formuliert werden, um eine Näherung der Weg- bzw. Schnittgrößen im System zu rechnen.

4.2.2 Vorgehensweise bei der Sensitivitätsanalyse

Wie im Abschnitt 4.2.1 gezeigt wird, um die Änderung einer bestimmten Schnitt- bzw. Weggröße zu finden, muss an der gesuchten Stelle eine Einflussfunktion aus Tab (4.2) angebracht wird. Das ist aber eine enorme Leistung für mehrere gesuchten Stellen bei einer einzelnen Schwächung. in Anlehnung auf der Satz von Betti (Abschnitt 4.1.1) ist eine Lösung gefunden worden.

Der Satz von Betti besagt, dass die Arbeiten, die die Kräfte des ersten System auf den Wegen des zweiten Systems leisten, gleich den Arbeiten sind, die die Kräfte des zweiten Systems auf den Wegen des ersten Systems leisten.

$$A_{1,2} = A_{2,1} \quad (4.42)$$

Für dies Problem hat es den Sinn, wenn man eine Einflussfunktion an der gesuchten Stelle aufbringt, und die Wert an der geschwächten Stelle abliest, das gleiche Bedeutung hat, wenn man eine einzelne Einflussfunktion an der geschwächten Stelle aufbringt, und das Wert an der gesuchten Stelle abliest. Mit diesen Gedanken können x-beliebige Stellen mit einer einzigen Einflussfunktion untersucht werden.

$$j(e_u) \simeq -\frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \cdot J_M(G_i[y](x))}{EI_c} dx \quad (4.43)$$

5 Tragwerksanalyse am Beispiel Bürohaus

In diesem Kapitel werden die Techniken der Sensitivitätsanalyse am Bürogebäude eingesetzt, um die Ausfallszenarien bzw. die kritischen Pfade zu bestimmen. Es werden mehrere Szenarien berechnet und analysiert.

5.1 Vorgehensweise der Analyse

wie im Abschnitt 4.2.2 erwähnt ist, um die Änderung einer Weg- bzw. Kraftgröße genähert zu bestimmen, muss die Gleichung 4.43 eingesetzt werden. Die Sensitivitätsanalyse wird in Abhängigkeit mit der FMEA (Kapitel 3) eingesetzt, und sie dient zur Bestimmung der Ausfallszenarien und der kritischen Pfade. In diesem Kapitel wird die Sensitivitätsanalyse am Bürogebäude X dargestellt, und die Ausfallszenarien werden mit ihrer Hilfe bestimmt.

Im ersten Schritt wird eine Einflussfunktion in einer Stelle eingesetzt, es wird mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse die Auswirkung einer Schwächung an dieser Stelle auf eine andere bestimmt und dokumentiert. Danach wird mit dem Programm SOFISTik diese Schwächung im Gebäude-Modell eingebaut, und die exakte Änderung an der untersuchten Stelle wird abgelesen. Nun wird an dem modifizierten System eine weitere Einflussfunktion in der ersten untersuchten Stelle eingesetzt, und mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse (Gleichung 4.43) werden die Auswirkung einer Schwächung

an dieser Stelle auf eine dritte untersucht. Es wird dann die zweite Schwächung im Modell eingebaut (an der Stelle der 2. Einflussfunktion), um die exakte Änderung auf die dritte Stelle zu bestimmen. Die Schritte werden wiederholt bis keine signifikanten Änderungen im Schnitt- bzw. Weggrößen mehr gibt oder wenn das System versagt.

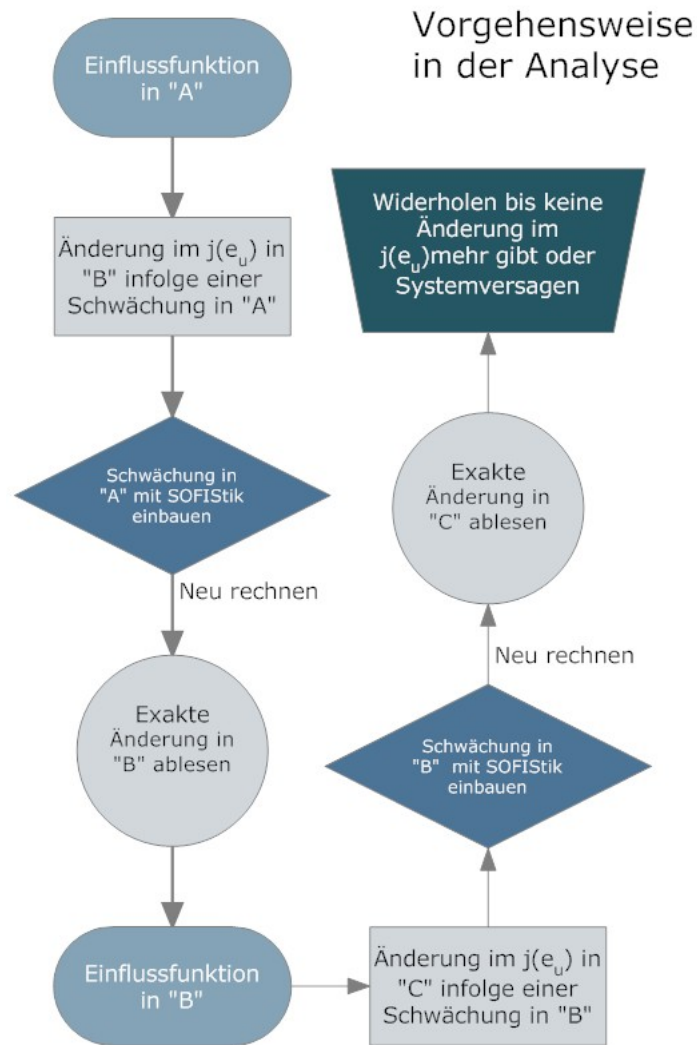


Abbildung 5.1: Vorgehensweise bei der Tragwerkanalyse

5.2 Durchführung der Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden verschiedene Ausfall bzw. Versagensszenarien behandelt und untersucht. Es wird nur der Lastfall ‚Eigengewicht‘ betrachtet, und die Änderungen in seinen Schnitt- bzw. Kraftgrößen werden untersucht.

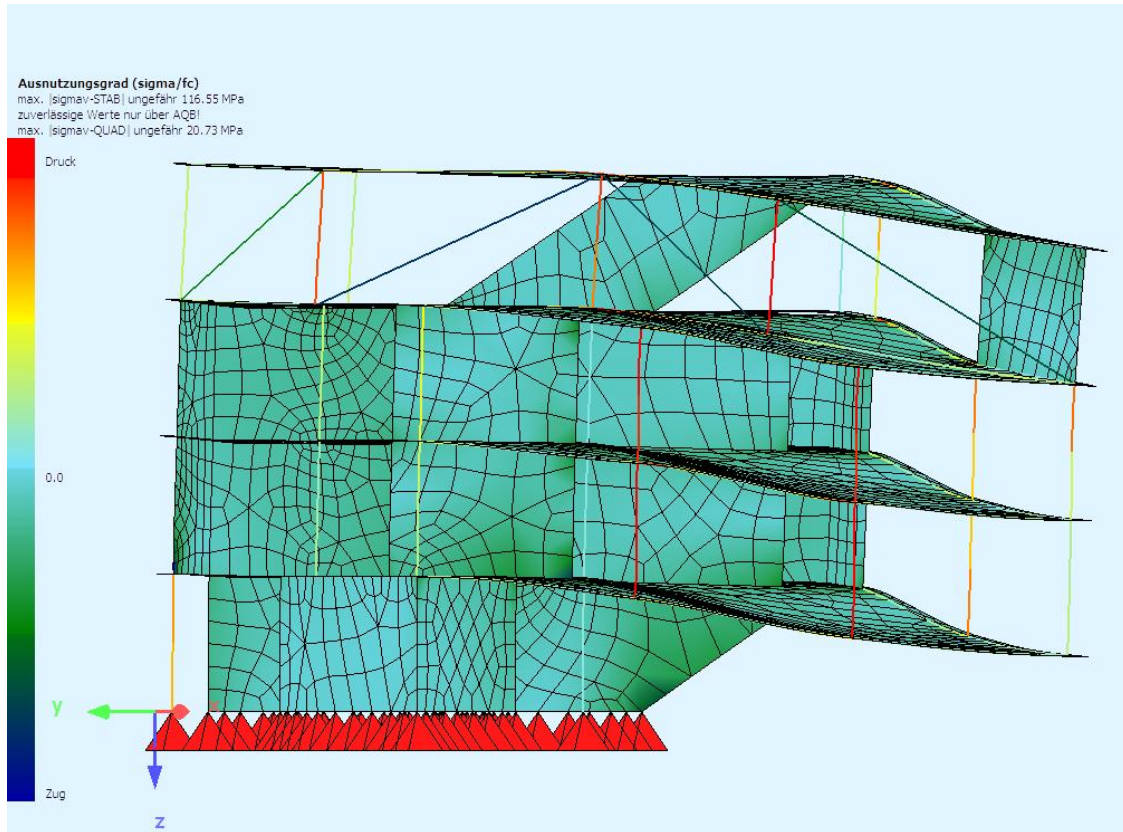


Abbildung 5.2: Bürogebäude: Lastfall ‚Eigengewicht‘

5.2.1 Erstes Szenario

Das erste Ausfallszenario beginnt mit einer Schwächung in der Hauptstütze, es wird eine Einflussfunktion in der Stelle aufgebracht. SOFiSTik kann Einflussfunktionen für Platten und Scheiben generieren aber nicht für Balken bzw. Stäbe. Im Abschnitt 4.1.3 sind die äquivalenten Knotenkräfte für einen Balken aus den Einheitsverformungen ϕ_i hergeleitet worden. In dieser Stelle werden die äquivalenten Knotenkräfte für einen Stab hergeleitet und die in SOFiSTik eingegeben. Die Ein-

heitsverformungen für einen Stab sind:

$$\phi_1 = 1 - \frac{x}{l} \quad (5.1)$$

$$\phi_2 = \frac{x}{l} \quad (5.2)$$

Für die äquivalenten Knotenkräfte setzt man die Formel

$$\int_0^l \delta_i(y, x) \phi_i(y) dy. \quad (5.3)$$

Somit erhält man für $N(x) = -EA\phi'_i(x)$ die folgenden äquivalenten Knotenkräfte

$$f_1(x) = N_1(x) = -EA\phi'_1(x) = -EA\frac{1}{l}, \quad (5.4)$$

$$f_2(x) = N_2(x) = -EA\phi'_2(x) = EA\frac{1}{l}. \quad (5.5)$$

In Diesem Szenario wird die Einflussfunktion bzw. die Schwächung in der Hauptstütze des Erdgeschoßbereichs, Der Querschnitt hat die Fläche von 1 m^2 und ist aus Beton C30/37 ausgeführt. Das E-Modul beträgt $E = 28309400\text{ kN/m}^2$, und die Länge des Elements ist $1,5\text{ m}$. Mit diesen Angaben und den Gleichungen (5.4) und (5.5) werden folgenden äquivalenten Knotenkräfte berechnet

$$f_1 = -28309400 \cdot 1 \cdot \frac{1}{1,5} = -18872933,3\text{ kN},$$

$$f_2 = 28309400 \cdot 1 \cdot \frac{1}{1,5} = 18872933,3\text{ kN}.$$

Setzt man die äquivalenten Knotenkräfte am Anfang und Ende des finiten Elementes, so bekommt man die Einflussfunktion für N in der Hauptstütze. Für diese

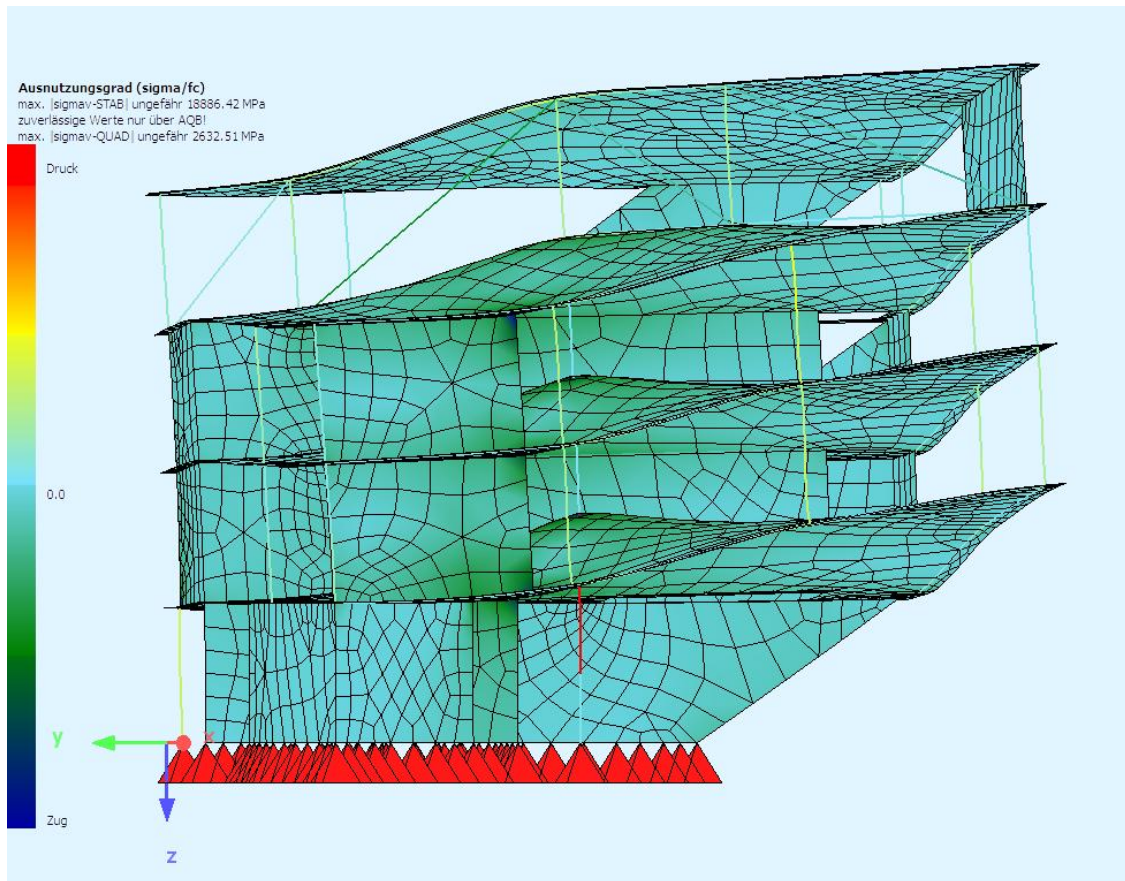


Abbildung 5.3: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Hauptstütze

Schwächung wird die Stütze (Pos. S4.2) des Fachwerks auf Änderungen in der Normalkraft untersucht. Die Gleichung (4.43) wird so modifiziert

$$j(e_u) \simeq -\frac{\Delta EA}{EA} \int_{x_a}^{x_b} \frac{N \cdot J_N(G_i[y](x))}{EA_c} dx, \quad (5.6)$$

weil die Einflussfunktion für N ist, und gesucht wird die Änderungen in Normalkraft. Für die Auswirkung der Schwächung ($\frac{\Delta EA}{EA} = -95\%$) in der Hauptstütze auf der Stütze des Fachwerks (Pos. S4.2) werden die notwendigen Werten aus SOFiS-TiK abgelesen und in der Gleichung (5.6) angesetzt werden.

$$\Delta N \simeq -(-0,95) \cdot 1,5m \cdot \frac{-3467kN \cdot 42304kN}{0,05 \cdot 28309400kN} = -147,66kN.$$

$$\Delta N = N_c - N \rightarrow N_c = \Delta N + N = -147,66kN + -540,9kN = -688,56kN$$

Nun wird die Schwächung in der Hauptstütze in das FEM-Modell eingebaut, und das System wird neu berechnet, um die exakte Änderung in der Normalkraft an der gesuchten Stelle zu bestimmen. Das Programm SOFiSTiK zeigt eine Normalkraft von $N_{\text{exakt}}^c = -654,7 \text{ kN}$. Das Ergebnis aus der Näherungsformel weicht von exakten um 5,2%.

Danach wird eine Einflussfunktion an der ersten untersuchten Stelle (Fachwerkstütze) aufgebracht, um die Auswirkungen einer weiteren Schwächung an dieser Stelle zu bestimmen. Es wird die Einflussfunktion für N an der Stütze eingesetzt. Die Län-

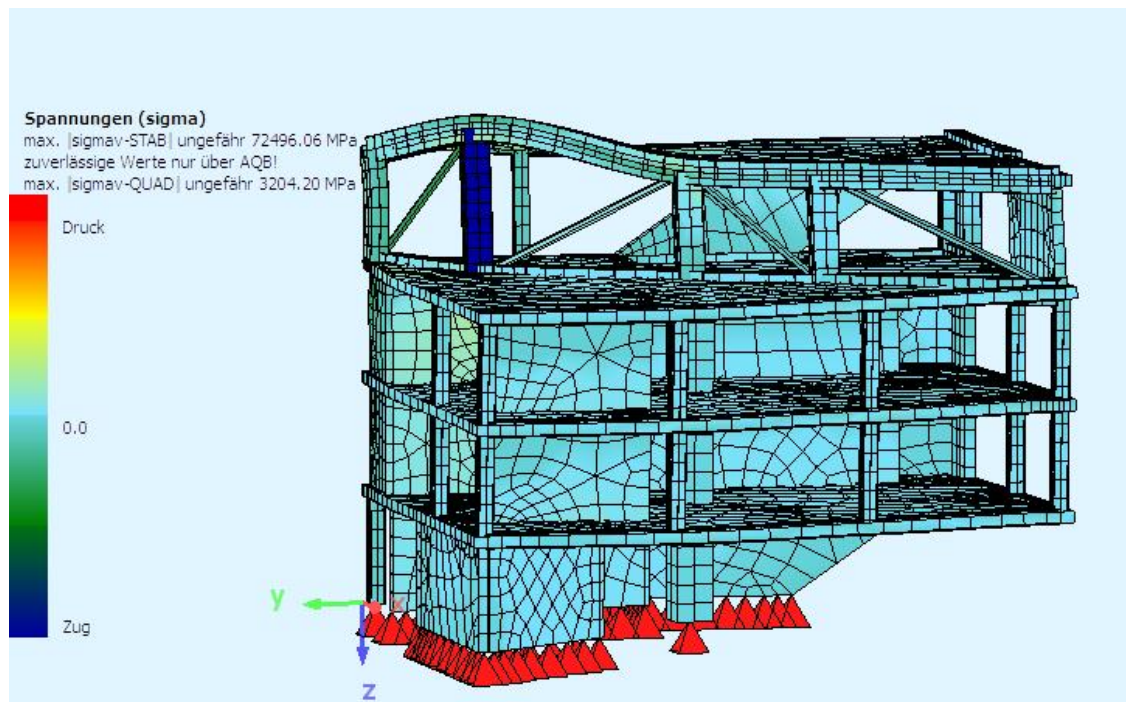


Abbildung 5.4: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkstütze (Pos. S4.2)

ge der Stütze beträgt 3 m und besitzt die Dehnsteifigkeit von $EA = 15036000 \text{ kN}$. Die äquivalenten Knotenkräfte werden berechnet und an der Stütze eingesetzt.

$$f_1 = -15036000 \cdot \frac{1}{3} = -5012000 \text{ kN},$$

$$f_2 = 15036000 \cdot \frac{1}{3} = 5012000 \text{ kN}.$$

Es werden die Auswirkungen einer weiteren Schwächung in der Fachwerkstütze auf

die Momente in der Virendeelträgerstütze (Pos. S3.5). Die Gleichung (4.43) wird an dieser Stelle so geschrieben

$$j(e_u) \simeq -\frac{\Delta EA}{EA} \int_{x_a}^{x_b} \frac{N \cdot J_M(G_i[y](x))}{EA_c} dx. \quad (5.7)$$

Die Normalkraft in der Fachwerkstütze aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ beträgt $N^{LF} = -654,7kN$. Das Moment an der untersuchten Stütze aus der Einflussfunktion ist linear von $M_y^G = 4321kNm$ unten und $M_y^G = -6178kNm$ oben. Die Änderung in dem Moment an der Virendeelträger-Stütze (Pos. S3.5)

$$\Delta M_y \simeq -(-0,95) \cdot 3m \cdot \frac{-654,7kN \cdot 4321kNm}{0,05 \cdot 15036000kN} = -10,72kNm \quad (\text{Unten}),$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M - y^c = \Delta M_y + M_y = -10,72 + -71,5 = 82,22kNm$$

$$\Delta M_y \simeq -(-0,95) \cdot 3m \cdot \frac{-654,7kN \cdot -6178kNm}{0,05 \cdot 15036000kN} = 15,33kNm \quad (\text{Oben}),$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M - y^c = \Delta M_y + M_y = 15,33 + 125,0 = 140,33kNm$$

Baut man die Schwächung in der Fachwerkstütze (Pos. S4.2) ein, um die exakte Änderung in der Momenten zu rechnen. Das exakte Moment nach der 2. Schwächung ist $M_y^c = -79,7kNm$ unten und $M_y^c = 139kNm$ oben, das Ergebnis der Näherungsformel weicht von exakten um 3,16% an dem unteren Wert 0,95% am oberen.

Die Auswirkung der Schwächung an dieser Stelle im Virendeelträger bedeutet, dass die Schnittgrößen im Virendeelträger sich umlagern werden. Es wird an dieser Stelle die Änderung im virendeelträger untersucht, infolge einer Schwächung in der vorher untersuchten Stütze.

Die Stütze hat die Abmessungen $40cm \times 40cm$, und ist im Verbundbauweise durchzuführen. Sie hat die Länge von $3m$ und $EI = 148575kNm^2$. An dieser Stelle wird eine Einflussfunktion von M_y in der Stütze aufgebaut. Damit diese Einflussfunktion in SOFiSTiK modelliert werden kann, müssen die äquivalenten Knotenkräfte zuerst bestimmt werden.

Im Abschnitt 4.1.3 sind die Einheitsverformungen für einen ‚Bernoulli-Balken‘ angegeben worden. Aus diesen Einheitsverformungen können die äquivalenten Knotenkräfte für die M_y -Einflussfunktion hergeleitet werden. Die äquivalenten Knotenkräfte für $M_y^i(x) = -EI\phi_i''(x)$ sind

$$f_1(x) = M_1(x) = -EI\phi_1''(x) = -EI \left(-\frac{6}{l_E^2} + \frac{12x}{l_E^3} \right)$$

$$f_2(x) = M_2(x) = -EI\phi_2''(x) = -EI \left(\frac{4}{l_E} - \frac{6x}{l_E^2} \right)$$

$$f_3(x) = M_3(x) = -EI\phi_3''(x) = -EI \left(\frac{6}{l_E^2} - \frac{12x}{l_E^3} \right)$$

$$f_4(x) = M_4(x) = -EI\phi_4''(x) = -EI \left(\frac{2}{l_E} - \frac{6x}{l_E^2} \right).$$

Setzt man die Werte für das Element ($l = 1,5m$ und $x = 0,0m$) in den Formeln ein, bekommt man die äquivalenten Knotenkräfte für die gewünschte Einflussfunktion.

$$f_1 = 396200kN,$$

$$f_2 = -396200kNm,$$

$$f_3 = -396200kN,$$

$$f_4 = -198100kNm.$$

Die Einflussfunktion hat sehr niedrige Werte in allen ihren Schnittverläufen, d.h. dass die Änderungen im System infolge eines Ausfallens bzw. einer Schwächung der Stütze (Pos. S3.5) minimal sind, und können zu keinem weiteren Abstürzen des Gebäudes führen. Da die Änderungen minimal sind, wird an dieser Stelle das erste Szenario abgeschlossen und es wird im folgenden ein weiteres Ausfallszenario behandelt.

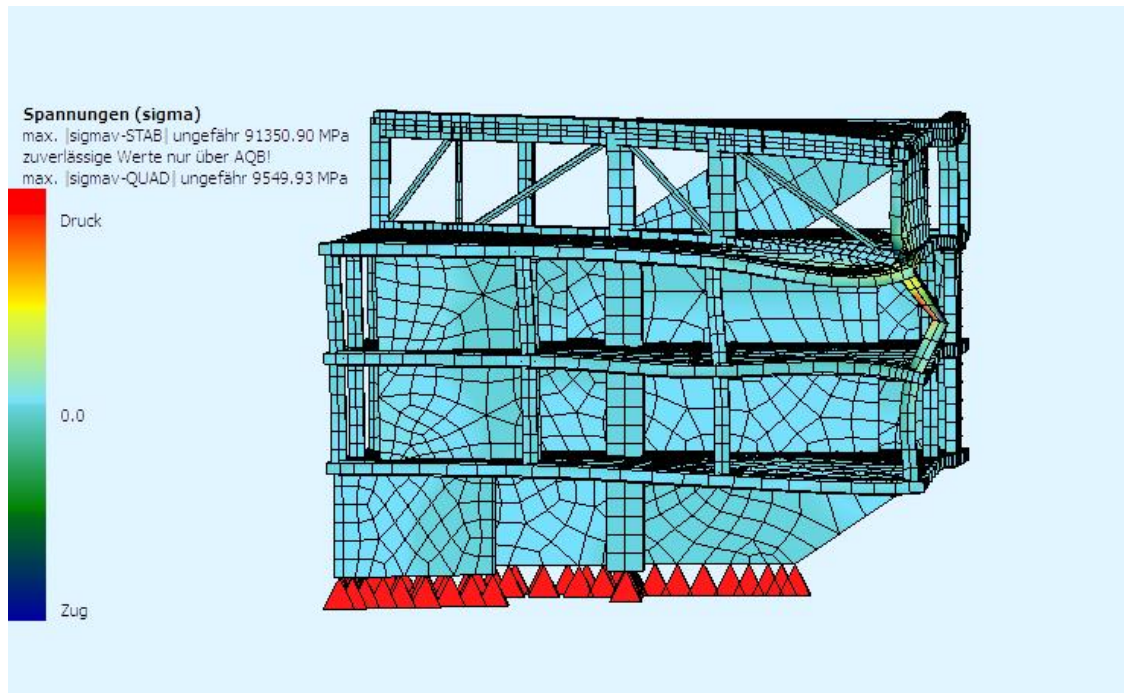


Abbildung 5.5: Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendelträger-Stütze (Pos. S3.5)

5.2.2 Zweites Szenario

In dem zweiten Szenario wird die erste Schwächung an der selben Stelle wie Ausfallszenario 1 gebracht, da die Hauptstütze sehr wichtig für die Tragkonstruktion ist. Wenn eine Schwächung in der Hauptstütze auftaucht, müssen die Lasten aus den Decken auf benachbarten Bauteile umgelagert werden. Es wird an dieser Stelle die Änderung im Virendelträger betrachtet. Da der Virendelträger eher auf Momente beansprucht wird, werden die Änderung im M_y untersucht. Aus der M_y -Verlauf der Einflussfunktion im Virendelträger, kann entnommen werden dass die Stütze (Pos. S2.3) die meiste Änderung im M_y aufweisen wird (Abbildung (5.6)).

Die Normalkraft in der Hauptstütze (Pos. S1.1) beträgt $N = -3467kN$, aus der Einflussfunktion sind die M_y -Werte in der untersuchten Stütze (Pos. S2.3) $M_y^G = -11705kNm$ oben und $M_y^G = 13991kNm$ unten.

$$\Delta M_y^{oben} \simeq -(-0,95) \cdot 1,5m \cdot \frac{-3467kN \cdot -11705kNm}{0,05 \cdot 28309400kN} = 40,85kNm.$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M_y^c = \Delta M_y + M_y = 40,85kNm + 215,0kNm = 255,85kNm$$

$$\Delta M_y^{unten} \simeq -(-0,95) \cdot 1,5m \cdot \frac{-3467kN \cdot 13991kNm}{0,05 \cdot 28309400kN} = -48,83kNm.$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M_y^c = \Delta M_y + M_y = -48,83kNm + -250,4kNm = -299,23kNm$$

Nach dem Einbringen der Schwächung im FEM-Modell betragen die exakten Momente $M_y^c = 246,3kNm$ oben und $M_y^c = -288,0kNm$ unten. Die genährten Werte weichen von exakten um 3,8%.

Im zweiten Schritt wird die Auswirkung einer Schwächung in der Stütze (Pos. S2.3) auf einer anderen Stütze im Virendeelträger gerechnet. Zuerst wird eine Einflussfunktion M_y in der Stütze (Pos. S2.3) eingesetzt, die Momente aus der Einflussfunktion werden mit den Momenten aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ aus dem ersten geschwächten System. Es werden die Änderung in M_y in der Stütze (Pos. S3.3) betrachtet. Da die Einflussfunktion keinen konstanten Momentenverlauf in der zu untersuchenden Stütze hat, muss an dieser Stelle mehrere Einflussfunktionen an der Stelle der Schwächung aufgebracht werden. Es wird die Auswirkung einer Schwächung in der Stütze (S2.3) untersucht, und es werden zwei Einflussfunktionen auf dieser Stütze aufgebracht werden (am Anfang und am Ende, da die Momente aus der Einflussfunktion in der untersuchten Stütze (S3.3) linear sind). Man liest dann die M_y -Werte an der zu untersuchenden Stelle, und setzt diese Werte in einer Funktion. Dieser Funktion wird in Gleichung (4.43) eingesetzt und mit den Funktion M_y aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ überlagert.

Die Stütze (S2.3) ist 3m lang, und im FEM-Modell ist sie in 2 Elementen jeweils die Länge 1,5m geteilt. Die Einflussfunktion am Anfang der Stütze (erstes Element, $l = 1,5m, x = 0m$) kann mit den folgenden äquivalenten Knotenkräften modelliert

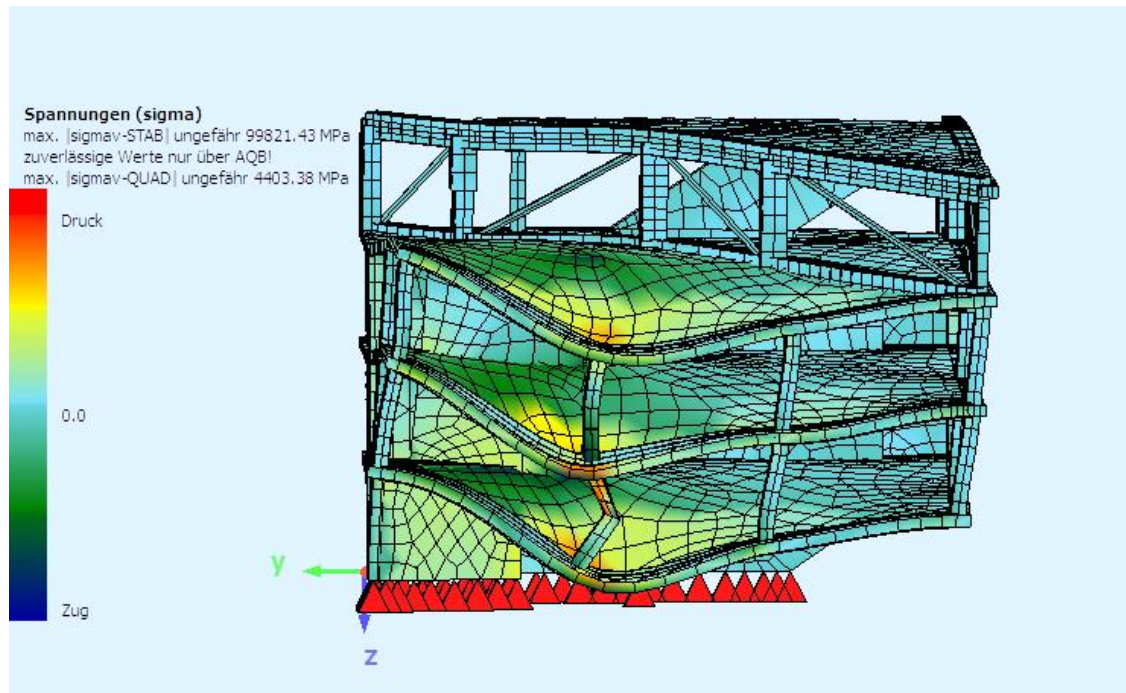


Abbildung 5.7: Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendeelträger-Stütze (Pos. S2.3)

werden

$$f_1 = 396200kN,$$

$$f_2 = -396200kNm,$$

$$f_3 = -396200kN,$$

$$f_4 = -198100kNm.$$

Die Einflussfunktion, die am Ende der Stütze (zweites Element, $l = 1,5m$, $x = 1,5m$) aufgebaut werden muss, wird mit den folgenden äquivalenten Knotenkräften modelliert werden

$$f_1 = -396200kN,$$

$$f_2 = 198100kNm,$$

$$f_3 = 396200kN,$$

$$f_4 = 396200kNm.$$

Aus der ersten Einflussfunktion (Anfang der Stütze) ist M_y an der zu untersuchenden Stelle (am Anschluss der Stütze (S3.3) am unterliegenden Unterzug) gleich $M_y^G = 37586kNm$, und aus der zweiten Einflussfunktion ist $M_y^G = 28415kNm$. Aus diesen zwei Werten kann eine Funktion über die Stützenlänge ermittelt werden

$$G_2[y](x) = -3057 \cdot x + 37586. \quad (5.8)$$

und aus dem Momentenverlauf des Lastfalls ‚Eigengewicht‘ können die Momenten in folgenden Funktion beschrieben werden

$$M(x) = -178,1 \cdot x + 246,3. \quad (5.9)$$

Setzt man die Beiden Funktionen in der Gleichung (4.43), so erhält man

$$\Delta M = -(-0,95) \cdot \int_0^3 \frac{(-178,1 \cdot x + 246,3)(-3057 \cdot x + 37586)}{0,05 \cdot 148575} dx$$

$$\Delta M = -107,31kNm.$$

Das Ergebnis kann auch mit Hilfe der Überlagerungstafel erreicht werden. Das Moment an dieser Stelle vor der Schwächung ist $M_y = -211,1kNm$, aus der Gleichung wird ein $M_y^c = -318,41kNm$ gerechnet. Nach dem Einbringen der Schwächung an der Stütze (S2.3) im Modell, ist die exakte M_y^c gleich $-301,5kNm$, und die Abweichung der Näherungsrechnung vom exakten Wert beträgt 5,52%.

Das Fachwerk hält den Virendeelträger, wenn die Lasten im Virendeelträger sich wegen die Schwächungen umlagern, hat diese Umlagerung eine Auswirkung auf die Lasten im Fachwerk. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle das Seil (Pos. X4.2) untersucht. Es werden zwei Einflussfunktionen in der Stütze (Pos. S3.3) eingesetzt,

und ihre Normalkraftwerte im Seil werden abgelesen. Die Normalkräfte im Seil sind $N^G = 88350kN$ aus der ersten Einflussfunktion, und $N^G = 55870kN$ aus der zweiten. Es wird einen linearen Verlauf zwischen den beiden Werten angenommen, und dieser Verlauf wird mit den linearen Momentenverlauf M_y in der vorher untersuchten Stütze (Pos. S3.3) überlagert. Der Momentenverlauf M_y in der Stütze (Pos. S3.3) ist linear und hat die Werte $300,3kNm$ und $-301,5kNm$, die Überlagerung wird an dieser Stelle mit Hilfe der Überlagerungstafel durchgeführt

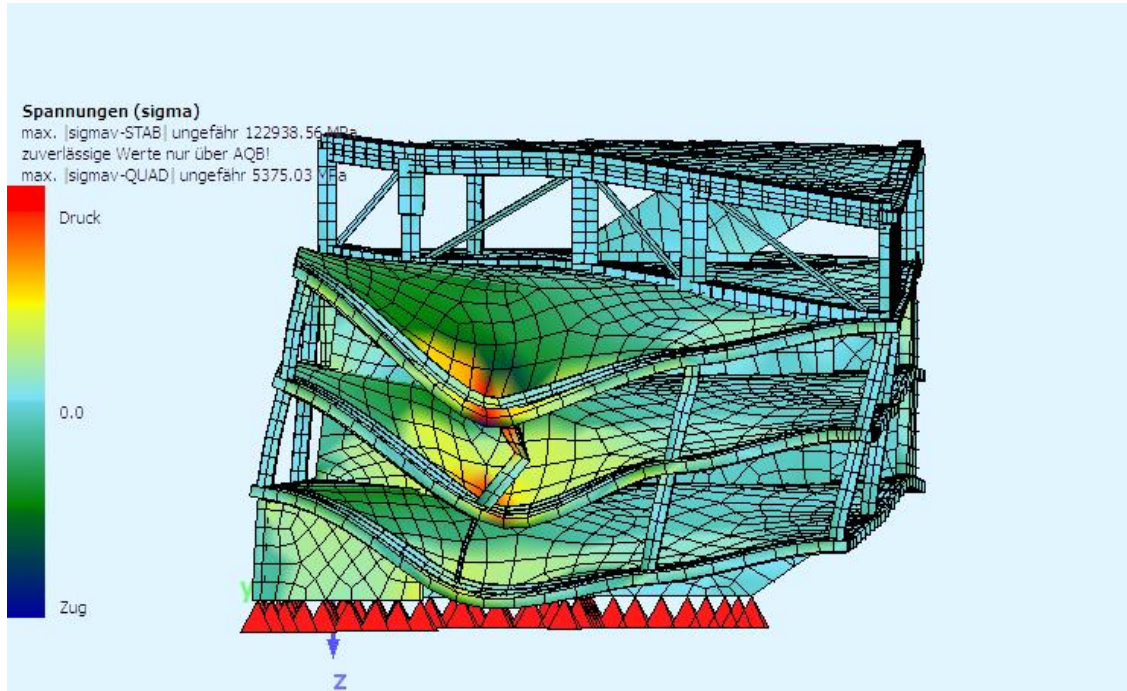


Abbildung 5.8: Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendeelträger-Stütze (Pos. S3.3) am 2-mal geschwächten System

$$\Delta N = \frac{-(-0,95) \cdot 3}{0,05 \cdot 8049720} \cdot \frac{-301,5 \cdot 55870 + 300,3 \cdot 88350}{3}$$

$$\cdot \frac{-301,5 \cdot 88350 + 300,3 \cdot 55870}{6} = 11,23kN,$$

$$\Delta N = N^c - N \rightarrow N^c = \Delta N + N = 11,23kN + 865,4kN = 876,63kN.$$

Nach Einbauen der Schwächung im FEM-Modell wird die exakte Normalkraft er-

mittelt und beträgt $N^c = 881,7kN$, also die genährte Rechnung weicht vom exakten Wert um 0,58%.

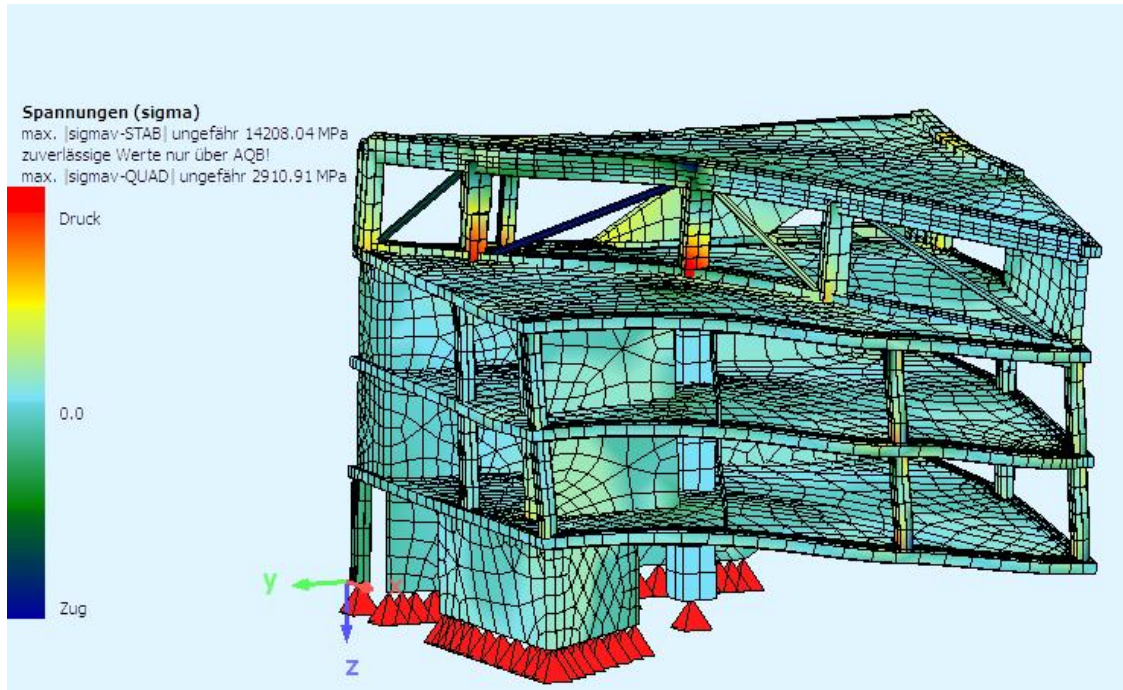


Abbildung 5.9: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.2) am 3-mal geschwächten System

Weiterhin wird es mit der Analyse die Änderungen in den Momenten im Fachwerkergurt (Pos. U4.2) gerechnet. Zuerst muss eine Einflussfunktion im Seil (Pos. X4.2) eingebracht, die M_y -Werte aus der Einflussfunktion wird an der zu untersuchenden Stelle abgelesen. Die Normalkraft aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ ist $N = 881,7kN$, aus der Einflussfunktion wird $M_y^G = -49224kNm$ ermittelt. Die Änderung an der untersuchten Stelle (oberhalb der Fachwerkstütze (Pos. S4.1)) ist

$$\Delta M_y = -(-0,95) \cdot 7,080m \cdot \frac{881,7 \cdot -49224}{1660705} = -175,78kNm$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M_y^c = \Delta M_y + M_y = -175,78kNm + -529,3kNm = -705,08kNm$$

Das exakte Wert von M_y an der zu untersuchten Stelle im Fachwerkergurt beträgt $M_y = -694,0kNm$, die Abweichung zwischen exakten und genährten Werten ist 1,6%.

An dieser Stelle wird die Berechnung des zweiten Ausfallszenarios gestoppt, im 4. Ausfallszenario (Abschnitt 5.2.4) werden die selben Schwächungen im System eingebracht, und die Änderungen in den Schnittgrößen werden ermittelt, die Schwächungen werden aber in umgekehrten Reihenfolge im System eingebracht.

5.2.3 Drittes Szenario

Im dritten Ausfallszenario wird mit den selben ersten Schwächung gerechnet, aber es wird die Auswirkung auf das Fachwerkseil (Pos. X4.1) betrachtet. Die Normalkraft aus der Einflussfunktion im betrachteten Fachwerkseil beträgt $N^G = -18989kN$, aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ ist die Normalkraft in der Hauptstütze $N^{LF} = -3467kN$. Somit wird die Änderung in der Normalkraft im Seil gerechnet

$$\Delta N \simeq -(-0,95) \cdot 1,5m \cdot \frac{-3467kN \cdot -18989kN}{0,05 \cdot 28309400kN} = 66,28kN.$$

$$\Delta N = N_c - N \rightarrow N_c = \Delta N + N = 66,28kN + 625,8kN = 692,08kN.$$

Nach dem Einbauen der Schwächung im FEM-Modell beträgt die exakte Normalkraft im Seil (Pos. X4.1) $N = 672,6kN$, und damit ist die Abweichung der genährten vom exakten Wert 2,9%. Im nächsten Schritt wird eine Einflussfunktion im Seil eingeführt, die ihre äquivalenten Knotenkräfte nach dem Verfahren im Abschnitt 5.2.1 gerechnet werden,

$$f_1 = \frac{-EA}{l} = -768311kN,$$

$$f_2 = \frac{EA}{l} = 768311kN.$$

Es werden die Auswirkungen einer Schwächung im Fachwerkseil (Pos. X4.1) auf das Fachwerkseil (Pos. X4.2) betrachtet, die Normalkraft aus der Einflussfunktion im Seil (X4.2) beträgt $N^G = 267200kN$, die Normalkraft aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ im Seil (Pos. X4.1) beträgt $672,6kN$. Es wird eine Schwächung um $\frac{\Delta EI}{EI} = 95\%$ untersucht, aus dieser Schwächung wird die Änderung in der Normalkraft im Seil (Pos. X4.2) nach Gleichung (5.6) gerechnet

$$\Delta N \simeq -(-0,95) \cdot \int_0^{4,323} \frac{672,6 \cdot 267200}{1660705} dx = 102,8kN$$

$$\Delta N = N_c - N \rightarrow N_c = \Delta N + N = 102,8kN + 847,1kN = 949,9kN.$$

Nach dem Einbauen der Schwächung im Seil (Pos. X4.1) beträgt die exakte Nor-

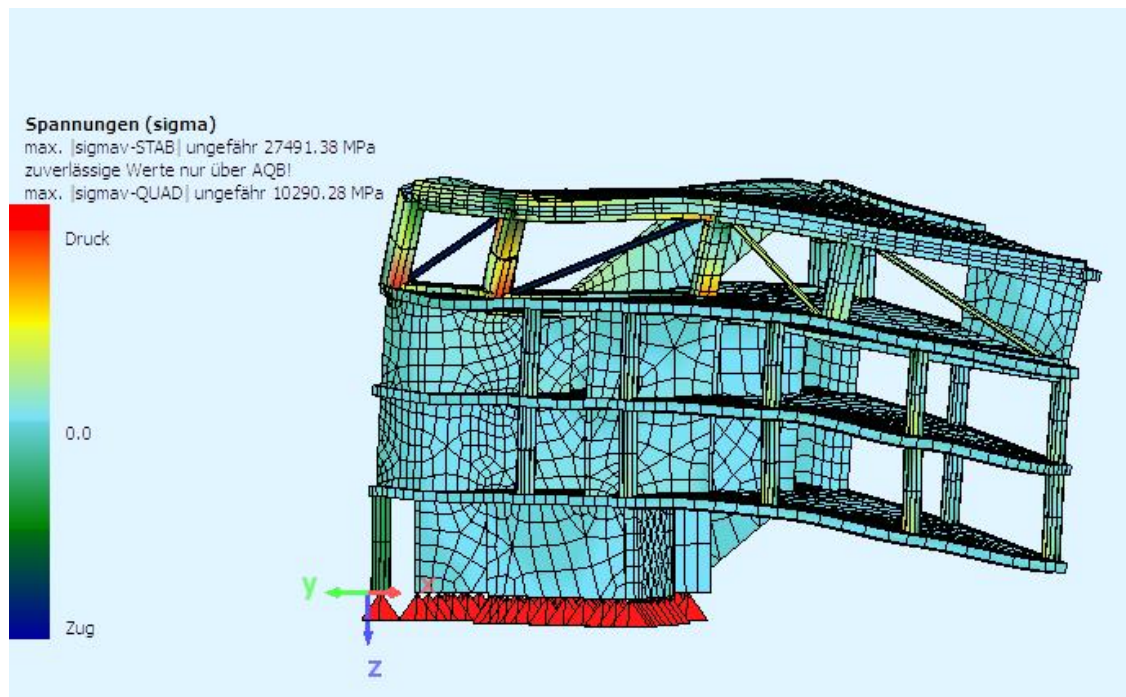


Abbildung 5.10: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.1) am 1-mal geschwächten System

malkraft im Seil (Pos. X4.2) $N_c^{LF} = 954,1 \text{ kN}$, die Abweichung zwischen exaktem Wert und genährtem ist 0,44%. Danach wird eine Einflussfunktion im Seil (Pos. X4.2) eingeführt, es werden die Auswirkungen einer Schwächung im Seil auf die Momente M_y in der Stütze (Pos. S4.2) des Fachwerks.

Die Werte des Momentes in der Stütze (Pos. S4.2) aus der Einflussfunktion betragen $M_y^G = -47003 \text{ kNm}$ an der Stelle $x = 0,0 \text{ m}$ und $M_y^G = 22576 \text{ kNm}$ an der Stelle $x = 3,0 \text{ m}$. Nach der Gleichung (5.7) betragen die Momente in der Stütze (Pos. S4.2) infolge der Schwächung

$$\Delta M_y = -(-0,95) \cdot 7,080 \cdot \frac{954,1 \cdot -47003}{1660705} = -181,63 \text{ kNm}$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M_y^c = \Delta M_y + M_y = -181,63 \text{ kNm} + -509,7 \text{ kNm} = -691,33 \text{ kNm}$$

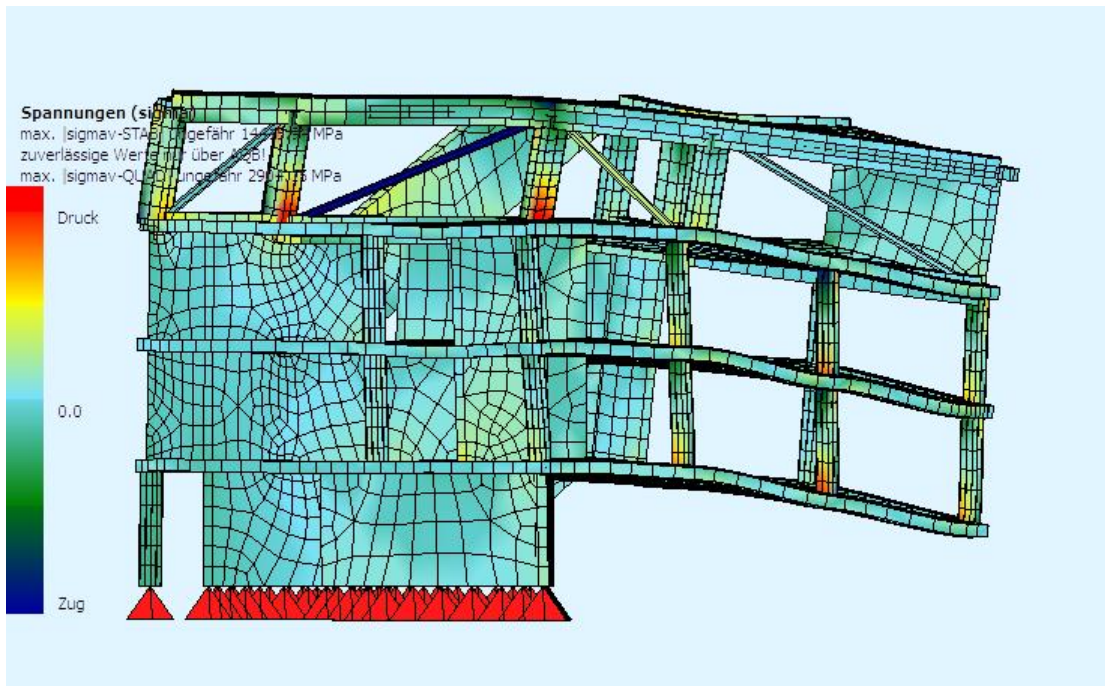


Abbildung 5.11: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.2) am 2-mal geschwächten System

an der Stelle $x = 0,0m$, und

$$\Delta M_y = -(-0,95) \cdot 7,080 \cdot \frac{954,1 \cdot 22576}{1660705} = 87,24kNm$$

$$\Delta M_y = M_y^c - M_y \rightarrow M_y^c = \Delta M_y + M_y = 87,24kNm + 241,0kNm = 328,42kNm$$

an der Stelle $x = 3,0m$. Nach dem einbauen der Schwächung im FEM-Modell betragen die exakten Momenten in der Stütze (Pos. S4.2) $M_y = -730,6kNm$ an der Stelle $x = 0,0m$ und $M_y = 395,4kNm$ an der Stelle $x = 3,0m$. Die Abweichungen zwischen genährten und exakten Werten sind 5,3% und 17%.

Danach wird eine Einflussfunktion G in der Stütze (Pos. S4.2) eingeführt, es wird an dieser Stelle eine N -Einflussfunktion eingeführt und ihre Werte im Gesamtsystem werden abgelesen. Die Werte aus der Einflussfunktion im Gesamtsystem sind klein, was bedeutet dass eine Schwächung in dieser Stütze kaum Auswirkung auf das Gesamtsystem hat. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle mit der Berechnung aufgehört, weil die Berechnung zu keinem weiteren Ausfall führen kann.

5.2.4 Viertes Szenario

In diesem Szenario werden die Auswirkungen mehrere Schwächungen im System auf die Hauptstütze betrachtet, es werden die Schwächungen im Abschnitt 5.2.2 in einer umgekehrten Reihenfolge, angefangen von einer Schwächung im Seil (Pos. X4.2) bis einer Schwächung in der Stütze (Pos. S2.3). Die Auswirkung auf die Hauptstütze wird dann ermittelt.

Zuerst wird eine Einflussfunktion im Seil (Pos. X4.2) eingeführt, und die Änderungen in M_y in der Stütze (Pos. S3.3) werden gerechnet. Die Normalkraft aus dem Lastfall ‚Eigengewicht‘ im Seil (Pos. X4.2) beträgt $N_{LF} = 1066kN$, und die M_y^G -Werte sind $23317kNm$ an der Stelle $x = 0,0m$ und $-19403kNm$ an der Stelle $x = 3,0m$. Die Momente in der Stütze (Pos. S3.3) nach der Berechnung sind $M_y^c = 250,4kNm$ an der Stelle $x = 0,0m$ und $M_y^c = -203,23kNm$ an der Stelle $x = 3,0m$, nach dem Einbauen der Schwächung im FEM-Modell betragen die exakte Momente in der Stütze (Pos. S3.3) $M_y^c = 250,1kNm$ und $M_y^c = -201,9kNm$. Die Abweichungen zwischen genährten und exakten Abweichungen sind $0,12\%$ an der Stelle $x = 0,0m$ und $0,66\%$ an der Stelle $x = 3,0m$.

Es wird dann die Auswirkung einer Schwächung in der Stütze (Pos. S3.3) auf die Stütze (Pos. S2.3) gerechnet, nach Einbringen der Einflussfunktion G_2 und die Änderungen gerechnet werden, betragen die Momente $M_y^c = 341,67kNm$ an der Stelle $x = 0,0m$ der Stütze (Pos. S2.3) und $M_y^c = -383,39kNm$ an der Stelle $x = 3,0m$ der Stütze. Nach dem Einbauen der Schwächung im FEM-Modell betragen die exakten Momenten $M_y^c = 306,8kNm$ und $M_y^c = -332,0kNm$, und die Abweichungen zwischen genährten und exakten Werten beträgt $11,37\%$ und $15,48\%$.

Es wird dann eine Einflussfunktion in der Stütze (Pos. S2.3) eingebracht, und die Änderungen in der Normalkraft in der Hauptstütze werden gerechnet. Die Normalkraft aus der Einflussfunktion in der Hauptstütze ist sehr klein und beträgt $1825kN$, es kann schon entnommen werden, dass die Änderung in der Normalkraft der Hauptstütze minimal sind. Nach der Berechnung sind die Normalkraftänderung in der Hauptstütze $\Delta N = -1,17kN$, die Normalkraft im geschwächten System sind

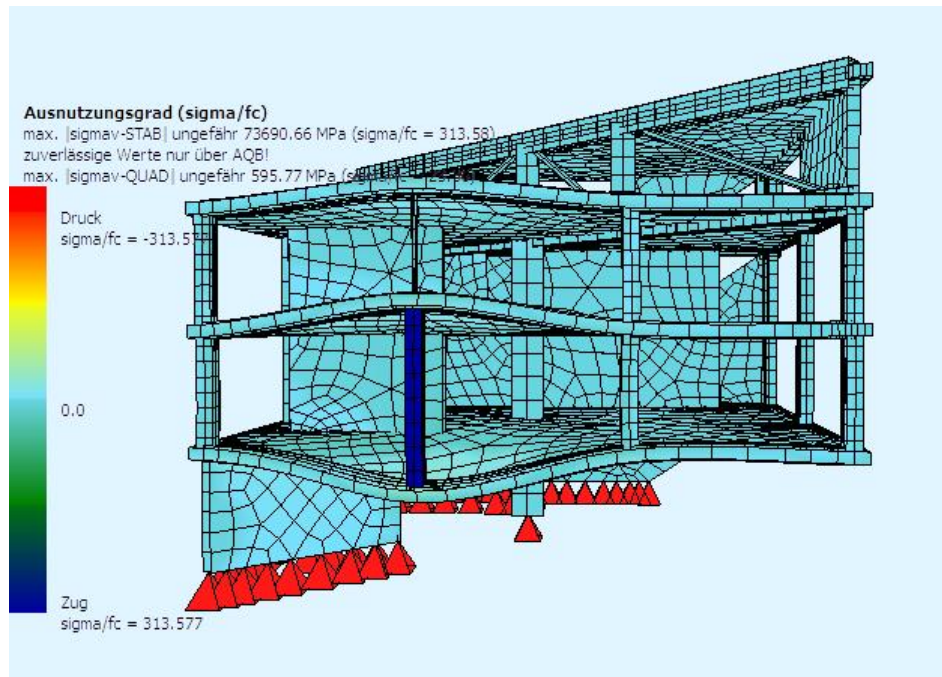


Abbildung 5.12: Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Stütze (Pos. S2.3) am 2-mal geschwächten System

$N_c = -3225,17kN$. Die exakte Normalkraft im System sind $N_c = -3261kN$, und die Abweichung zwischen genährtem und exaktem Wert beträgt 1,1%.

6 Maßnahmen zur Risikoreduzierung

Wie schon im Kapitel 3 erwähnt ist, dient die Tragwerk-FMEA zur Qualitätssicherung von Bauwerken, zur der gehört die Aufhebung bzw. Bearbeitung von möglichen Risiken im System. Der Umgang mit möglichen Risiken erscheint in vier Formen; Risiko vermeiden, vermindern, abwälzen oder übernehmen. Ein Risiko zu vermeiden bedeutet dass der Risikoeintritt verhindert werden muss. Ein Risiko zu vermindern bedeutet, die Risikoeintrittswahrscheinlichkeit zu vermindern, oder die Bedeutung des Risikos zu verkleinern. Ein Risiko zu übernehmen, bedeutet dass das Bauwerk auf das Risiko vorbereitet werden muss, so dass die Risikofolgen minimal bleiben. Aus der Umgangmethoden mit Risiken kann man zwei Maßnahmen ableiten, mit ihrer Hilfe eine Verbesserung des Entwurfs gegen Risiken möglich ist; Korrektive Maßnahmen und Präventive Maßnahmen. In diesem Kapitel werden die Maßnahmen im Allgemeinen Form beschrieben werden, und danach werden die durchzuführenden Maßnahmen auf das Bürogebäude X behandelt.

Die Maßnahmen zur Risikoreduzierung werden angewendet, bis eine vorher festgelegte Risikogrenze für RPZ nicht überschritten wird. Bei Bauwerken ist die Erarbeitung einer systematischen Methode zur Risikoreduzierung fast unmöglich, da jedes Bauwerk ein Unikat ist. Die Schwierigkeit der Tragwerk-FMEA liegt dabei, dass die Bedeutung des Fehlers bzw. der Fehlerfolgen entlang des Lastabtrags bestimmt werden muss. Die Bestimmung der Bedeutung ist in vielen Fällen nicht trivial, und

zum Teil durch Rechnungen erst möglich.

Die mögliche Fehlerursachen in Tragwerken sind im Abschnitt 3.2 in fünf Kategorien unterteilt werden, weitere Fehler können aus den folgenden Gründen auftauchen (vgl.[del09, S. 12]);

- Übertragungsfehler,
- blinde Programmanwendung,
- nicht ausführbare Anschlüsse,
- die klassische Rechnung gegen 3D-Rechnung.

Die Tragwerk-FMEA hilft der Tragwerkplanern und Ingenieuren Fehler im System zu Entdecken und zu beheben, die Tragwerk-FMEA soll nach der Leistungsphase durchgeführt werden, um die Kosten der Fehlerbehebung möglichst niedrig zu halten (Abbildung 6.1).

Die verschiedenen Maßnahmenarten dienen zur Haltung der RPZ in vorher festgelegten Grenzen, die RPZ-Grenzen können in der FMEA-Sitzung oder von Experten definiert werden. Die Bedeutung der Fehlerfolgen (B) kann in Anlehnung an die Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5) in der FMEA-Sitzung bestimmt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) müssen von Experten, die in der FMEA-Setzung teilnehmen können, bestimmt werden. aus der Tragwerk-FMEA werden Maßnahmen abgeleitet, die präventiv sind, korrektive Maßnahmen sind Änderungen im Tragkonzept, sie dienen zur Verbesserung des Lastabtrags.

Nach der Befragung von Ingenieurbüros [del09] werden spezifische Merkmalen, wie z.B. die Robustheit und kritische Stelle, intuitiv ermittelt, diese Intuition kann zu Abweichungen in der Gefährdungsklasse des Bauwerks bzw. in der Fehlerfolgengenermittlung durchführen. Systematische Ermittlung der Robustheit ist im [Vog09b] präsentiert, kritische Stellen können mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse bestimmt werden, und dann in einer FMEA-Setzung können die mögliche Maßnahmen zur Risikoreduzierung besprochen werden. Eine systematische Vorgehensweise ist von

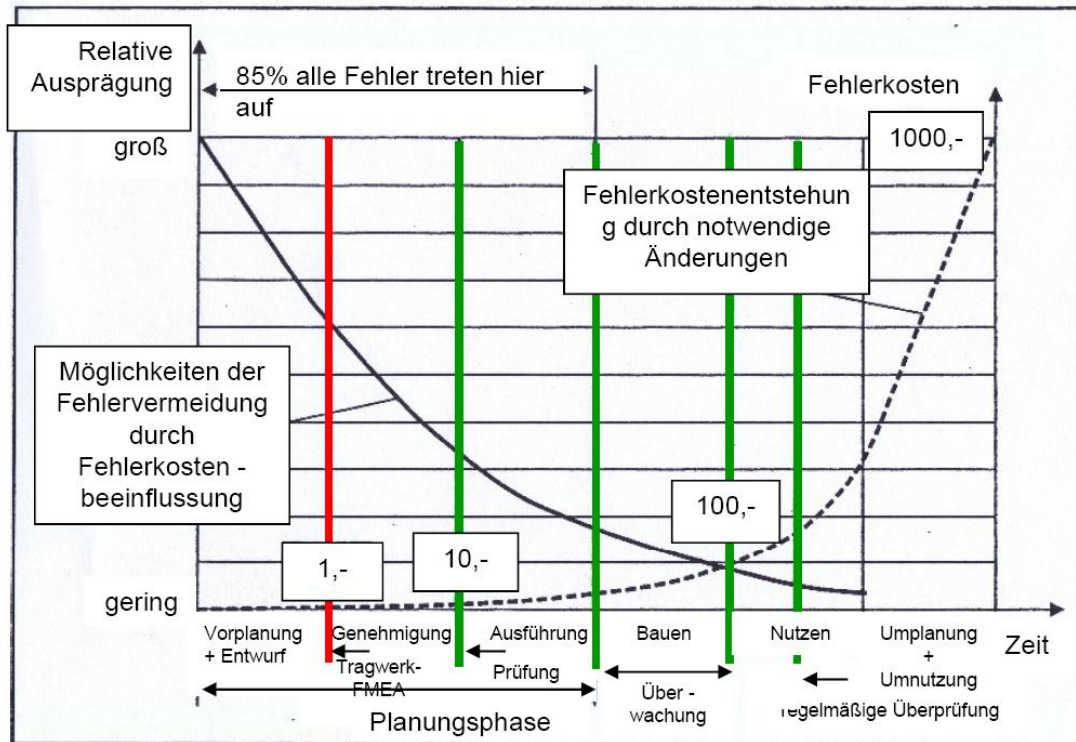


Abbildung 6.1: Aufwandsvergleich der Fehlerbehebung in verschiedenen Lebensdauerphasen [del09, S. 6]

wichtiger Bedeutung, da jedes falsch ermittelte Wert riesige Auswirkung auf das gesamte hat.

6.1 Korrektive Maßnahmen

Unter korrektive Maßnahmen sind die Maßnahmen zur Verbesserung des Lastabtrags des Tragwerks zu verstehen. Sie sind Änderungen in dem Tragkonzept um den Lastfluss zu beeinflussen, so dass Bauteile nicht überlastet und evt. ausfallen werden. Die Änderungen sind entweder in den Querschnitten bestimmter Bauteile oder in der Tragkonzept bestimmtes Tragelements wie z.B. ein Fachwerk oder Virendeelträger. Um das Ziel zu erreichen, können diese Maßnahmen mehrere Herangehensweisen haben, der Tragwerkplaner kann die Steifigkeit bestimmte Tragelemente erhöhen oder neue Tragelemente hinzufügen.

Für das Bürogebäude X spielt das Fachwerk eine große Rolle in dem Lastabtrag, nach dem 3. ausfallszenario (Abschnitt 5.2.3) war es zu merken, dass der Ausfall des Seils (Pos. X4.1) große Auswirkung auf die Stützen neben an hat. Das Fachwerk hält den virendeelträger von der Mitte hoch, ein Versagen dieses Anschlusses (Fachwerk-Virendeelträger) hat die Folgen, dass die Verformungen im Virendeelträger und auch die ausgekragten Decken sehr hoch sein werden, dass die Glasscheiben aus der Fassade rausfliegen werden. Um die Verformungen in dem virendeelträger in gute Grenzen zu halten (Gebrauchstauglichkeit) kann die Steifigkeit des Fachwerks erhöht werden. Die Erhöhung der Fachwerksteifigkeit erfolgt indem man die Steifigkeit der einzelnen Elementen ändert, oder einen neuen Entwurf zu schaffen. Eine gute systematische Methode um die korrektive Maßnahmen zu bestimmen, liegt in der Darstellung des globalen Lastabtrags, man könnte später ein neues Element hinzufügen, und die Auswirkungen auf das gesamte Lastabtrag bestimmen. Die Darstellung des globalen Lastabtrags ist auch wichtig um die Auswirkung des Ausfallens eines Elementes zu kontrollieren, und später zu korrigieren. Wichtig bei der korrektive Maßnahmen ist; die frühzeitige Entdeckung der Gefährdung, die Absprache mit Projektbeteiligten und eine dokumentierte Kontrolle der Berechnung bzw. Anschlüsse.

6.2 Präventive Maßnahmen

Unter präventive Maßnahmen sind die Maßnahmen gelistet, die zum Risikovermeiden bzw. Risikovermindern dienen. Diese Maßnahmen sind die Ergebnisse der FMEA-Sitzung um die Risikoprioritätszahl (RPZ) in einer vorher festgelegten Grenze zu halten. Der Umfang dieser Maßnahmen leitet sich von der Umfang der durchzuführenden Tragwerk-FMEA her, und können entweder von Experten oder firmenintern vorgeschlagen werden. Sie verbreiten sich von Rechnungsmethoden bis zu Absprache mit Projektbeteiligten. in [del09] sind mehrere Maßnahmen zur Prävention von Risiken vorgestellt, die als Ergebnis einer durchgeführten Befragung sind.

Präventive Maßnahmen zur Fehlerreduzierung in der Rechnung

- Die Rechnung in zwei Programmen durchzuführen
- Überschlagrechnung per Hand, um die Ergebnisse aus FEM-Programmen zu kontrollieren
- Keine 3D-Modelle, die extreme unübersichtlich sind
- klassische Verfahren (System in Teilelementen Teilen und 2D-Rechnung) gegen 3D-Rechnung

Präventive Maßnahmen in der Planungsphase

- Frühzeitige Abstimmung zwischen Architekt und Statiker
- Regelmäßige Projektabsprache zwischen den Beteiligten
- Einhaltung der Abläufe nach der HOAI
- Die Darstellung eines gesamten Lastabtrags
- Skizzieren alle wichtige Anschlüsse und Besprechung der Ausführbarkeit dieser anschlüsse

- Keine Blinde Anwendung der DIN-Normen
- Befragung von Experten in kritischen Punkten

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt dich mit dem Thema ‚Tragwerk-FMEA‘. Das Hauptgewicht der Arbeit liegt in der Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung von Ausfallszenarien und Änderungen in den Schnitt- bzw. Weggrößeninfolge eines Fehlers im System. An dieser Stelle bietet die Sensitivitätsanalyse eine gute systematische Methode um die Risikoprioritätszahl (RPZ) zu bestimmen. In der FMEA soll die RPZ zwischen vordefinierten Grenzen liegen, so stellt dieses bestimmtes Risiko kein Gefahr für das System. Wenn aber die RPZ diese Grenzen überspringt, sollen Maßnahmen zur Risikoreduzierung ergriffen werden.

Zuerst wurde in dieser Arbeit die wichtigen Merkmale und Begriffe der FMEA erläutert. Der Zusammenhang dieser Begriffe und die daraus resultierende Klassifizierung der Tragwerke wurde behandelt. Da nicht alle Tragwerke den selben Rechenaufwand besitzen, ist es hier auch zu verstehen, dass der Umfang der durchzuführenden FMEA variiert. Die Robustheit des Tragwerks spielt eine große Rolle gegenüber die Einwirkungen und mögliche Teilsystemversagen.

Im nächsten Kapitel wurden zuerst die Grundlagen der klassischen Statik erklärt, es wurden der ‚Satz von Betti‘ und die ‚Green’sche Identitäten‘ behandelt, danach sind die Einflussfunktionen und ihre Erzeugung beschrieben, danach ist die kurz die Finite Elemente Methode behandelt worden, und der Zusammenhang zwischen Einflussfunktionen und der Berechnung mit der FE-Methode wurde dargestellt. Im Anschluss daran ist der Herleitung der Formel der sensitivitätsanalyse, sie basiert

auf Basis der Gleichgewicht der virtuellen inneren und äußeren Arbeiten

$$\delta A_i = \Delta A_a.$$

Im Kapitel 5 wurde die Sensitivitätsanalyse am Beispiel ‚Bürogebäude X‘ angesetzt. die aus der Rechnung resultierenden genährten Werten wurden mit den exakten Werten aus dem FEM-Programm ‚SOFiSTiK‘ verglichen. Es wurden 4 verschiedene Ausfallszenarien mit Hilfe der Methode bestimmt und analysiert.

Im letzten Kapitel sind die zuergreifenden Maßnahmen zu Risikovermeidung dargestellt, diese Maßnahmen sind in den HOAI-Leistungsphasen 2 bzw. 3 anzusetzen. Die frühzeitige Entdeckung eines Risiko ist von wichtiger Bedeutung, da je früh ein Risiko bekannt ist, desto billiger und wirtschaftlicher seine Auswirkungen zu vermeiden sind.

Mit der Methode der Sensitivitätsanalyse wird erhofft, dass die Bestimmung des Fehlers bzw. der Fehlerauswirkung auf das Gesamtsystem in der Planungsphasen einfacher gemacht wird.

8 Ausblick

In der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Anwendungsbeispiel der Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der Auswirkung von lokalen Fehlern auf das Gesamtsystem dargeboten. Dieses Verfahren basiert auf den Einflusslinien, die man in einem FEM-Modell darstellen kann. Die weitere Entwicklung dieser Methode, damit man ein Ausfallszenario am Ausgangssystem bestimmen kann, ohne dass das Ausgangssystem geschwächt werden muss, wird angestrebt.

Ein guter Statiker bzw. Tragwerkplaner kann die Schwachstellen einer Struktur sofort mit den Augen wahrnehmen, was ein FEM-Programm nicht kann. Es wird hier eine neue Generation von FEM-Programmen erhofft, die diese Stellen wahrnehmen können. Die Komplexität der 3D-Berechnung, die zurzeit häufiger eingesetzt wird, nimmt immer zu, was die Prüfung dieser Berechnungen erschwert. Mit Hilfe der Tragwerk-FMEA können mögliche Fehler bereits in der Planungsphase festgestellt werden, und ohne hohen Kosten behoben werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	2D-Modell des Fachwerks.	6
2.2	das Virendeelträger auf eine Ebene dargestellt.	6
2.3	FEM-Modell des Bürogebäudes.	7
2.4	Schema des vertikalen Lastflusses.	8
2.5	Positionsplan 1/2 [Vog09a].	10
2.6	Positionsplan 2/2 [Vog09a].	11
2.7	Bürogebäude X: Ansicht ,1' mit Positionen [Vog09a].	12
2.8	Bürogebäude X: Ansicht ,4' mit Positionen [Vog09a].	13
2.9	Bürogebäude X: Grundriss 1. OG [Lie09]	14
2.10	Bürogebäude X: Grundriss 2. OG [Lie09]	14
3.1	Grundsätzliches vorgehen bei der Tragwerk-FMEA aus [del09, S.7].	16
3.2	Concequence Classes nach [EUR02]	17
3.3	Gefährdungsklassen nach Dressel. ¹	18
3.4	Formblatt zur Fehlerbewertung nach [DIN06].	22
3.5	Robustheitsklassen für Bauwerke nach [E.V08]	23
4.1	Ermittlung der Durchbiegung an einem gelenkig gelagerten Balken auf starren Lagern mittels Einflussfunktion.	30
4.2	Alle möglichen Biegelinien, die ein FE-Programm darstellen kann, liegen in der endlichen dimensional V_h , die in V liegt.	32

4.3	Oben: Die äquivalenten Knotenkräfte für die FE-Querkraft in der Balkenmitte. Unten: Rot zeigt die exakte Lösung, blau die FE-Lösung.	36
5.1	Vorgehensweise bei der Tragwerkanalyse	44
5.2	Bürogebäude: Lastfall ‚Eigengewicht‘	45
5.3	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Hauptstütze	47
5.4	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkstütze (Pos. S4.2)	48
5.5	Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendeelträger-Stütze (Pos. S3.5)	51
5.6	M_y -Verlauf im Virendeelträger aus Einflussfunktion N in der Hauptstütze	52
5.7	Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendeelträger-Stütze (Pos. S2.3)	54
5.8	Bürogebäude: Einflussfunktion für M_y in der Virendeelträger-Stütze (Pos. S3.3) am 2-mal geschwächten System	56
5.9	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.2) am 3-mal geschwächten System	57
5.10	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.1) am 1-mal geschwächten System	60
5.11	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Fachwerkseil (Pos. X4.2) am 2-mal geschwächten System	61
5.12	Bürogebäude: Einflussfunktion für N in der Stütze (Pos. S2.3) am 2-mal geschwächten System	63
6.1	Aufwandsvergleich der Fehlerbehebung in verschiedenen Lebensdauerphasen [del09, S. 6]	67

Literaturverzeichnis

- [AO10] Al Otaibi, W. Kh. A., Takunov B.: *Überführung eines 3D- in ein 2D-Modell*. Projektarbeit. Universität Kassel, 2010.
- [Car04] Carl, O.: *Sensitivitätsanalyse mit Einflussfunktionen*. Diplomarbeit, Universität Kassel, 2004.
- [del09] *FMEA Deliverable 1 - Zielspezifikationen*, 2009. http://www.tragwerk-fmea.de/fileadmin/config/_fmea/docs/Zielspezifikation.pdf.
- [del10] *FMEA Deliverable 2 - Fallstudien mit Referenzbeispiel*, 2010. http://www.tragwerk-fmea.de/fileadmin/config/_fmea/docs/Fallstudien.pdf.
- [DIN05] *DIN 1055-4:2005-03, Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten*, 2005.
- [DIN06] *DIN EN 60812:2006; Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandart- 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.

- [EUR02] *EN 1990, Deutsche Fassung DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerkplanung*, 2002.
- [E.V08] E.V., VEREIN DEUTSCHE INGENIEURE: *Entwurf der VDI-Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung*. VDI-Gesellschaft Bautechnik, 2008.
- [Grä02] Grätsch, T.: *L₂-Statik*. Dissertation, Universität Kassel, 2002.
- [Har85] Hartmann, F.: *The Mathematical Foundation of Structural Mechanics*. Springerverlag, Berlin, 1. edition, 1985.
- [Har07] Hartmann, F., Katz C.: *Structural Analysis with Finite Elements*. Springerverlag, Berlin, 2. edition, 2007.
- [HOA09] *HOAI; Honorarordnung für Architekten und Ingenieure*, 2009.
- [Kun09] Kunow, T.: *Modellfehler und Greensche Funktionen in der Statik*. Dissertation, Universität Kassel, 2009.
- [Lie09] Liening, D.: *Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten FMEA*. Diplomarbeit, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, 2009.
- [Lin02] Link, M.: *Finite Elemente in der Statik und Dynamik*. Teubnerverlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 3. Auflage, 2002.
- [MBO] *Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002*.
- [Mes99] Meskouris, K., Hake E.: *Statik der Stabtragwerke*, Einführung in die Tragwerkslehre. Springerverlag, Berlin, 3. Auflage, 1999.
- [Vog09a] Vogt, T.: *Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien*. Projektarbeit. Universität Kassel, 2009.
- [Vog09b] Vogt, T.: *Erarbeitung eines Leitfadens zur Anwendung der Fehlerzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) für Tragwerke*. Masterarbeit. Universität Kassel, 2009.

- [Wer08] Werckle, H.: *Finite Elemente in der Baustatik*. Viewegverlag, Wiesbaden, 3. Auflage, 2008.