

Für die Untersuchung von Konstruktionen wird immer mehr der Computer verwendet. In dieser Veröffentlichung soll ein Weg beschrieben werden, um einen leichten Rahmen einer Typenhalle wirklichkeitsnah mit einem Finite-Elemente-Programm zu analysieren. Dabei werden verschiedene System- und Randbedingungen (u.a. Imperfektionen, Lagerung) variiert und der jeweilige Einfluss auf die Traglast ermittelt.

FE-Modelling of a lightweight Frame. *The computer is more and more used to analyse the behaviour of structures. A lightweight frame - closed to the reality - is analysed by the help of a FE-programme. Therefore different system and boundary conditions (e.g. imperfections, supports) will be varied and the resulting influences to the ultimate load are determined.*

1 Einleitung

In der letzten Zeit ist eine Tendenz deutlich: Um sich aufwendige Versuche an Hallenrahmen zu ersparen, versucht man durch Computersimulationen - so wirklichkeitsnah wie möglich - Tragverhalten und Gebrauchstauglichkeit zu erfassen. Voran gehen Lösungen, bei denen es besonders auf ein Höchstmass an Wirtschaftlichkeit ankommt - die Typenhallen.

Die Tragwerke der untersuchten leichten Stahlhallenbauten sind klar strukturiert. Mehrere Hallenrahmen werden durch Pfetten und Wandriegel miteinander verbunden und durch Verbände ausgesteift. Als kompakteres Teilsystem bot sich in diesem Fall der Einzelrahmen für die Modellierung an (Bild 1).

Er besteht im vorliegenden Fall aus geschweißten und gevouteten Stützen und Riegeln, deren Profilblechdicken sich ändern. Die Verbindungen der einzelnen Rahmenteile sind gleich; sie wurden als geschraubte Kopfplattenstöße ausgeführt.

Beim Zweigelenrahmen sind die Stützenfüße unverschieblich und gelenkig gelagert, nur die Verdrehungen der Stabachse wird gehalten. Die Verschiebungen senkrecht zur Rahmenebene werden durch Pfetten- und Wandriegelauflager verhindert. Die Ausbildung dieser Lager wird entsprechend der Einbettung in das Gesamtsystem variiert.

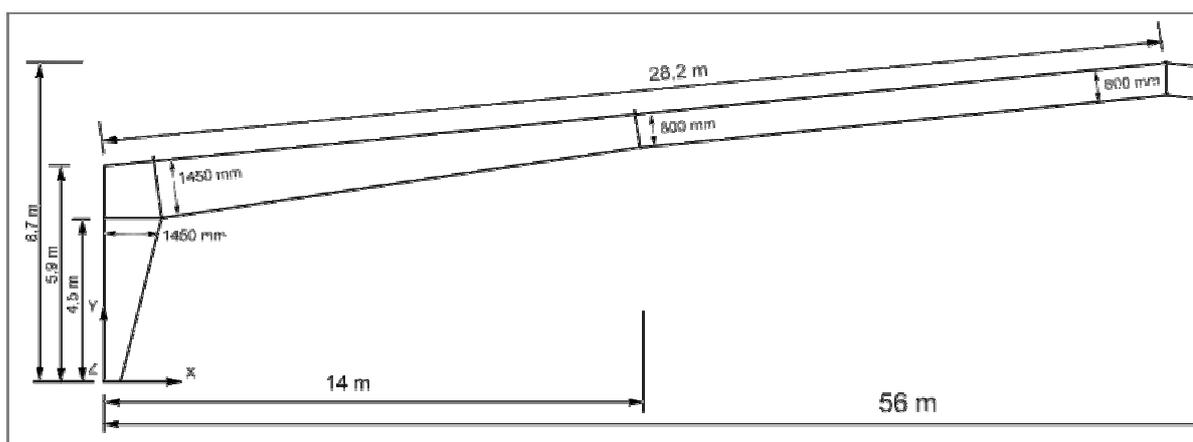


Bild 1 - Einzelner Hallenrahmen für die FE- Modellierung

2 Rahmenmodelle

Bei der Computer unterstützten Modellierung von Baukonstruktionen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Bauteile in das jeweilige Programm einzugeben. Von der einfachsten

Variante, der Definition der Eck- und Stabknoten, bis hin zur vollständigen und geometrisch äquivalenten Abbildung aller Einzelteile.

Bei den herkömmlichen Stabwerksprogrammen kann die Bauwerksstruktur durch einzelne Stäbe mit den entsprechenden Querschnittswerten dargestellt werden. Dabei unterteilt man das System in einzelne Bauteile und setzt an den Verbindungspunkten die Knoten an. Danach weist man den Abschnitten einen Stab mit einer bestimmten Querschnittsform zu. Die Stäbe zwischen den Anfangs- und Endknoten können bei modernen Programmen auch veränderliche Querschnitte besitzen. Damit können gevoutete Profile oder sogar Blechdickenvariationen erzeugt werden. Diese Parameter werden dann in der Berechnung berücksichtigt, indem intern entsprechend viele Unterstäbe generiert werden, denen dann die jeweiligen Parameter zugewiesen werden.

Diese Zerlegung der Hauptelemente findet auch bei FE-Programmen statt. Dort können neben Stabelementen auch Flächen- und Volumenelemente für die Modellierung verwendet werden (Bild 2).

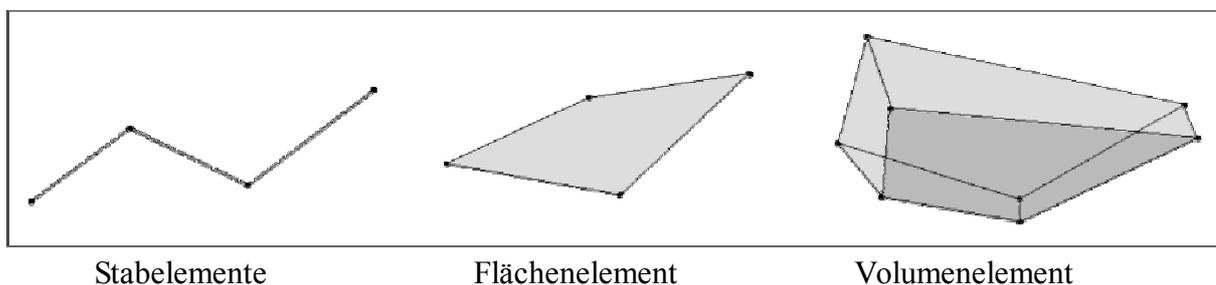


Bild 2 - Elemente für die FE-Modellierung

Bei Stäben beziehen sich alle Größen auf die Schwerpunktsachse. Die relevanten Querschnittswerte werden dann im Nachgang entsprechend umgerechnet. Dabei bleibt der Querschnitt eben und die Verwölbungen unbestimmt. Um genauer zu rechnen, müssen Elemente zwei bis drei Dimensionen besitzen.

Bei einem Tragwerk aus Profilen, deren Bleche eine gleichbleibende Dicke besitzen, können Schalenelemente zur Modellierung verwendet werden (Faltwerk). Man sollte dabei aber beachten, dass die Elemente 6 definierte Freiheitsgrade besitzen.

Die Verwendung von Volumenelementen ist in diesem Fall nicht ratsam, weil zum einen die Modellgröße enorm zunimmt und zum anderen die Rechengenauigkeit in der Dickenrichtung der Bleche nicht so exakt ist, wie bei der Extrapolation der Schalenelemente.

3 Modellgenerierung

Die FE-Berechnungen erfolgen mit dem Programmpaket ABAQUS 5.6 [1]. Um das Rahmenmodell berechnen zu können, müssen zunächst alle Profile maßstabsgerecht und exakt als Faltwerk eingegeben werden.

3.1 Geometrie

Nachdem das Projekt angelegt wurde, kann die Geometrie der Bauteile eingegeben werden. Dabei erzeugt man verschiedene Layer, um einzelne Bereiche für sich besser bearbeiten zu können. Um die Bleche der Profile als Schalenelemente zu modellieren, müssen die entsprechenden einzelnen Geometrieflächen erzeugt werden (Bild 3).

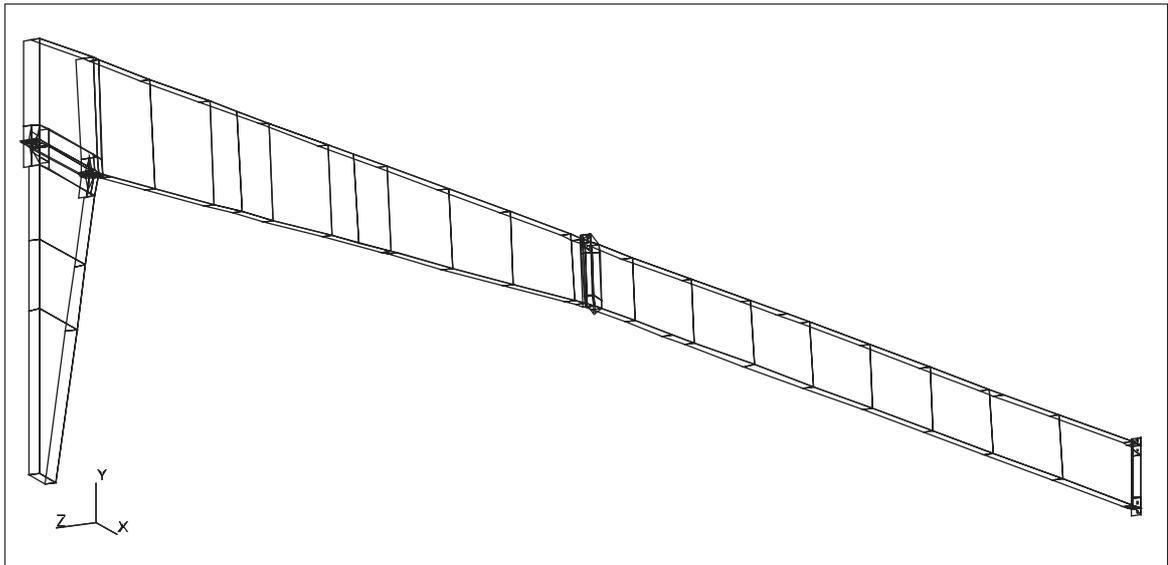


Bild 3 - Geometrie des linken Rahmenviertels

Die Abmessungen sind durch die Blecheigenschaften gegeben, Lage und Dicke sollten innerhalb einer Fläche konstant bleiben. Bei der Geometrieingabe muss schon die FE-Aufteilung durchdacht werden, damit keine Komplikationen bei der Netzgenerierung entstehen. Gegebenenfalls lässt man komplizierte Bereiche wie Kopfplattenverbindungen aus und entwickelt die entsprechenden Lösungen parallel mit der FE-Netzerstellung.

Zur Eingabevereinfachung sollte bei der Modellierung nach Systemsymmetrien gesucht werden, um nur den einen Teil sequenziell und den anderen durch entsprechende Transformationen zu generieren oder durch entsprechende Lager zu simulieren.

3.2 Finite Elemente

Die Geometriedaten sind die Voraussetzung für das Spannen eines FE-Netzes über die einzelnen Stahlprofile. Das Netz besteht bei den Blechen aus 4-Knoten Schalenelementen "S4R".

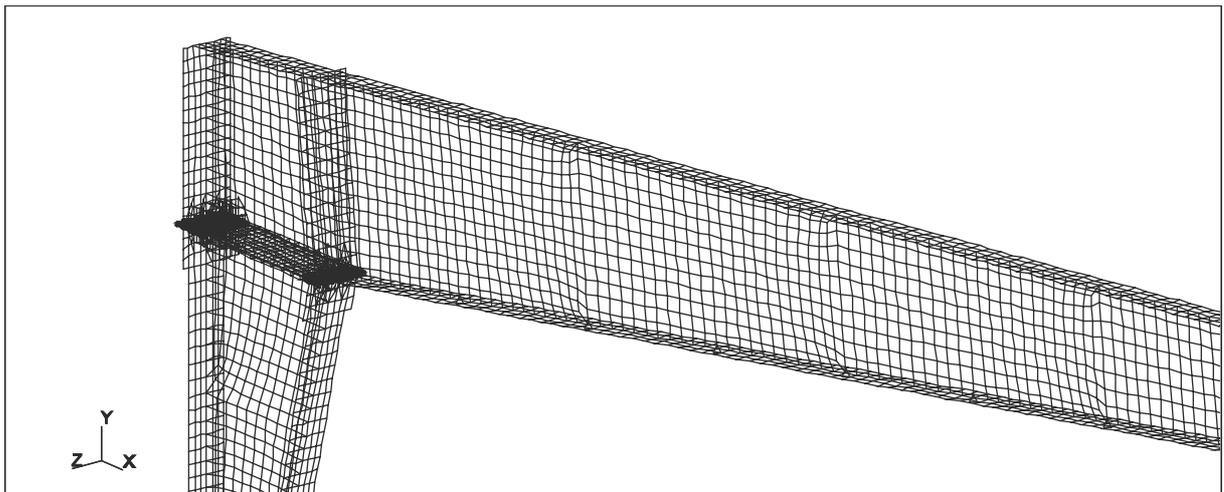


Bild 4 - FE-Netz der linken Rahmenecke

Die Elementgröße ist vom zu modellierenden System abhängig. Es sollten nicht unnötig viele Elemente aber auch nicht zu wenig erzeugt werden. In dem Beispiel wurde die Elementgröße von 100mm*100mm angestrebt (Bild 4). Das Netz wurde zur genaueren Berechnung bei Bereichen mit zu erwartenden Spannungsspitzen (Kopfplattenlöcher) noch verfeinert. Bei der Netzerzeugung ist darauf zu achten, möglichst nur einen Elementtyp zu verwenden. Bei

Viereckelementen müssen deshalb immer eine gerade Anzahl an Nodes (Knoten) die Geometrie fläche umgrenzen. Aus diesem Grund sind bei Verjüngungen des Querschnitts an den Absätzen die Node-Anzahl um 2 zu verändern. Der Abstand der Absätze wird bei der Geometrie eingabe festgelegt. Eine vollkommen automatische Vernetzung ist nicht so gleichmäßig.

3.3 Kopfplattenverbindung

Auf die Ausbildung der Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen muss besonders geachtet werden. Erst durch sie kann die Rahmenwirkung in der Berechnung so exakt wie möglich berücksichtigt werden.

Die Verbindung zwischen den zwei Stirnplatten wird mittels Volumen- und Stabelementen realisiert. Die Schrauben übertragen die Zugkräfte aus der Momentenbeanspruchung des Stoßes und die Querkräfte in der Plattenebene zwischen den angeschlossenen Profilen. Für die Schraubenlöcher muss das FE-Netz perforiert und entsprechend verfeinert werden (Bild 5).

In das isometrische Netz aus Viereckelementen wurden die extra modellierten Lochnetze eingesetzt. Als Bezugspunkte dienten dabei der Knoten in der Schraubenachse beim Ausgangsnetz und der Mittelpunkt des Lochnetzes. Anschließend mussten die 4 Elemente um diesen Bezugspunkt gelöscht und die freien Randknoten des Ausgangsnetzes mit den entsprechenden Randknoten des Lochnetzes verbunden werden.

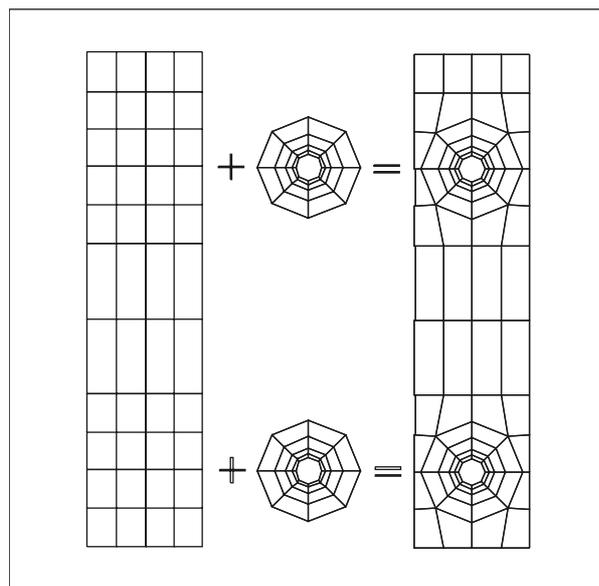


Bild 5- Entwicklung einer Kopfplattenhälfte

Die Schrauben wurden als Volumenelemente (C3D6 8-Knoten Prisma) modelliert (Bild 6). Um die Übertragung der großen Zugkräfte auf die Stirnplatten zu sichern, wurden die Kontaktflächen zwischen Schrauben und Kopfplatte im Verhältnis zu vorangegangenen Modellen vergrößert. Anfangs wurde ein Zylinder generiert, der nur am Lochrand der Kopfplatte Kontakt hatte. In diesem Modell wird auch die Kreisringfläche am Kopf und an der Mutter einer Schraube berücksichtigt.

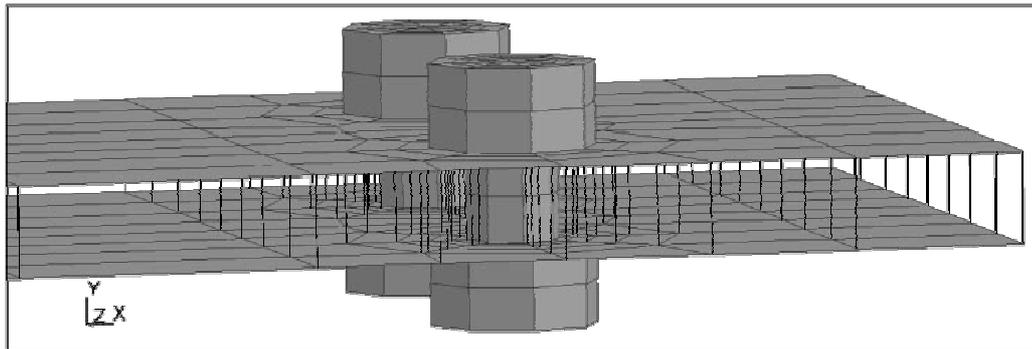


Bild 6 - Kopfplattenverbindung mit Schrauben und Federn

Die Federelemente sind ausschließlich für den Kontakt zwischen den Stirnplatten modelliert worden. Von ihnen werden keine horizontal zur Plattenebene verlaufenden Kräfte, sondern nur die vertikalen Druckkräfte aufgenommen. Sie wirken zusammen wie eine Gleitfläche. Jeder FE-Punkt ist mit seinem entsprechenden Gegenüber über einen gelenkig angeschlossenen Stab mit einer nichtlinearen Federsteifigkeit (bei Druck sehr steif; bei Zug unwirksam) verbunden.

Zur FE-Modellierung der Kopfplattenverbindung muss noch gesagt werden, dass die Lochleibungskräfte auch als Zug übertragen werden. Der Schraubenschaft ist am gesamten Umfang kraftschlüssig mit dem Stirnplattenblech verbunden. Diese Vereinfachung hat keinen großen Einfluss auf das Beispielmodell, wird aber künftig näher untersucht.

4 Randbedingungen

Mit den Randbedingungen werden strukturellen Eigenschaften der generierten Elemente festgelegt und das Modell in das umgebende System eingebunden. Dabei kommt es darauf an, das Materialverhalten exakt einzugeben und die Anschlüsse so realistisch wie möglich nachzubilden. Die Belastung muss entsprechend des realen Kraftverlaufs, von der lastaufnehmenden Bauwerkshülle bis zum Fundament, auf den Einzelrahmen angesetzt werden. Durch die Komplexität des gesamten Bauwerksverhaltens können die Randbedingungen für den Einzelrahmen nur wirklichkeitsnah modelliert werden.

4.1 Materialkennwerte

Die Materialkennwerte sind entsprechend der DIN EN 10025 mit den Bemessungswerten angesetzt worden. Für die Traglastberechnung wurde für alle Elemente ein linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz verwendet. Als Fließgesetz kam die von-Mises-Hypothese zur Anwendung.

Bauteil	Stahlsorte	Beiwert γ_M	Bemessungswert: E-Modul in N/mm ²	Bemessungswert: Streckgrenze in N/mm ²
alle Bleche $t < 40$ mm	S 355 J2 G3	1,1	190.909	323
HV-Schrauben	FK 10.9	1,1	190.909	818

4.2 Lagerung

Die Fußpunkte des gewählten Zweigelenrahmens stellen für die Modellierung keine großen Hindernisse dar. Die Stützen stehen auf starken Fußplatten, die mit dem Fundament verschraubt sind. Dadurch kann man die Lagerung des Fußes im Profilmittelpunkt beschreiben und alle anderen Endpunkte in dessen Abhängigkeit bringen. Die Verschiebungen werden in allen Richtungen und die Verdrehung nur um die Stabachse verhindert (Bild 7).

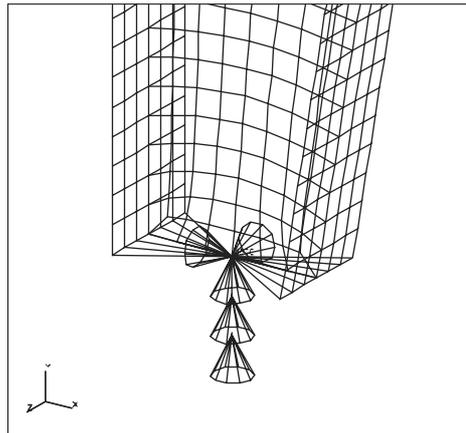


Bild 7 - Lagerung eines Stützenfußes

Neben den Fundamenten muss der Einzelrahmen auch an den nicht modellierten Pfetten- und Wandriegelanschlusspunkten entsprechend gelagert werden (Bild 8). Diese Lager wirken senkrecht zur Rahmenebene und bringen die Steifigkeit, die die Gesamtkonstruktion in Längsrichtung besitzt, in das Rahmenmodell ein. Im Beispiel werden zur Hallenaussteifung in dieser Richtung drei Verbandsfelder genutzt. Vereinfachend könnten die Lagerungen als fest angesehen werden, aber gerade im Druckbereich des Obergurtes entstehen die größten Verschiebungen in den Verbandsfeldern. Deshalb wurde in diesem Beispiel versucht, die vorhandenen Steifigkeiten in Hallenlängsrichtung im Rahmenmodell zu berücksichtigen. Die Berechnung der Dachverbandsersatzfedersteifigkeiten wurde nach den Angaben in [1] durchgeführt. Zu nächst ist die Verbandsbiegesteifigkeit aus den Obergurtquerschnitten und den Rahmenabständen ermittelt und mit der Schubsteifigkeit des Dachverbandes ins Verhältnis gesetzt worden. Anschließend konnten die Kräfte auf die Pfettenanschlusspunkte mit den resultierenden Verschiebungen und somit die jeweilige Federsteifigkeit berechnet werden.

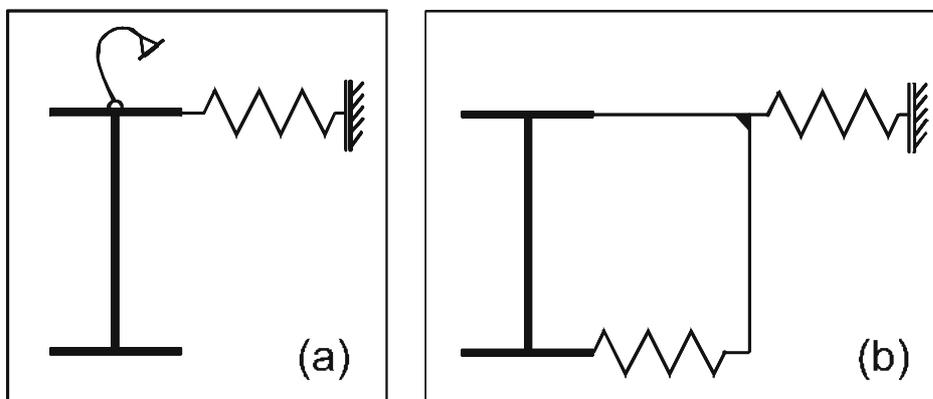


Bild 8 - Schema der Lagerung des Riegels a) ohne Flanschstreben b) mit Flanschstreben

In diesem Modell wurden auch Drehsteifigkeiten aus den Pfetten, die auf den Riegel durch eine feste Verbindung übertragen werden, eingebunden. Bei den Anschlüssen die zusätzliche Aussteifungen des Untergurtes mittels Flanschstreben besitzen, kann nur diese Stabilisierung des Untergurtes und nicht die Drehsteifigkeit berücksichtigt werden. An den Anschlusspunkten dieser Flanschstreben sind Federn bei der Modellierung eingesetzt worden. Die Berechnung der Steifigkeiten erfolgte nach dem Prinzip der virtuellen Kräfte (Bild 9).

um somit Vorverformungen zu erhalten, die den Eigenwerten entsprechen. Ausgewählt werden diejenigen, welche die niedrigsten in bezug auf globale und lokale Instabilitäten sind. Der Zweigelenrahmen versagt im Regelfall durch beidseitiges Biegedrillknicken des Riegeluntergurtes. Deshalb war es notwendig, den Riegel in diesem Bereich mit Imperfektionen zu behaften, um dieses globale Stabilitätsproblem zu erfassen. Da der Rahmenriegel aus einem geschweißten, dünnwandigem Stahlprofil gefertigt wurde, müssen auch die vorhandenen Stegbeulen bei der Traglastberechnung berücksichtigt werden. Gerade dort, wo sich die globale Vorverformung befindet, ist eine zusätzliche geometrische Imperfektion des Stegbleches äußerst ungünstig für das Tragverhalten.

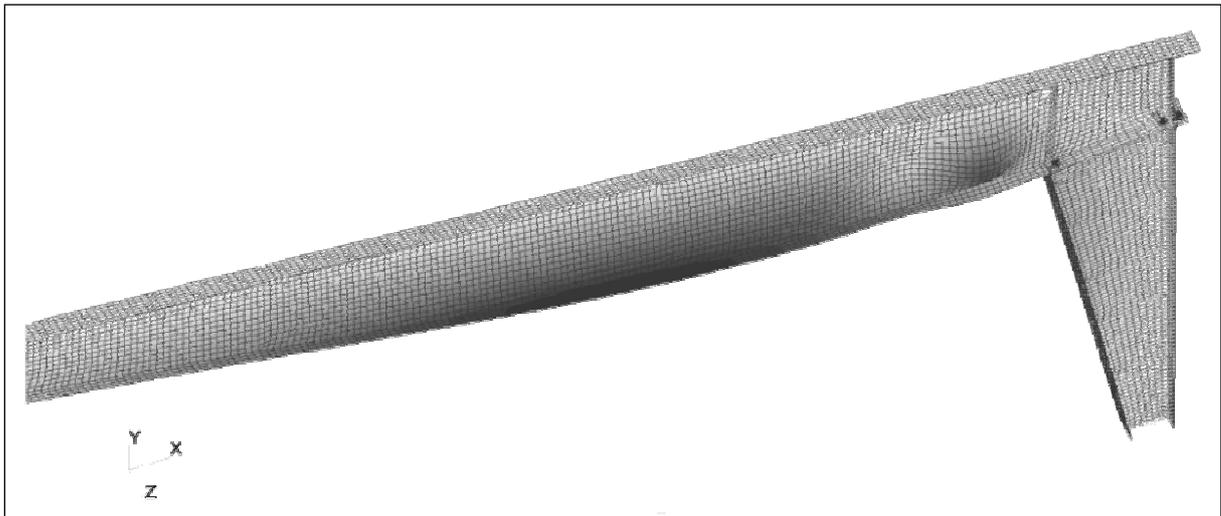


Bild 11 - Kombinierte Imperfektionen für die Traglast

Die Imperfektionen sind in diesem Bild überhöht dargestellt. Die globalen Vorverformungen (Biegedrillknicken) wurden mit $0,5 \cdot L/200$ und die lokalen (Stegbeulen) mit $H/250$ nach DIN 18800, Teil 2 und 3 skaliert.

5 Traglastberechnungen

Das Modell kann nun schrittweise belastet werden. Der Lastfaktor der Einwirkungskombination wird automatisch gesteigert und kann bei bestimmten Berechnungsvarianten über 1,0 hinaus gehen, um die Traglast der Konstruktion zu ermitteln.

Zum Vergleich wurden für verschiedene Modellvariationen die Traglasten berechnet, um den Einfluss der jeweiligen Änderung im Modell zu erkennen. Zum einen wurde die Berechnung an einem perfekten (nicht vorverformten) Modell und an einem mit Imperfektionen behafteten Modell durchgeführt. Zum anderen wurde der Einfluss der Kopfplattenmodellierung untersucht. Desweiteren sind unterschiedlichen Lagerungsbedingungen in das Modell eingearbeitet und dafür die entsprechenden Traglasten ermittelt worden.

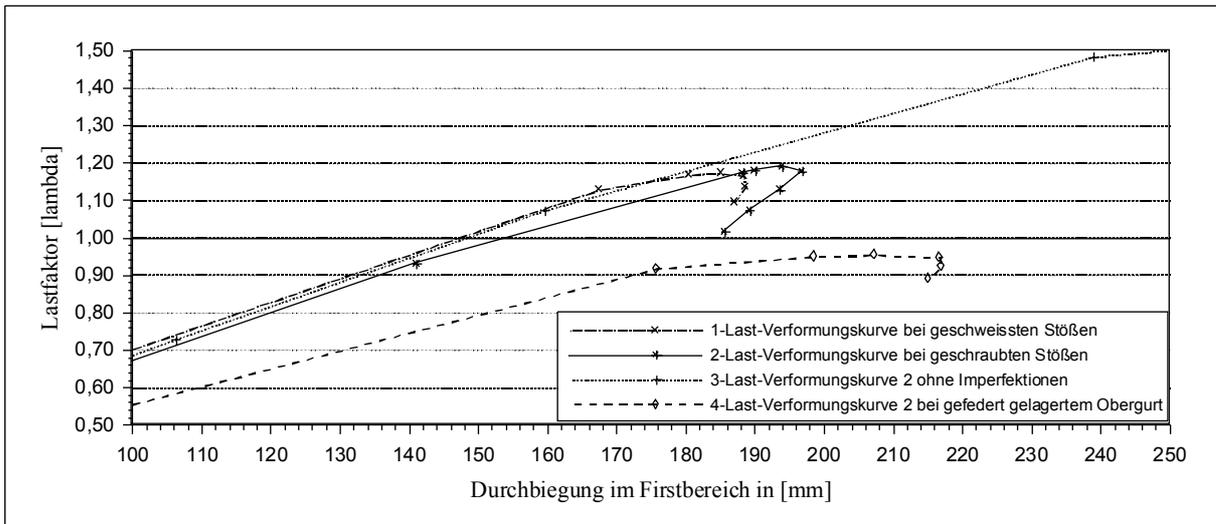


Bild 12 - Last-Verformungskurven der Modellvarianten

Im Diagramm werden vier verschiedene Last-Verformungskurven dargestellt. Sie beschreiben jeweils das Tragverhalten bei schrittweise zu nehmender Belastung. Beim Riks-Verfahren werden die Schrittweiten und die Richtung der Belastungsänderung mit der resultierenden Verschiebung ins Verhältnis gebracht, dadurch verringert sich der Lastfaktor beim Erreichen der Traglast.

Die zweite Kurve verhält sich im Verhältnis zur ersten etwas weicher, das ergibt sich aus den nachgiebigeren Kopfplattenverbindungen. Die dritte Kurve steht für ein Modell, für das die Traglast ohne Imperfektionen berechnet wurde. Man erkennt, dass sie sich etwas steifer als Kurve 2 verhält und eine erheblich höhere Traglast erreicht, da hier kein Stabilitätsversagen sondern nur Materialversagen eintritt. Die vierte Kurve zeigt das Last-Verformungsverhalten für ein Rahmenmodell, welches nicht nur am Untergurt (wie die anderen Modelle), sondern auch am Obergurt (Dachverbandsfeldern) entsprechend gefedert gelagert ist. Folglich fällt die Traglast und die Steifigkeit ab.

6 Schlussfolgerung

Trotz aller Fortschritte bei der Computersimulation kann den Ingenieur niemand von der Intuition entbinden. Er sollte z.B. erkennen, welche Versagensmodi wahrscheinlich und nachvollziehbar sind. Nur so kann man sicherstellen, dass das Modell auch wirklichkeitsnah ist und vor allzu großen "Vereinfachungen" bewahrt bleibt.

Bildverzeichnis

Bild 1 - Einzelner Hallenrahmen für die FE- Modellierung	1
Bild 2 - Elemente für die FE-Modellierung	2
Bild 3 - Geometrie des linken Rahmenviertels	3
Bild 4 - FE-Netz der linken Rahmenecke	3
Bild 5- Entwicklung einer Kopfplattenhälfte	4
Bild 6 - Kopfplattenverbindung mit Schrauben und Federn	5
Bild 7 - Lagerung eines Stützenfußes	6
Bild 8 - Schema der Lagerung des Riegels a) ohne Flanschstreben b) mit Flanschstreben.....	6
Bild 9 - Modell zur Steifigkeitsberechnung der Flanschstreben	7
Bild 10 – Belastung des Riegels [N]	7

Bild 11 - Kombinierte Imperfektionen für die Traglast	8
Bild 12 - Last-Verformungskurven der Modellvarianten.....	9
Figure 1 - Single frame for FE modelling	4
Figure 2 - Elements for FE modelling.....	5
Figure 3 - Geometry of the left quarter of the frame	5
Figure 4 - FE mesh of the left knee joint.....	6
Figure 5 - Development of a half endplate joint	7
Figure 6 - Endplate joint with bolts and springs	7
Figure 7 - Support of a column base	8
Figure 8 - Diagram of the rafter a) without stays b) with stays.....	9
Figure 9 - Model for the calculation of stiffness of the stays	9
Figure 10 - Load of the rafter [N].....	10
Figure 11 - Combined imperfections for ultimate carrying capacity	10
Figure 12 - Load-displacement curves of different models	11

Literatur

- [1] Abacus V. 5.6 User`s Manual, Voll. I-III, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1996
- [2] Petersen Christian; Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, 2. Auflage, Braunschweig, 1982