
FEM-Praxis mit SolidWorks

Michael Brand

FEM-Praxis mit SolidWorks

Simulation durch Kontrollrechnung und
Messung verifizieren

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 355 Abbildungen

 Springer Vieweg

Michael Brand
ZbW
St. Gallen, Schweiz

Das Buch erschien in 1. Auflage unter dem Titel Grundlagen FEM mit SolidWorks 2010.

SolidWorks® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Dassault Systèmes SolidWorks Corp.

Der Verfasser hat alle Texte, Formeln und Abbildungen mit größter Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Deshalb übernehmen weder der Verfasser noch der Verlag irgendwelche Garantien für die in diesem Buch abgedruckten Informationen. In keinem Fall haften Verfasser und Verlag für irgendwelche direkten oder indirekten Schäden, die aus der Anwendung dieser Informationen folgen.

ISBN 978-3-8348-1808-9
DOI 10.1007/978-3-8348-2234-5

ISBN 978-3-8348-2234-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2011, 2013

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Lektorat: Thomas Zipsner, Ellen Klabunde

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die Bedeutung von Simulationsprogrammen in der Produktentwicklung nimmt ständig zu. Das hat einerseits mit den auf dem Markt erhältlichen, immer preisgünstigeren Simulationsprogrammen und andererseits mit der vereinfachten Handhabung solcher Programme zu tun. Die einfache Handhabung gibt dem Bediener das Gefühl, Berechnungen mit FEM seien kinderleicht. Es ist natürlich sehr problematisch, wenn man den Resultaten einer FEM-Analyse ohne kritisches Hinterfragen vertraut.

Dieses Buch soll dem Studenten (z. B. Höhere Fachschule, Fachhochschule) und auch dem Praktiker anhand von Beispielen zeigen, wie man **SolidWorks Simulation** gewinnbringend im Berechnungs- und Produktentwicklungsprozess einsetzen kann. Die Beispiele sind bewusst so gestaltet, dass jede FEM-Analyse mittels einer analytischen „Handrechnung“ überprüft werden kann. Die Leser sollen auch dafür sensibilisiert werden, wie groß die Fehler bei falscher Handhabung sein können. Das Problem sind neben der richtigen Vernetzung oftmals die Randbedingungen (Lagerungen und Lasten). Es werden nur statisch-lineare Analysen durchgeführt.

Zunächst werden die Grundlagen der FEM-Analyse, die Benutzung von SolidWorks Simulation, die Vernetzungsarten, die Von-Mises-Vergleichsspannung und Spannungssingularitäten erklärt. Im zweiten Kapitel werden Beispiele zu den Grundbeanspruchungsarten berechnet und simuliert. Im dritten Kapitel werden anhand von Beispielen mit zusammengesetzter Beanspruchung berechnete und simulierte Werte verglichen. Auch Fachwerke können mit **SolidWorks Simulation** berechnet werden, was im vierten Kapitel gezeigt wird. Um die Kerbwirkung an Bauteilen geht es dann im fünften Kapitel. Wie man ganze Baugruppen mit **SolidWorks Simulation** simuliert, wird im sechsten Kapitel dargestellt. Es folgen dann zwei Projekte (Hebelpresse und Schweißkonstruktion), bei denen diverse Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden.

In der SolidWorks Premium-Lizenz ist ein FEM-Modul für statisch-lineare Analysen enthalten. Dieses Modul, **SolidWorks Simulation**, wurde speziell auf die Bedürfnisse von Konstrukteuren und Ingenieuren abgestimmt, die keine Spezialisten in der Konstruktionsprüfung sind.

Die CAD-Modelle aller Beispiele können im Internet unter www.springer-vieweg.de beim Buch unter online plus heruntergeladen werden. Alle Übungen können auch mit den SolidWorks Student Editions 2009 bis 2013 nachvollzogen werden.

Die Berechnung von Maschinenelementen basiert auf den Formeln von Roloff/Matek. Auf die Grundlagen der Festigkeitslehre wird hier nicht eingegangen. Es wird vorausgesetzt, dass der Leser Grundkenntnisse bei der Bedienung von SolidWorks hat. Für Neueinsteiger wurde ein Crash-Kurs für SolidWorks erstellt, der ebenfalls auf der Seite www.springer-vieweg.de heruntergeladen werden kann.

Die aktuelle Auflage wurde durch ein weiteres Praxisbeispiel ergänzt. Bei diesem Projekt Hydraulikzylinder wird gezeigt, wie man mit **SolidWorks Simulation** Schraubenverbindungen in Konstruktionen überprüfen kann. Die Schraubenverbindungen wurden zum Vergleich mit den Formeln der Maschinenelemente von Hand nachgerechnet, um zu zeigen, wie die Simulationsergebnisse mit den analytischen Ergebnissen übereinstimmen.

Natürlich wurden auch einige Druckfehler der ersten Auflage eliminiert. Wo es erforderlich war, wurden Anpassungen an SolidWorks 2012 umgesetzt.

Gerne möchte ich mich bei Herrn Thomas Zipsner vom Springer Vieweg Verlag für seine freundliche Unterstützung bei der Entstehung dieses Buches bedanken. Dank gebührt auch Herrn Haberger, dem technischen Manager der Simulationsprodukte von SolidWorks Deutschland, der mich bei kniffligen Fragestellungen stets geduldig unterstützte.

Uzwil, im Oktober 2012

Michael Brand

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Der Autor	VI
1 Einführung in die Finite-Elemente-Methode (FEM)	1
1.1 Grundlagen der FEM-Theorie	3
1.2 Simulation mit SolidWorks Simulation	7
1.3 Vernetzung	12
1.4 Vergleichsspannung	19
1.5 Spannungssingularitäten	21
1.6 Verständnisfragen	27
2 Beispiele zu den Grundbeanspruchungsarten	28
2.1 Einseitig eingespannter Biegebalken mit Einzellast	29
2.2 Einseitig eingespannter Biegebalken mit Streckenlast	32
2.3 Vollwelle mit Torsionsmoment	35
2.4 Stützträger mit Einzellast	38
2.5 Stützträger mit Streckenlast	49
2.6 Stützträger mit Mischlast	54
2.7 Übungen	61
3 Beispiele zur zusammengesetzten Beanspruchung	62
3.1 Träger mit Biegung und Zug	62
3.2 Welle mit Biegung und Torsion	65
3.3 Flachstahl mit Biegung und Biegung	66
3.4 Kurbelwange mit Biegung, Druck, Abscheren und Torsion	69
3.5 Übungen	74
4 Fachwerke	76
4.1 Beispiel Fachwerkberechnung	76
4.2 Übung	84
5 Beispiele zur Kerbwirkung	85
5.1 Flachstahl mit symmetrischer Rundkerbe	85
5.2 Symmetrisch abgesetzter Flachstab	89
5.3 Übung	94
6 Simulationen mit Baugruppen	95
6.1 Globaler Kontakt	96
6.2 Komponentenkontakt	98
6.3 Lokaler Kontakt	98
6.4 Verbindungsglieder	100
6.5 Projekt Klemmvorrichtung	102

7 Projekt Hebelpresse	117
7.1 Berechnungen	119
7.2 Zeichnungen (Geometrische Abmessungen für Berechnungen)	139
7.3 Simulation Hebelpresse als Baugruppe	143
8 Berechnung einer Schweißkonstruktion	149
9 Projekt Hydraulikzylinder	172
10 Zuverlässigkeit von FEM-Analysen	179
11 Lösungen	182
12 Literaturverzeichnis	184
Sachwortverzeichnis	185

1 Einführung in die Finite-Elemente-Methode (FEM)

Die Finite-Elemente-Methode ist in den letzten 60 Jahren entwickelt worden. Sie wird in der Praxis für Berechnungsaufgaben im Maschinen-, Apparate- und Fahrzeugbau eingesetzt. Die Einsatzgebiete sind sehr breit:

- Statik (Verformungen, Spannungen etc.)
- Dynamik (Eigenfrequenzen etc.)
- Strömungsprobleme (Geschwindigkeiten, Drücke etc.)
- Stabilitätsprobleme (Knicken, Beulen etc.)
- Temperaturprobleme (Temperaturverteilungen, Spannungen etc.)
- Akustik (Schallverteilung etc.)
- Crash-Verhalten (Verformungen, Beschleunigungen etc.)
- Umformprozesse
- Elektrotechnik (elektrische Felder etc.)
- Optimierungsprobleme.

In diesem Buch werden wir uns nur mit der Statik, das heißt mit statisch-linearen Untersuchungen beschäftigen. Statisch bedeutet, dass die Last konstant und zeitunabhängig ist. Linear heißt, dass die Belastung proportional zur Verformung (Spannung) ist. Die meisten Vorgänge in der Technik laufen nichtlinear ab. In vielen Fällen ist die viel einfachere lineare Betrachtung als Annäherung ausreichend. Gerade bei zähen Werkstoffen wie Stahl besteht unterhalb der Streckgrenze ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Für die Berechnungen in diesem Buch werden die Bauteile immer im elastischen Bereich belastet. Wir befinden uns somit im mehr oder weniger linearen Bereich.

Die Finite-Elemente-Methode ermöglicht realitätsnahe Aussagen durch Rechnersimulation und verkürzt somit die Produktentwicklungszeit. Die Vorteile im Überblick:

- Senkung der Entwicklungszeit
- Senkung der Entwicklungskosten
- Senkung der Produktionskosten
- Einsparung von Material
- Frühzeitiges Erkennen von Schwachstellen
- Qualitätssteigerung der Konstruktion
- Optimierung der Konstruktion
- Reduzierung von Versuchsreihen.

Die Verkürzung der Entwicklungszeit erlaubt es, mit einem neuen Produkt schneller am Markt zu sein. Bereits in der Entwicklungsphase können wesentliche Eigenschaften der Konstruktion überprüft und optimiert werden. Mit der FEM-Simulation ist es möglich, schon beim ersten Prototypen recht gute Resultate zu erzielen.

Damit man als Ingenieur oder Techniker gewinnbringend mit dieser Methode arbeiten kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Leistungsfähige Soft- und Hardware
- Kenntnisse über Grundlagen der FEM-Theorie
- Bedienung einer FEM-Software
- Ingenieurwissen zur kritischen Beurteilung der Ergebnisse.

SolidWorks Simulation ist ein FE-Modul, das im CAD-Programm SolidWorks integriert ist. Es ist ganz klar auf die Benutzung für Nicht-Spezialisten – Zielgruppe Konstrukteure – zugeschnitten. Um Standardberechnungen mit dieser Software auszuführen, muss man nicht den gesamten mathematischen Hintergrund dieser Methode kennen. Kenntnisse über die Grundlagen der FEM-Theorie sind aber dennoch erforderlich, damit man versteht, was die Software während eines Analysevorganges berechnet. Fehlende Erfahrung und Übung im Umgang mit solchen Programmen können zu großen Fehlern führen. Dieses Buch soll dem Leser die Grundlagen der FEM-Analyse mit SolidWorks Simulation verständlich machen. Um die jeweilige Problemstellung erkennen, Systemgrenzen definieren und Lager- bzw. Lastdefinitionen möglichst realitätsnahe festlegen zu können, braucht es fundiertes Ingenieurwissen. So kann man zum Beispiel bei der Wahl eines falschen Lagertyps sehr schnell im Resultat eine Zehnerpotenz daneben liegen.

Bis vor wenigen Jahren wurden FEM-Analysen nur von Spezialisten durchgeführt. Heute geht der Trend in die Richtung, dass auch von Konstrukteuren vermehrt Berechnungsaufgaben verlangt werden. Dafür gibt es verschiedene Gründe [7]:

- Kostengünstigere leistungsfähige FEM-Programme
- Höhere Qualifikation der Konstrukteure
- Hoher Kostendruck
- Großer Termindruck
- Gestiegene Optimierungsanforderungen.

Die modernen Simulationsprogramme wie SolidWorks Simulation mit guten Benutzeroberflächen erfordern für einfachere Berechnungsaufgaben nicht mehr den vollen theoretischen Hintergrund. Viele Konstrukteure bringen aus ihrer Ausbildung fundierte Kenntnisse in Festigkeitslehre und auch der FEM-Analyse mit. Somit können auch Konstrukteure innerhalb bestimmter Grenzen Standardberechnungen übernehmen. Die Entwicklungskosten müssen stetig reduziert werden, was ebenfalls für die konstruktionsintegrierte FEM-Analyse spricht.

Der große Termindruck verlangt, dass Geräte, Maschinen und Anlagen schon im ersten Entwurf möglichst optimiert werden.

Zu den Hauptaufgaben der Festigkeitslehre gehören unter anderem Verformungs- und Spannungsberechnungen. Wie wir im Buch sehen werden, kann die FEM-Analyse bei solchen Berechnungen eine große Hilfestellung bieten. Solange ein Bauteil eine einfache Geometrie besitzt, können Verformungen und Spannungen mit wenig Aufwand „von Hand“ berechnet werden. Wird die Geometrie aber komplizierter, stößt man mit dieser Methode sehr schnell an Grenzen.

Es gibt in der Konstruktion zwei typische Aufgabenstellungen:

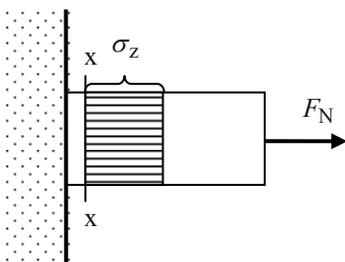
- Dimensionierung eines Bauteils: meist überschlägige Auslegung im Entwurfsstadium
- Festigkeits- und Verformungsnachweis: genauere Verformungs- und Spannungsrechnungen an einem auskonstruierten Bauteil.

Die Erbringung des Festigkeits- und Verformungsnachweises an einem auskonstruierten Bauteil ist bedeutend schwieriger als eine Vordimensionierung. Dies vor allem dann, wenn es sich um komplizierte Bauteile handelt. Bei solchen komplizierten Teilen ist oftmals eine Vereinfachung der Bauteilgeometrie erforderlich, die aber die Qualität der Ergebnisse nicht zu stark beeinträchtigen darf. Diese Vereinfachung ist oft notwendig, da es Probleme mit der Vernetzung (siehe dazu 1.3 Vernetzung) geben kann und weil die Modelle sonst zu groß werden.

Zuerst werden die Grundlagen der FEM-Theorie erarbeitet. Anschließend wird die Bedienung von SolidWorks Simulation erklärt. Dann werden wir anhand verschiedener Beispiele die praktische Umsetzung der Finite-Elemente-Methode kennen lernen.

1.1 Grundlagen der FEM-Theorie

Aus den Grundlagen der Festigkeitslehre wissen wir, dass die Zugspannung in einem Bauteil durch eine Normalkraft F_N in der Schnittebene hervorgerufen wird.



In der Schnittebene x-x gilt:

$$\sigma_z = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

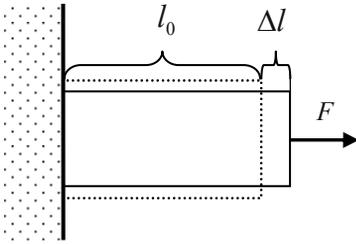
Die Zugspannung wirkt konstant im gesamten Querschnitt.

Das Hooke'sche Gesetz (2) besagt, dass die Spannung und die Dehnung im elastischen Bereich proportional sind. Diesen Zusammenhang kann man im Spannungs-Dehnungs-Diagramm gut erkennen.

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Die Dehnung ε ist folgendermaßen definiert:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$



wobei Δl der Längenänderung (Verschiebung) entspricht, die unter Einwirkung der Kraft F entsteht. Die ursprüngliche Länge des Bauteils beträgt l_0 . Das E -Modul ist das so genannte Elastizitätsmodul. Es entspricht im Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Steigung der Hooke'schen Gerade.

Es beträgt zum Beispiel für Stahl $E = 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Formt man nun (1) nach der Kraft um und setzt dann für die Zugspannung (2) und (3) ein, erhält man (Indizes werden weggelassen):

$$F = \sigma \cdot A = E \cdot \varepsilon \cdot A = E \cdot A \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Die so erhaltene Formel (4) stellen wir nun um:

$$F = \frac{E \cdot A}{l_0} \cdot \Delta l \quad (5)$$

Äußere Kraft
[N]

↓

Steifigkeit
 $\left[\frac{\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}} = \frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$

↓

Verschiebung
[mm]

Das ist die Grundgleichung der Finite-Elemente-Methode. Sie besagt:

Äußere Kräfte	=	Steifigkeit	mal	Verschiebung
---------------	---	-------------	-----	--------------

Bei einer FEM-Analyse sind die äußeren Kräfte bekannt oder müssen vorab bestimmt werden. Die Steifigkeit ergibt sich aus dem Material und der Geometrie des Bauteils. Es können dann immer zuerst Verschiebungen berechnet werden.

Aus diesen werden durch Rückrechnung die Spannungen, Reaktionskräfte (zum Beispiel an den Berührungsstellen von Einzelteilen in einer Baugruppe) und Dehnungen bestimmt.

Beispiel 1:

Der oben dargestellte Zugstab aus S235 (E-Modul $E = 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$) hat eine Querschnittsfläche von $A = 200 \text{ mm}^2$. Er wird durch eine Zugkraft von $F = 10\,000 \text{ N}$ belastet. Die unbelastete Anfangslänge beträgt $l_0 = 50 \text{ mm}$. Bestimmen Sie die Verschiebung und die Zugspannung.

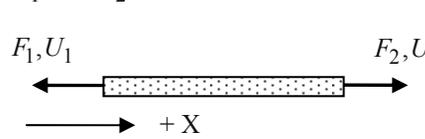
Lösung:

$$\text{Gleichung (5):} \quad 10\,000 \text{ N} = \frac{210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 200 \text{ mm}^2}{50 \text{ mm}} \cdot \Delta l \Rightarrow \Delta l = 0,012 \text{ mm}$$

$$\text{Gleichung (2) und (3):} \quad \sigma_z = 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{0,012 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Finite-Elemente-Methode ist nun aber eine computerorientierte Berechnungsmethode. Als Grundlage für die Berechnungen wird die Matrizenrechnung verwendet. Wenn man diese beim obigen Beispiel anwendet, sieht das folgendermaßen aus:

Am Zugstab greifen die beiden Kräfte F_1 und F_2 an, und rufen jeweils die Verschiebungen U_1 und U_2 hervor.



Gleichung (5): $F = \frac{E \cdot A}{l_0} \cdot \Delta l$

$$F = K \cdot U \quad (6)$$

$$\text{Somit gilt für } F_1 \text{ und } F_2: \begin{cases} F_1 = K \cdot U_1 - K \cdot U_2 \\ F_2 = K \cdot U_2 - K \cdot U_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \text{Matrizenschreibweise: } \underbrace{\begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix}}_{\text{Element-Steifigkeitsmatrix}} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (\text{wobei die Kraft } F_1 \text{ negativ ist})$$

$$\text{Element-Steifigkeitsmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{bmatrix}$$

Nun setzen wir die Werte von oben ein:

$$\text{Für } K \text{ erhalten wir } K = \frac{210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 200 \text{ mm}^2}{50 \text{ mm}} = 840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Durch Einsetzen in die obige Matrixgleichung erhält man:

$$\begin{bmatrix} 840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} & -840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \\ -840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} & 840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10\,000 \text{ N} \\ 10\,000 \text{ N} \end{bmatrix}$$

\Rightarrow Diese Matrixgleichung ist statisch unterbestimmt. Erst wenn man die Randbedingung $U_1 = 0$ (weil links fixiert) einführt, ist die Matrixgleichung lösbar:

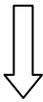
$$840\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot U_2 = 10\,000 \text{ N} \Rightarrow U_2 = 0,012 \text{ mm}$$

Da es sich bei diesem Beispiel um einen einachsigen Spannungszustand handelt, sieht die Element-Steifigkeitsmatrix sehr einfach aus. Sobald es sich aber um mehrachsige Spannungszustände handelt, wird es bedeutend schwieriger, diese aufzustellen.

Nun kommen wir zur Idee der Finite-Elemente-Methode:

Unabhängig von der Komplexität des zu untersuchenden Bauteiles oder einer Baugruppe sind die grundlegenden Schritte bei allen FEM-Berechnungen gleich. Ausgangspunkt für eine Analyse ist das geometrische Modell. Dieses muss für die Verwendung mit FEM meist noch vereinfacht werden (siehe Bild a). Diesem Modell werden Materialeigenschaften zugewiesen. Anschließend werden Lasten und Lager definiert.

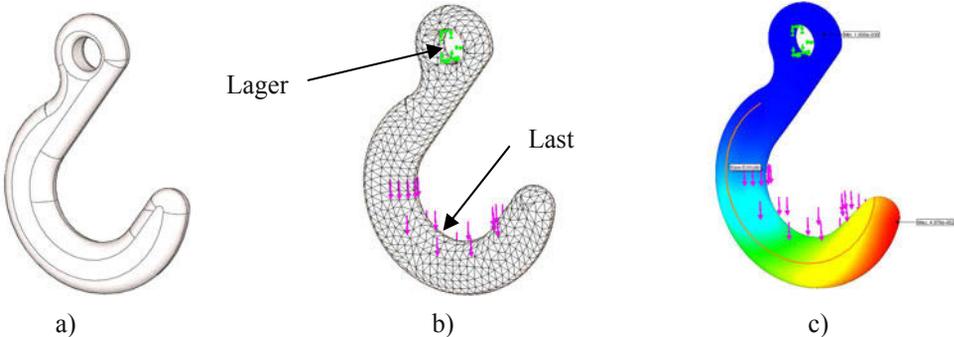
Belastung: Kräfte, Momente, Zwangsverschiebungen



Reaktion („Antwort“): Verformung, Spannung

Das Modell muss dann diskretisiert werden. Diesen Vorgang nennt man Vernetzen. Dabei wird die Geometrie des Modells in relativ kleine und einfach geformte Einheiten aufgeteilt – die finiten (= endlichen) Teile. Die Elemente (Teile) sind im Verhältnis zur Gesamtgröße des Modells klein (siehe Bild b).

Das FEM-Programm erstellt mit diesen Daten die Element-Steifigkeitsmatrix automatisch. Unter Verwendung der Randbedingungen (Lasten und Kräfte) werden die zu erwartenden Verschiebungen am ganzen Modell berechnet (siehe Bild c). Bei dieser Berechnung arbeitet ein numerischer Gleichungslöser, in dem er ein Gleichungssystem mit oftmals mehreren hunderttausend Gleichungen löst. Wie wir oben gesehen haben, können aus den Verschiebungen die Spannungen und Reaktionskräfte ermittelt werden. Diese Methode ist aber nur eine Annäherung an ein exaktes Ergebnis, die umso besser gelingt, je kleiner das gewählte Element wird.

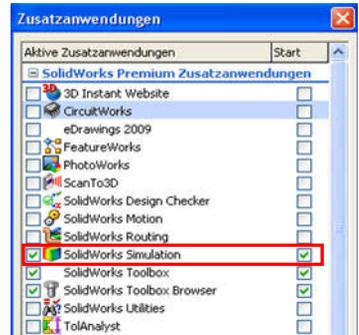


Der letzte Schritt ist die Interpretation der Ergebnisse. Dieser wird meist unterschätzt. Um fundierte Aussagen über die Resultate einer FEM-Analyse machen zu können, benötigt man fundiertes Ingenieurwissen vor allem aus den Bereichen der Technischen Mechanik (Statik, Dynamik und Festigkeitslehre).

1.2 Simulation mit SolidWorks Simulation

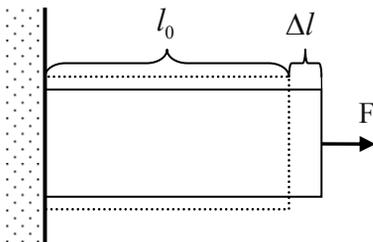
In diesem Kapitel wird gezeigt, wie man mit **SolidWorks Simulation** einfache FEM-Analysen durchführt. Bevor eine Studie erstellt werden kann, muss unter Zusatzanwendungen (Extras) **SolidWorks Simulation** aktiviert werden. Die Prozessstufen für eine Analyse sind immer die gleichen:

- Erstellen einer Studie
- Anwenden des Materials
- Einspannungen definieren
- Lasten definieren
- Modell vernetzen
- Studie ausführen
- Ergebnisse analysieren.



Die genannten Schritte werden nun anhand eines einfachen Beispiels durchgespielt.

Wir verwenden dazu unser obiges **Beispiel 1**:



Folgende Werte sind gegeben:

Material: S235

Kraft: $F = 10\,000\text{ N}$

Querschnitt: $A = 200\text{ mm}^2$

Anfangslänge: $l_0 = 50\text{ mm}$

E-Modul: $E = 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

FEM-Analyse:

1. Öffnen Sie das Modell für das Bauteil (Flachstahl.sldprt).
2. Erstellen Sie eine statische Studie (**Simulation-Studie**).



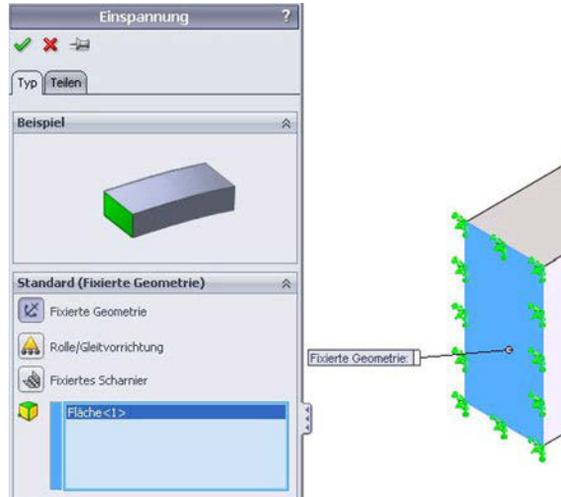
3. Weisen Sie das Material zu.

Mit Rechtsklick **Material anwenden/bearbeiten** wählen. Nehmen Sie **Unlegierter Baustahl**.

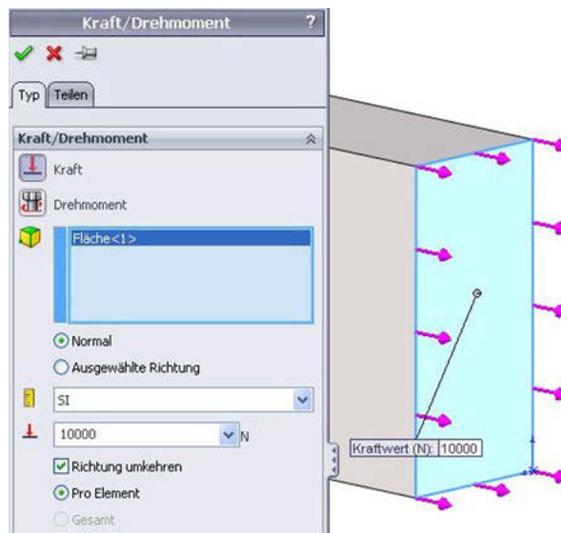
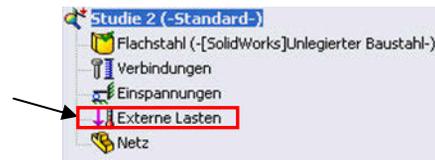


4. Definieren Sie eine feste Einspannung (**Fixierte Geometrie**) mit Rechtsklick auf **Einspannungen**.

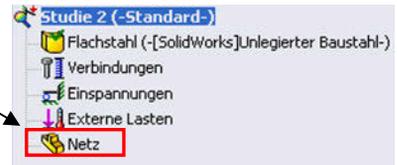
Das Modell muss an einem Ende befestigt bzw. fixiert werden. Es stehen dazu verschiedene Arten von Einspannungen zur Verfügung. Da es sich bei der gestellten Aufgabe um eine feste Einspannung handelt, kann man für die betreffende Fläche eine fixierte Geometrie wählen.



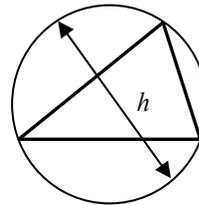
5. Definieren Sie die Kraft mit Rechtsklick auf **Externe Lasten**. Auf der gegenüberliegenden Seite greift die Kraft von 10 000 N an. Damit der Flachstahl auf Zug belastet wird, muss man **Richtung umkehren** aktivieren.



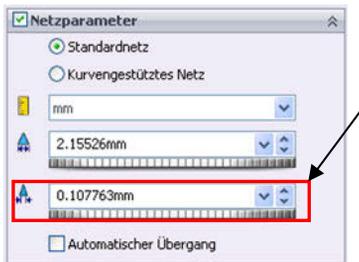
6. Erstellen Sie das Netz mit Rechtsklick und *Netz erstellen ...*



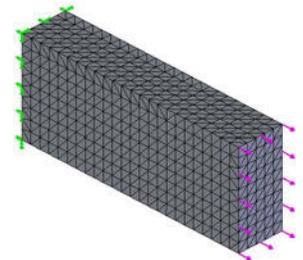
SolidWorks Simulation verwendet standardmäßig eine mittlere Netzdicke für die Vernetzung. Die Elementgröße ist als Durchmesser h einer Kugel um das Element definiert.



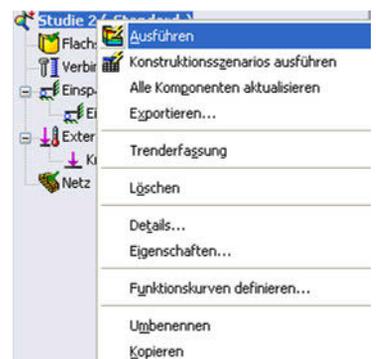
Die Dichte des Netzes beeinflusst die Genauigkeit der Ergebnisse direkt. Je kleiner die Elemente gewählt werden, desto geringer sind die so genannten Diskretisierungsfehler, desto länger dauert jedoch auch die Vernetzung und die Lösungsfindung.



Die Toleranz für die Elementgröße ist standardmäßig bei 5 % der Elementgröße. Eine Erhöhung der Toleranz kann manchmal hilfreich sein, wenn der Netzgenerator das Modell nicht vernetzen kann. So sieht das Modell mit der Vernetzung aus.

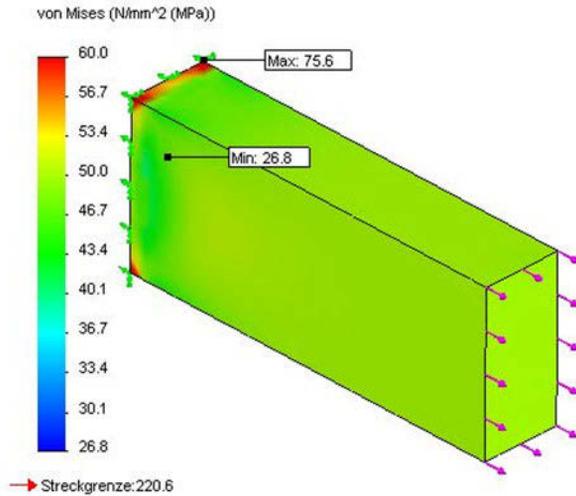
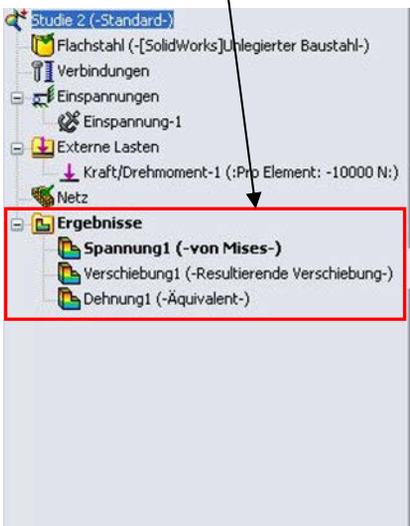


7. Führen Sie die Analyse mit Rechtsklick auf *Ausführen* durch. Nach durchgeführter Analyse erscheint der Ergebnisordner. Je nach Einstellung sind in diesem Spannungen, Verschiebungen etc. aufgeführt.



In der aktuellen Darstellung sieht man die Spannungen, die im Bauteil wirken.

Ergebnisordner



Sie können diverse Einstellungen für diese Ansicht ändern. Mit Doppelklick auf das Diagramm erscheint dieses Fenster:

Hier können Sie die Anzeigooptionen nach eigenem Bedarf verändern. Wollen Sie sich z. B. einen bestimmten Spannungsbereich zeigen lassen, geben Sie einfach unter **Definiert** eine Unter- und Obergrenze (hier 26.8 bis 60.0) ein.



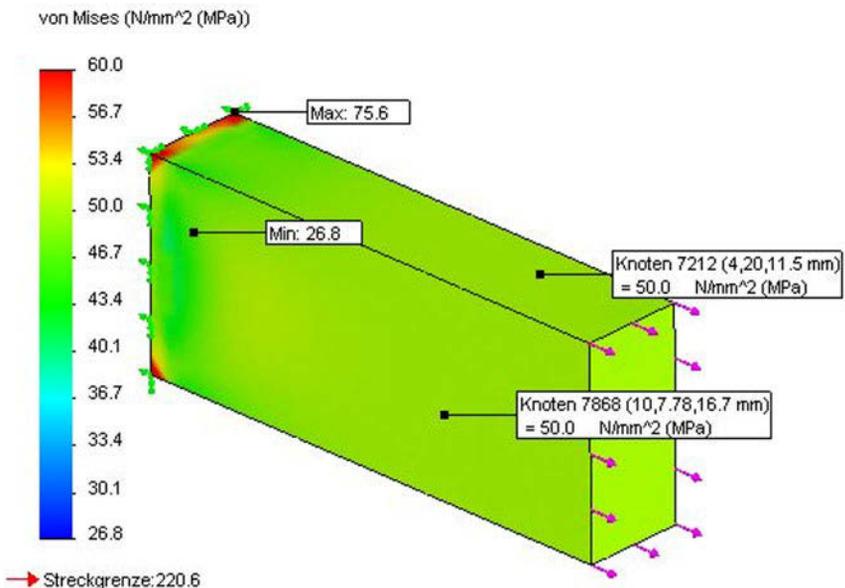
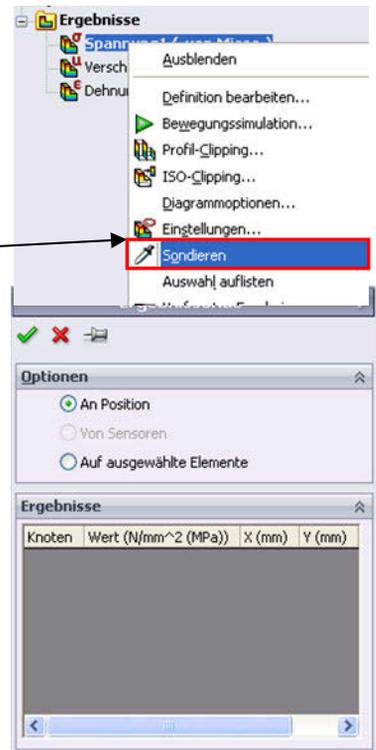
Interpretation der Ergebnisse:

Wir wollen nun vergleichen, ob die simulierten Werte mit den vorher berechneten Werten übereinstimmen.

Zuerst die maximale Zugspannung: Mit Rechtsklick auf Spannung 1, kann man **Sondieren** wählen.

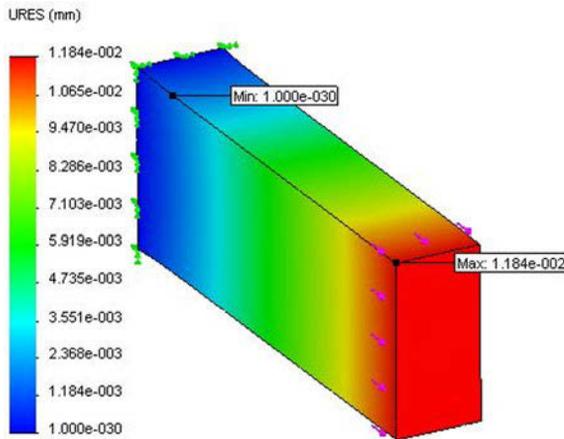
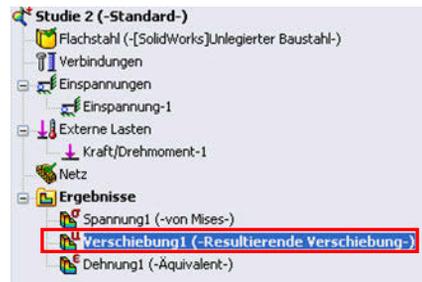
Wenn man bei Optionen **An Position** wählt, können an beliebigen Stellen des Modells die vorhandenen Spannungen jeweils am nächstliegenden Knoten gemessen werden.

Unten sind an zwei verschiedenen Stellen jeweils ca. $50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ gemessen worden, was sehr gut mit dem berechneten Wert übereinstimmt.



Vergleichen wir noch die Verformung. Dazu muss man die **Verschiebung 1** im Ergebnisordner einblenden.

Man sieht in dieser Darstellung, dass die maximale Verschiebung 0,012 mm beträgt. Auch dieser Simulationswert stimmt mit dem berechneten Wert überein.



1.3 Vernetzung

In *SolidWorks Simulation* sind fünf verschiedene Elementtypen verfügbar:

- Tetraedische Volumenkörperelemente 1. und 2. Ordnung
- Dreieckige Schalenelemente 1. und 2. Ordnung
- Balken- und Stabelemente

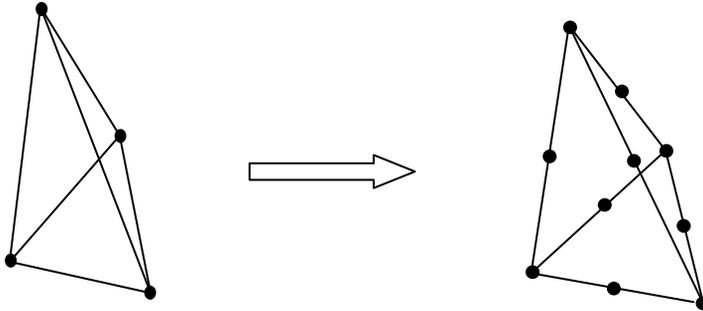
Bei der Vernetzung in Entwurfsqualität handelt es sich um Elemente 1. Ordnung. Elemente 2. Ordnung werden automatisch erstellt, wenn hohe Qualität gewählt wird.

Wenn also **Entwurfsqualität-Netz** nicht aktiviert ist, wird automatisch eine Vernetzung 2. Ordnung erstellt.



Tetraedische Volumenelemente 1. Ordnung (Entwurfsqualität) verfügen in jeder Ecke genau über einen Knoten. Das kann bei einer Analyse sehr schnell zu großen Fehlern führen.

Tetraedische Volumenelemente 2. Ordnung verfügen über genau 10 Knoten (4 Eckknoten und 6 Knoten jeweils in der Mitte der Kanten).

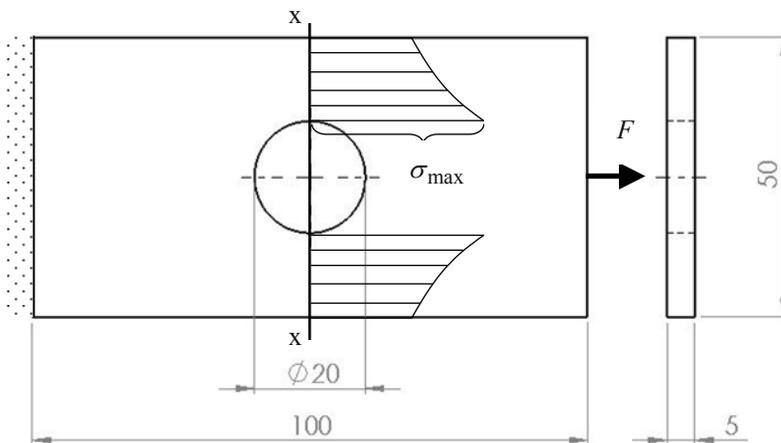


Die Elemente 2. Ordnung können abgerundete Kanten und Flächen besser vernetzen.

Analog zu tetraedischen Volumenelementen 1. und 2. Ordnung gibt es die dreieckigen Schalenelemente 1. und 2. Ordnung. Die Schalenelemente werden für die Vernetzung von Blechen oder ähnlichen Bauteilen verwendet. Wir sehen in den nächsten Beispielen, wie man diese Elementtypen anwenden kann. Die Balkenelemente werden im Kapitel 2.4 Stützträger mit Einzellast erläutert.

Beispiel 2:

Das unten dargestellte Lochblech (S235) wird mit der Kraft $F = 1\,000\text{ N}$ belastet. Zuerst berechnen wir die Spannung im gefährdeten Querschnitt x-x.



Nennspannung:

$$\sigma_n = \sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{1\,000\text{ N}}{30\text{ mm} \cdot 5\text{ mm}} = 6,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$