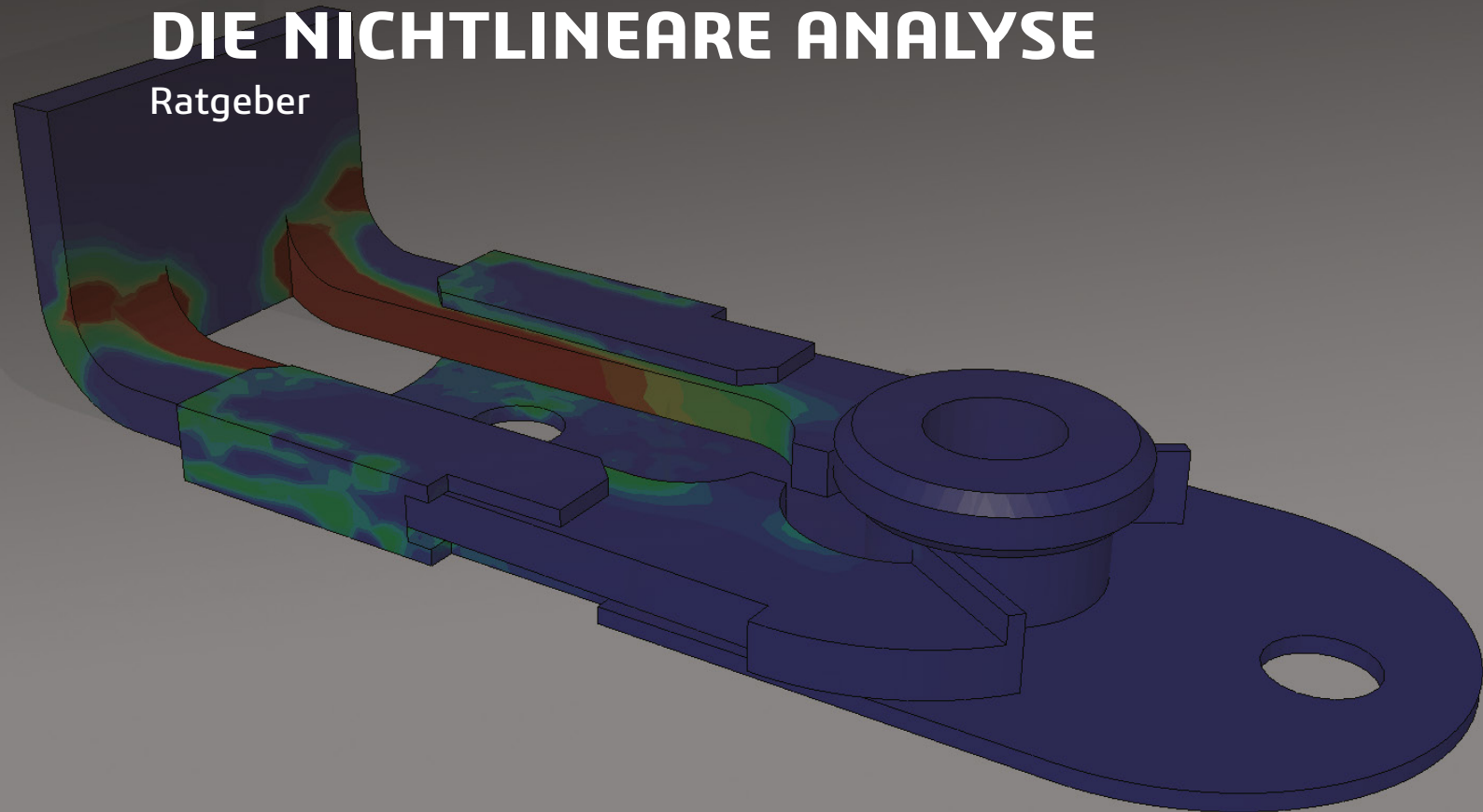




DIE NICHTLINEARE ANALYSE

Ratgeber



ÜBERSICHT

Dieses Dokument befasst sich mit den Unterschieden zwischen linearer und nichtlinearer Analyse und der Verwendung dieser beiden Analysearten. Sie werden erfahren, dass die Vernachlässigung nichtlinearer Effekte zu schwerwiegenden Konstruktionsfehlern führen kann. Nach der Vorstellung einiger Beispiele aus der Konstruktionspraxis wird veranschaulicht, wie Sie mit der nichtlinearen Analyse die Überdimensionierung von Teilen vermeiden und bessere Produkte konstruieren können.

INHALTS- VERZEICHNIS

S. 1

EINFÜHRUNG

S. 3

NICHTLINEARE GEOMETRIE

S. 4

NICHTLINEARES MATERIAL

S. 6

VERLUST DER ELASTISCHEN
STABILITÄT (BEULEN)

S. 7

KONTAKTSPANNUNGEN UND
NICHTLINEARE STÜTZELEMENTE

S. 7

NICHTLINEARE DYNAMISCHE ANALYSE

S. 8

NICHTLINEARE ANALYSE IN
DER KONSTRUKTIONSPRAXIS

S. 12

FAZIT

EINFÜHRUNG

In den letzten zehn Jahren hat die Finite-Elemente-Methode (FEM) Einzug in die Konstruktionspraxis gehalten und wird nicht mehr als Werkzeug nur für Spezialisten betrachtet. Die heute auf dem Markt verfügbare CAD-Software enthält integrierte FEM-Funktionen und Konstrukteure setzen die Finite-Elemente-Methode täglich als Hilfsmittel im Produktkonstruktionsprozess ein.

Bis vor kurzem beschränkte sich dieser Einsatz jedoch auf lineare Analysen. Für die meisten Konstruktionsprobleme liefert eine lineare Analyse eine annehmbare Annäherung der realen Eigenschaften. Hin und wieder treten jedoch komplexere Probleme auf, die einen nichtlinearen Ansatz erfordern.

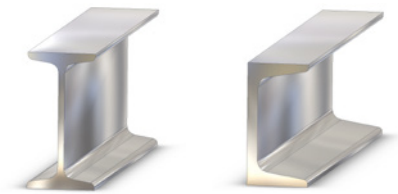
Aufgrund der komplizierten Problemformulierung und der langen Rechenzeit wurde die nichtlineare Analyse von Konstrukteuren in der Vergangenheit nur ungern eingesetzt. Das ändert sich nun, da nichtlineare FEM-Software über eine CAD-Schnittstelle verfügt und weitaus einfacher zu verwenden ist. Außerdem haben verbesserte Lösungsalgorithmen und leistungsstarke Desktop-Computer zu einer Verkürzung der Rechenzeiten beigetragen. Vor einem Jahrzehnt haben sich Ingenieure die Finite-Elemente-Methode als wertvolles Konstruktionswerkzeug erschlossen. Jetzt erkennen sie langsam die Vorteile und den Nutzen der nichtlinearen Finite-Elemente-Methode für den Konstruktionsprozess.

Unterschiede zwischen linearer und nichtlinearer Analyse

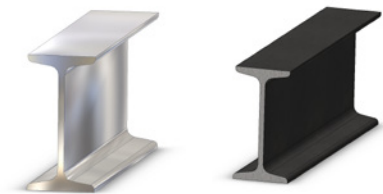
Der Begriff „Steifigkeit“ definiert den grundlegenden Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Analyse. Steifigkeit beschreibt den Widerstand eines Teils oder einer Baugruppe gegen eine aufgebrachte Kraft/Last. Die Steifigkeit wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

Der Begriff „Steifigkeit“ definiert den grundlegenden Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Analyse. Steifigkeit beschreibt den Widerstand eines Teils oder einer Baugruppe gegen eine aufgebrachte Kraft/Last. Drei Hauptfaktoren beeinflussen die Steifigkeit: Form, Material und Abstützung der Teile.

1. Form: Ein Doppel-T-Träger weist eine andere Steifigkeit auf als ein U-Träger.



2. Material: Die Steifigkeit eines Eisenträgers ist geringer als die Steifigkeit eines Stahlträgers gleicher Größe.



3. Stützelemente für Teile: Ein einfach gestützter Balken weist eine geringere Steifigkeit und eine höhere Durchbiegung auf als ein an beiden Enden gestützter Balken (siehe Abbildung 1).

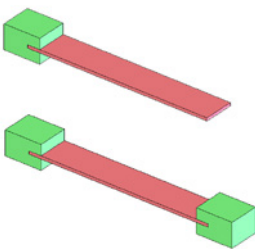


Abbildung 1: Ein Tragbalken (oben) weist eine geringere Steifigkeit auf als ein an beiden Enden gestützter Balken (unten).

Wenn sich eine Struktur unter Belastung verformt, ändert sich aufgrund der oben genannten Faktoren ihre Steifigkeit. Bei einer großen Verformung kann es zu einer Änderung der Form kommen. Wenn die Versagensgrenze des Materials erreicht ist, ändern sich die Materialeigenschaften.

Bei einer geringen Änderung der Steifigkeit macht auf der anderen Seite die Annahme Sinn, dass sich bei der Verformung weder Form noch Materialeigenschaften ändern. Diese Annahme bildet das fundamentale Prinzip der linearen Analyse.

Das bedeutet, dass das analysierte Modell während des gesamten Verformungsprozesses die gleiche Steifigkeit aufweist, die vor der Belastung im unverformten Zustand vorlag. Dabei spielen der Grad der Modellverformung, die Art der Belastung (d. h. schrittweise oder einmalige Lastaufbringung) und die Höhe der durch die Belastung hervorgerufenen Spannungen keine Rolle.

Durch diese Annahme werden die Problemformulierung und -lösung erheblich vereinfacht. Die grundlegende Gleichung der Finite-Elemente-Methode lautet wie folgt:

$$[F] = [K] * [u]$$

Definition: **[F] ist der bekannte Vektor der Knotenlasten**

[K] ist die bekannte Steifigkeitsmatrix

[u] ist der unbekannte Vektor der Knotenverschiebungen

Diese Matrixgleichung beschreibt das Verhalten von FEM-Modellen. Je nach Modellgröße enthält sie mehrere Tausend bis mehrere Millionen linear-algebraische Gleichungen. Die Steifigkeitsmatrix [K] hängt von der Geometrie, den Materialeigenschaften und den Randbedingungen ab. Unter der linearen Analyseannahme, dass sich die Modellsteifigkeit nie ändert, werden diese Gleichungen nur einmal aufgestellt und gelöst, ohne dass während der Verformung des Modells etwas aktualisiert werden muss. Die lineare Analyse erfolgt somit von der Problemformulierung bis zum Abschluss geradlinig. Sie liefert selbst bei sehr großen Modellen innerhalb weniger Sekunden oder Minuten Ergebnisse.

Der nichtlinearen Analyse liegt jedoch ein komplett anderes Prinzip zugrunde, da hier keine konstante Steifigkeit angenommen werden kann. Stattdessen ändert sich die Steifigkeit während der Verformung und die Steifigkeitsmatrix [K] muss während der iterativen Lösung des nichtlinearen Gleichungslösers aktualisiert werden. Aufgrund dieser Iterationen dauert es länger, die Berechnung durchzuführen.

Bei einer geringen Änderung der Steifigkeit macht die Annahme Sinn, dass sich bei der Verformung weder Form noch Materialeigenschaften ändern. Diese Annahme bildet das fundamentale Prinzip der linearen Analyse.

DIE VERSCHIEDENEN ARTEN DER NICHTLINEARITÄT

Obwohl bei allen Arten der nichtlinearen Analyse eine Änderung der Steifigkeit zugrunde liegt, kann der Ursprung des nichtlinearen Verhaltens unterschiedlich sein. Daher macht es Sinn, nichtlineare Analysen auf Grundlage des Ursprungs der Nichtlinearität zu klassifizieren. Da bei vielen Problemen keine alleinige Ursache für die Nichtlinearität ausgemacht werden kann, müssen bei diesen Analysen mehrere Arten der Nichtlinearität berücksichtigt werden.

Nichtlineare Geometrie

Wie bereits erwähnt, ist eine nichtlineare Analyse erforderlich, wenn sich die Steifigkeit des Teils unter Betriebsbedingungen ändert. Wenn die Änderung der Steifigkeit ausschließlich auf Formänderungen zurückzuführen ist, handelt es sich um eine geometrische Nichtlinearität.

Solche formbedingten Änderungen der Steifigkeit können auftreten, wenn Teile große Verformungen aufweisen. Als Faustregel gilt, bei einer Dehnung von mehr als 4-5 % die geometrische Nichtlinearität zu berücksichtigen. Außerdem ist zu beachten, dass sich im Fall von großen Verformungen die Lastrichtung mit der Modellverformung ändern kann. Die meisten FEM-Programme bieten zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung dieser Richtungsänderung: mitdrehende und konstante Belastungen.

Die Richtung einer mitdrehenden Belastung ändert sich, wie in Abbildung 2 gezeigt, in Bezug auf das verformte Modell. Bei einer konstanten Belastung wird die ursprüngliche Richtung beibehalten.

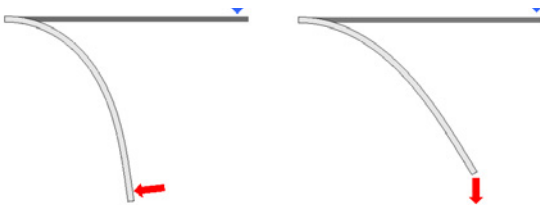


Abbildung 2: Die Richtung einer mitdrehenden Belastung ändert sich während der Verformung und bleibt normal auf den verformten Träger (links). Bei einer konstanten Belastung wird die ursprüngliche Richtung beibehalten (rechts).

Ein Druckbehälter, der einem sehr hohen Druck ausgesetzt ist und eine drastische Formveränderung erfährt, ist ein weiteres gutes Beispiel für diese Situation. Die Drucklast wirkt immer normal auf die Wände des Druckbehälters. Während bei der linearen Analyse angenommen wird, dass sich die Form des Behälters nicht ändert, muss bei einer realistischen Analyse die geometrische Nichtlinearität mit aktualisierter Belastungsrichtung berücksichtigt werden.

Als Faustregel gilt, bei einer Dehnung von mehr als 4-5 % die geometrische Nichtlinearität zu berücksichtigen. Außerdem ist zu beachten, dass sich im Fall von großen Verformungen die Lastrichtung mit der Modellverformung ändern kann.

Auch bei geringen Verformungen kann es zu einer Änderung der Steifigkeit kommen. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine anfänglich flache Membran, die sich unter Druck durchbiegt (siehe Abbildung 3).

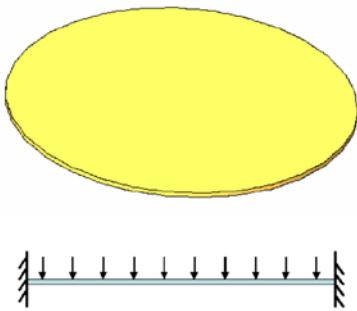


Abbildung 3: Bei der Analyse einer flachen Membran unter Drucklast müssen geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, obwohl die Verformung u. U. sehr gering ist.

Anfangs reagiert die Membran auf die Drucklast ausschließlich mit Biegesteifigkeit. Nachdem die Drucklast eine gewisse Krümmung verursacht hat, weist die verformte Membran neben der ursprünglichen Biegesteifigkeit eine zusätzliche Membransteifigkeit auf (Abbildung 4). Durch die Verformung ändert sich die Steifigkeit der Membran, sodass die verformte Membran weitaus steifer als die flache Membran ist.

Bei einigen FEM-Programmen wird missverständliche Terminologie verwendet. Eine Analyse der geometrischen Nichtlinearitäten heißt dann z. B. „Analyse großer Verformungen“. Dabei wird außer Acht gelassen, dass eine nichtlineare Analyse auch bei geringeren Verformungen durchgeführt werden muss.

Auch bei geringen Verformungen kann es zu einer Änderung der Steifigkeit kommen. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine anfänglich flache Membran, die sich unter Druck durchbiegt. Anfangs reagiert die Membran auf die Drucklast ausschließlich mit Biegesteifigkeit. Nachdem die Drucklast eine gewisse Krümmung verursacht hat, weist die verformte Membran neben der ursprünglichen Biegesteifigkeit eine zusätzliche Membransteifigkeit auf.

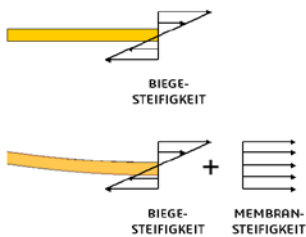


Abbildung 4: Eine flache Membran reagiert auf eine Last nur mit Biegesteifigkeit. Aufgrund der Verformung kommt die Membransteifigkeit hinzu. Daher ist die Steifigkeit weitaus höher, als mit einer linearen Analyse vorhergesagt wird.

Nichtlineares Material

Wenn die Änderung der Steifigkeit ausschließlich auf Änderungen der Materialeigenschaften unter Betriebsbedingungen zurückzuführen ist, spricht man von einer Material-Nichtlinearität. Bei einem linearen Materialmodell wird angenommen, dass die Spannung proportional zur Dehnung ist (Abbildung 5 unten). Das bedeutet, dass mit zunehmender Last die Spannungen und Verformungen proportional zur Laständerung steigen. Es wird außerdem angenommen, dass es zu keiner dauerhaften Verformung kommt und das Modell nach Entlastung seine ursprüngliche Form wieder annimmt.

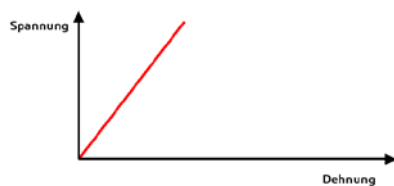


Abbildung 5

Diese Vereinfachung ist zwar akzeptabel, aber wenn die Belastungen hoch genug sind, um einige dauerhafte Verformungen zu verursachen, wie es bei den meisten Kunststoffen der Fall ist, oder wenn die Dehnungen sehr hoch sind, wie es bei Gummi und Elastomeren der Fall ist, dann muss ein nichtlineares Materialmodell verwendet werden.

Aufgrund der enormen Unterschiede im Verhalten der verschiedenen Materialtypen unter Betriebsbedingungen wurden für FEM-Programme spezielle Techniken und Materialmodelle zur Simulation dieser Verhaltensweisen entwickelt. In der folgenden Tabelle finden Sie einen Überblick über die verschiedenen Materialmodelle und die jeweiligen Anwendungsbereiche.

MATERIAL-

KLASSIFIZIERUNG

MODELL

KOMMENTARE

MATERIAL- KLASSIFIZIERUNG	MODELL	KOMMENTARE
Elastoplastisch	Von Mises oder Tresca	Diese Modelle eignen sich für Materialien, bei denen die Spannungs-Dehnungskurve vor dem Erreichen der Spannungsgrenze ein Plateau aufweist. Dazu gehören die meisten Konstruktionsmetalle und einige Kunststoffe.
	Drucker-Prager	Dieses Modell eignet sich für Erdmaterialien und körnige Materialien.
Hyperelastisch	Mooney-Rivlin und Ogden	Diese Modelle eignen sich für inkompressible Elastomere.
	Blatz-Ko	Dieses Modell eignet sich für komprimierbare Schäume.
Viskoelastisch	Mehrere (optional bei anderen Modellen)	Dieses Modell eignet sich für harte Kunststoffe oder Glas.
Kriechen	Mehrere (optional bei anderen Modellen)	Kriechen ist eine zeitabhängige Dehnung, die unter konstanter Belastung entsteht. Sie tritt in vielen Materialien auf, insbesondere bei Metallen, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden, Kunststoffen mit hohem Polymergehalt, Beton sowie Festtreibstoffen in Raketentriebwerken.
Superelastisch (Formgedächtnis- legierungen)	Nitinol	Formgedächtnislegierungen (SMA) wie Nitinol zeigen einen superelastischen Effekt. Dieses Material unterliegt während der zyklischen Be- und Entlastung großen Verformungen, die jedoch nicht dauerhaft sind.

Verlust der elastischen Stabilität (Beulen)

Auch aufgrund angewandeter Lasten ändert sich die Steifigkeit in einem Teil. Je nach Art der Anwendung können Lasten in einigen Fällen entweder zu einer Erhöhung (Zuglasten) oder Senkung (Drucklasten) der Steifigkeit führen. So kann ein straff gespanntes Seil zum Beispiel das Gewicht eines Akrobaten tragen. Wäre das Seil nicht straff gespannt, würde der Akrobat herunterfallen. Unter Druckbelastung kann es zum Knicken bzw. Beulen einer Struktur kommen, wodurch sich deren Steifigkeit schlagartig reduziert. Die Struktur kollabiert dann entweder komplett oder nimmt eine Form an, die eine neue Steifigkeit besitzt.

Mit der linearen Beulanalyse kann die Last berechnet werden, unter der es zum Beulen einer Struktur kommt. Die Ergebnisse der linearen Beulanalyse sind jedoch nichtkonservativ. Darüber hinaus können Idealisierungen des FEM-Modells dazu führen, dass die vorhergesagte Beullast für das FEM-Modell weitaus höher ist als für das reale Teil. Daher sollten die Ergebnisse der linearen Beulanalyse mit Vorsicht behandelt werden.

Ein Beulen führt nicht zwangsläufig zu einem endgültigen Versagen. Die Struktur kann nach dem Knicken u. U. immer noch der Belastung standhalten. Die nichtlineare Analyse liefert Informationen zum Verhalten nach dem Beulen.

In den Abbildungen 6 und 7 ist das Snap-Through-Verhalten (Durchschnappeffekt) dargestellt. Das Teil kann auch nach dem Beulen noch der Last standhalten.

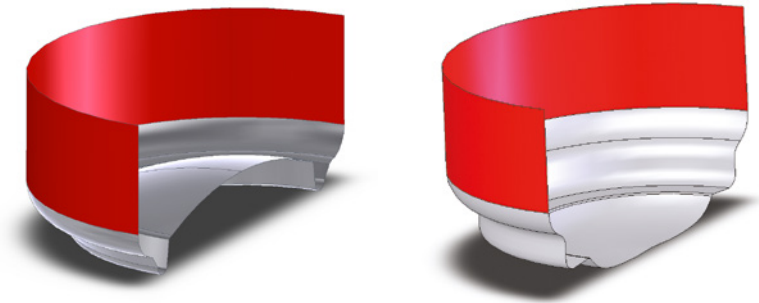


Abbildung 6

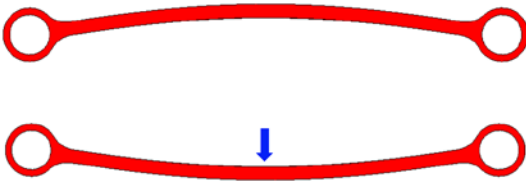


Abbildung 7: Zur Analyse des Snap-Through-Verhaltens ist eine nichtlineare Simulation erforderlich.

Kontaktspannungen und nichtlineare Stützelemente

Wenn sich die Stützelementbedingungen, einschließlich der Kontakte, unter den Betriebslasten ändern, muss eine nichtlineare Analyse durchgeführt werden.

Zwischen zwei sich berührenden Oberflächen entwickeln sich Kontaktspannungen. Daher sind der Kontaktbereich und die Steifigkeit des Kontaktbereichs vor der Lösung unbekannt. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer Spannungsanalyse eines typischen Kontaktproblems. Obwohl der Kontaktspannungsbereich im Vergleich zur Größe des Gesamtmodells sehr klein ist, macht die Änderung der Steifigkeit des Kontaktbereichs eine nichtlineare Analyse erforderlich.

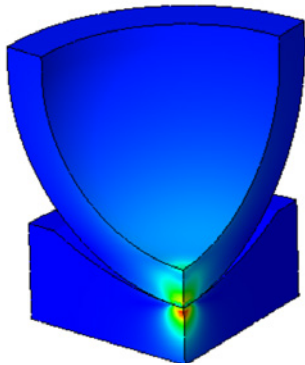


Abbildung 8: Die Kontaktspannungsanalyse, mit der die zwischen zwei Bauteilen entstehenden Spannungen berechnet werden, gehört zur Kategorie der Analyse mit nichtlinearen Stützelementen.

In Abbildung 9 ist ein Beispiel für nichtlineare Stützelemente dargestellt. Die effektive Balkenlänge und die sich daraus ergebende Steifigkeit hängen vom Grad der Balkenverformung ab. Wenn der Balken das Stützelement berührt, steigt die Steifigkeit aufgrund der kürzeren effektiven Länge.

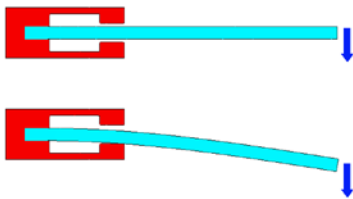


Abbildung 9: Durch den Kontakt wird die effektive Länge des Balkens geändert. Infolgedessen ändert sich die Balkensteifigkeit und für das Problem wird eine nichtlineare Analyse erforderlich.

Nichtlineare dynamische Analyse

Bei der dynamischen Analyse werden Trägheitsmomente, Dämpfungseffekte und zeitabhängige Lasten berücksichtigt. Ein Falltest, Vibrationen eines Motorlagers, die Auslösung eines Airbags oder eine Crash-Simulation erfordern eine dynamische Analyse. Ist die dynamische Analyse aber linear oder nichtlinear? Hier kommen die gleichen Regeln zum Tragen wie bei der statischen Analyse.

Wenn sich die Modellsteifigkeit unter der angewendeten Last nicht bedeutend ändert, reicht die lineare dynamische Analyse. Ein vibrierender Motorblock oder eine Stimmgabel weisen beispielsweise kleine Verformungen um den Gleichgewichtspunkt auf und können daher linear dynamisch analysiert werden.

Für Probleme wie z. B. die Crash-Simulation, die Analyse der Airbag-Auslösung oder die Berechnung eines Metallstanzprozesses ist eine nichtlineare dynamische Analyse erforderlich, da es zu großen Verformungen (nichtlineare Geometrie), starken Dehnungen (nichtlineares Material) und Kontaktänderungen kommt.

Wenn sich die Stützelementbedingungen, einschließlich der Kontakte, unter den Betriebslasten ändern, muss eine nichtlineare Analyse durchgeführt werden.

In vielen Fällen unterscheiden sich die linearen Annahmen jedoch zu sehr von der Realität und liefern zu grobe oder irreführende Informationen. Die Verwendung der Ergebnisse einer linearen Analyse, um zu entscheiden, ob ein Teil unter seinen Betriebslasten versagt, kann zu einer Überdimensionierung führen.

Wie kann die nichtlineare Analyse zur Konstruktion besserer Produkte beitragen?

Die Natur ist nichtlinear. Das bedeutet, dass mit der linearen Analyse das reale nichtlineare Verhalten von Teilen und Baugruppen nur angenähert werden kann. Oft ist diese Annäherung annehmbar und die lineare Analyse kann einen wertvollen Einblick in die Produkteigenschaften liefern. In vielen Fällen unterscheiden sich die linearen Annahmen jedoch zu sehr von der Realität und liefern zu grobe oder irreführende Informationen.

Die Verwendung der Ergebnisse einer linearen Analyse, um zu entscheiden, ob ein Teil unter seinen Betriebslasten versagt, kann zu einer Überdimensionierung führen. So muss sich ein Konstrukteur zum Beispiel bei einer rein linearen Analyse einer Halterungskonstruktion an die Vorgabe halten, dass die Spannung nicht die Fließgrenze übersteigt. Die nichtlineare Analyse kann jedoch ergeben, dass ein Fließen des Materials bis zu einer bestimmten Grenze akzeptabel ist. In diesem Fall ist es möglich, die Materialmenge zu reduzieren oder ein kostengünstigeres Material zu wählen, ohne die strukturelle Integrität zu gefährden. Auch könnte ein Konstrukteur eine flache Platte überdimensionieren, um die durch eine lineare Analyse ermittelte Durchbiegung zu kompensieren, ohne zu wissen, dass die Ergebnisse der linearen Analyse bezüglich der Verformungen übertrieben sind und die ursprüngliche Konstruktion in Ordnung war.

Nichtlineare Analyse in der Konstruktionspraxis

Sobald ein Ingenieur genug Erfahrung gesammelt hat, um nichtlineare Probleme zu erkennen, wird deutlich, dass die Anwendung dieser Technologie nicht auf „exotische“ Situationen beschränkt ist. Konstruktionen, für die eine nichtlineare Analyse erforderlich ist oder von Vorteil sein kann, finden sich in allen Industriezweigen und in der täglichen Konstruktionspraxis.

Im Folgenden sind einige Beispiele für Produkte aufgeführt, bei denen die richtige Konstruktionsentscheidung nur anhand einer nichtlinearen Analyse getroffen werden kann. Bei vielen dieser Probleme liegen mehrere Arten der Nichtlinearität zugrunde.

Umlenkrolle (Abbildung 10)

Diese gestanzte Stahlrolle kann unter der Riemenlast beulen, bevor sich übermäßige Spannungen entwickeln. Obwohl eine lineare Beulanalyse u. U. ausreicht, um die Beullast zu bestimmen, ist eine nichtlineare Analyse zur Untersuchung des Verhaltens nach dem Beulen erforderlich.

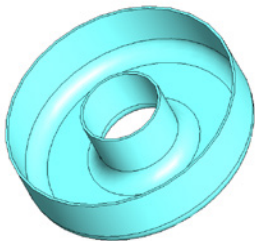


Abbildung 10

Membranfeder (Abbildung 11)

Die nichtlinearen Federeigenschaften machen eine Analyse der nichtlinearen Geometrie notwendig, um Membraneffekte zu berücksichtigen.

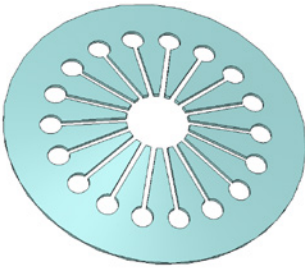


Abbildung 11

Überrollschutz (Abbildung 12)

Bei einem Überschlag verformt sich die Struktur über die Fließgrenze hinaus und absorbiert die Überschlagenergie. Während dieses Prozesses kommt es zu großen Verformungen. Zur Untersuchung der Überschlageffekte müssen sowohl die Material- als auch die geometrischen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.



Abbildung 12

Weiche Geburtszange (Abbildung 13)

Eine Geburtszange soll bei einer Zangengeburt den Kopf des Babys umschließen. Die Geburtszange ist so konstruiert, dass sie bei zu hohen Zug- und/oder Druckkräften vom Kopf des Babys rutscht, um Verletzungen zu vermeiden. Bei der Analyse einer solchen Geburtszange sind Material- und geometrische Nichtlinearitäten zu berücksichtigen, um großen Verformungen und einem nichtlinearen elastischen Material Rechnung zu tragen.



Abbildung 13

Lüftergitter (Abbildung 14)

Für dieses Teil ist aufgrund der während der Verformung entstehenden Membranspannungen eine Analyse der nichtlinearen Geometrie erforderlich. Unter Umständen müssen auch die Material-Nichtlinearitäten analysiert werden.

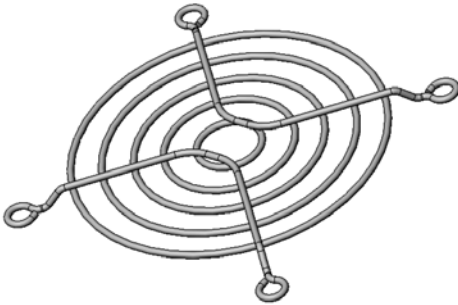


Abbildung 14

Sprengring (Abbildung 15)

Aufgrund großer Verformungen ist eine Analyse der nichtlinearen Geometrie erforderlich. Bei der Analyse dieses Rings müssen unter Umständen auch die Material-Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.



Abbildung 15

Luftfrachtcontainer (Abbildung 16)

Aufgrund der Membraneffekte in den blauen Lexan®-Tafeln muss bei der Analyse dieses Luftfrachtcontainers die nichtlineare Geometrie berücksichtigt werden. Außerdem muss das Beulverhalten oder das Verhalten nach dem Beulen des Rahmens analysiert werden.

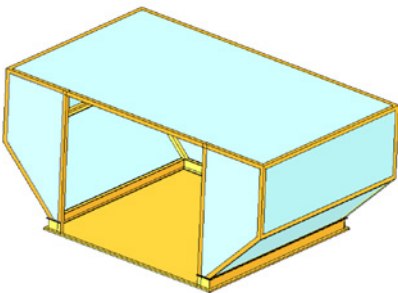


Abbildung 16

Bürostuhl (Abbildung 17)

In diesem Beispiel kann aufgrund der großen Verformungen des Rahmens eine Analyse der nichtlinearen Geometrie erforderlich sein. Bei der Analyse des Sitzes und der Rückenlehne müssen die Material- und geometrischen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.



Abbildung 17

Inbusschlüssel (Abbildung 18)

Der Kontakt zwischen dem Inbusschlüssel und der Inbusschraube macht eine Kontaktspannungsanalyse erforderlich.

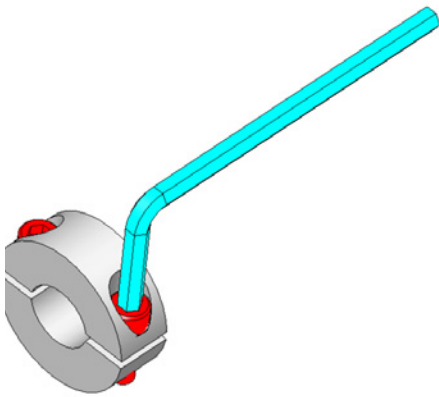


Abbildung 18

FAZIT

Die Entscheidung, ob die FEM-Software des Konstrukteurs um nichtlineare Analysefunktionen erweitert werden soll, sollte auf Grundlage der Art der Analyseprobleme getroffen werden. Wenn bei der Analyse von Konstruktionsproblemen große Verformungen, Membraneffekte, Material-Nichtlinearitäten, Kontaktspannungen, Beulen, nichtlineare Randbedingungen oder andere Nichtlinearitäten zu berücksichtigen sind, sollte die von den Konstrukteuren verwendete FEM-Software um Funktionen zur nichtlinearen Analyse erweitert werden.

In den letzten Jahrzehnten haben sich Konstrukteure an die Verwendung der Finite-Elemente-Methode als Konstruktionswerkzeug gewöhnt. Heute sind FEM-Software, Computer-Hardware und Cloud-Computing genügend ausgereift, sodass die nichtlineare Analyse problemlos integriert werden kann.

SIMULATIONS-LÖSUNGEN VON SOLIDWORKS

SOLIDWORKS bietet jetzt Skalierbarkeit und das gesamte Spektrum an nichtlinearen Funktionen, von Einzelquellen bis hin zu mehreren nichtlinearen Effekten für äußerst komplexe nichtlineare Phänomene. SOLIDWORKS bietet nichtlineare Funktionen in SOLIDWORKS Simulation Premium und dem cloud-basierten SIMULIAworks.

SOLIDWORKS Simulation Premium ermöglicht Ihnen die effiziente Evaluierung Ihrer Konstruktionen auf nichtlineare und dynamische Reaktionen, dynamische Lasten sowie Verbundwerkstoffe und umfasst zwei erweiterte nichtlineare Studien: nichtlinear statische und nichtlinear dynamische Analysen.

[Weitere Informationen zur SOLIDWORKS Simulation Suite finden Sie hier.](#)

SIMULIAworks erweitert SOLIDWORKS Simulation, insbesondere beim Lösen von Analysen mit mehreren nichtlinearen Effekten, die gleichzeitig ausgeführt werden, und sequenzieller Belastung mit mehreren Schritten. SIMULIAworks ist eine umfassend integrierte, cloud-basierte Lösung: Analysieren Sie die strukturelle Statik, das Frequenz- und Knickverhalten, die modal-dynamische Reaktion und die strukturelle Thermik von Teilen und Baugruppen. SIMULIAworks basiert auf SIMULIA Abaqus, dem bewährten erstklassigen Solver für die Finite-Element-Analyse und ermöglicht es Ihnen, strukturelle Probleme mit hoher Komplexität zuverlässig zu lösen.

[Weitere Informationen zu SIMULIAworks finden Sie hier.](#)

Die 3DEXPERIENCE® Plattform bildet die Grundlage unserer, in 11 Branchen eingesetzten, Anwendungen und bietet ein breites Spektrum an Branchenlösungen.

Dassault Systèmes, die 3DEXPERIENCE® Company, stellt Unternehmen und Anwendern „virtuelle Universen“ zur Verfügung und rückt somit nachhaltige Innovationen in greifbare Nähe. Die weltweit führenden Lösungen setzen neue Maßstäbe bei Konstruktion, Produktion und Service von Produkten. Die Lösungen zur Zusammenarbeit von Dassault Systèmes fördern soziale Innovation und erweitern die Möglichkeiten, mithilfe der virtuellen Welt das reale Leben zu verbessern. Die Gruppe schafft Mehrwert für mehr als 250.000 Kunden aller Größenordnungen, in sämtlichen Branchen, in über 140 Ländern. Weitere Informationen finden Sie unter www.3ds.com/de.

