

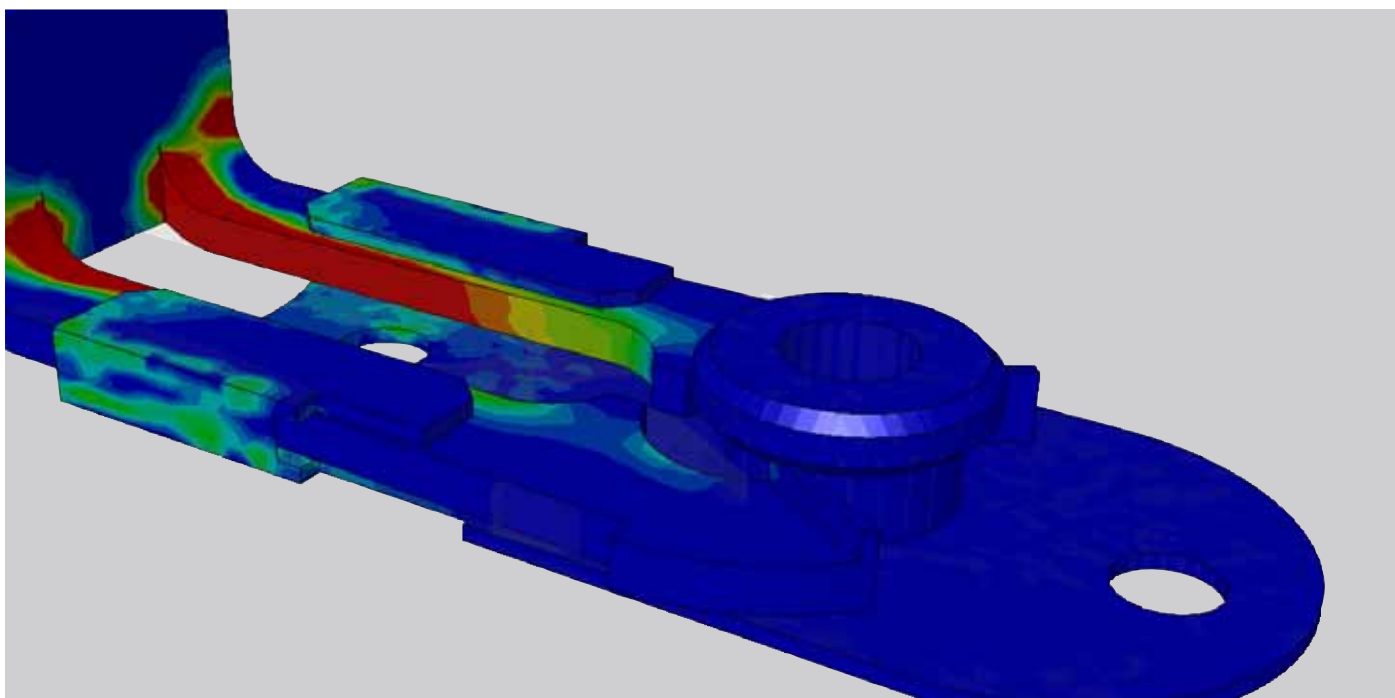
---

# DIE NICHT-LINEARE ANALYSE

---

## Übersicht

In diesem Dokument werden die Unterschiede zwischen linearer und nicht-linearer Analyse und die Verwendung dieser beiden Analysearten beschrieben. Sie werden erfahren, dass die Nichtberücksichtigung nicht-linearer Effekte zu schwerwiegenden Konstruktionsfehlern führen kann. Nach der Vorstellung einiger Beispiele aus der Konstruktionspraxis wird veranschaulicht, wie Sie mit der nicht-linearen Analyse die Überkonstruktion von Teilen vermeiden und bessere Produkte konstruieren können.



## Einführung

In den letzten zehn Jahren hat die Finite-Elemente-Analyse (FEA) Einzug in die Konstruktionspraxis gehalten und wird nicht mehr als reines Analytikers-Werkzeug betrachtet. Die heute auf dem Markt verfügbare CAD-Software enthält integrierte FEA-Funktionen, und Konstrukteure setzen die Finite-Elemente-Analyse 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 nicht-linearen Ansatz erfordern.

Aufgrund der komplizierten Problemformulierung und der langen Lösungszeit wurde die nicht-lineare Analyse von Konstrukteuren in der Vergangenheit nur ungern eingesetzt. Dieses Verhalten ändert sich nun, da FEA-Software in CAD-Software integriert und weitaus einfacher zu verwenden ist. Außerdem haben verbesserte Lösungsalgorithmen und leistungsstarke Desktop-Computer zu einer Verkürzung der Lösungszeiten beigetragen. Vor einem Jahrzehnt haben sich Ingenieure die Finite-Elemente-Analyse als wertvolles Konstruktionswerkzeug erschlossen. Jetzt erkennen Sie langsam die Vorteile und den Nutzen, den die nicht-lineare Finite-Elemente-Analyse dem Konstruktionsprozess bringt.

---

Der Begriff „Steifigkeit“ definiert den grundlegenden Unterschied zwischen linearer und nicht-linearer Analyse. Steifigkeit ist eine Eigenschaft, die die Reaktion eines Teils oder einer Baugruppe auf eine angewendete Last beschreibt. Drei Hauptfaktoren beeinflussen die Steifigkeit: Form, Material und Teilunterstützung.

## Unterschiede zwischen linearer und nicht-linearer Analyse

Der Begriff „Steifigkeit“ definiert den grundlegenden Unterschied zwischen linearer und nicht-linearer Analyse. Steifigkeit ist eine Eigenschaft, die die Reaktion eines Teils oder einer Baugruppe auf eine angewendete Last beschreibt. Die Steifigkeit wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

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



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



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

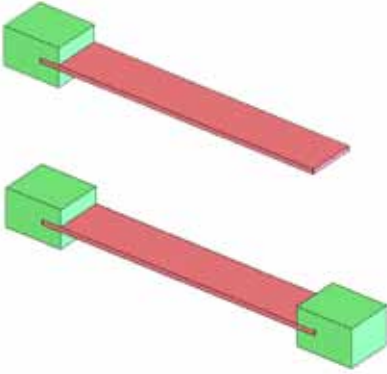


Abbildung 1: Ein Auslegerbalken (oben) weist eine geringere Steifigkeit auf als ein an beiden Enden gestützter Balken (unten).

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-Analyse lautet wie folgt:

$$[F] = [K] * [d]$$

Dabei gilt Folgendes:

[F] ist der bekannte Vektor der Knotenlasten.

[K] ist die bekannte Steifigkeitsmatrix.

[d] ist der unbekannte Vektor der Knotenverschiebungen.

Diese Matrixgleichung beschreibt das Verhalten von FEA-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 (Lagern) ab. Unter der Annahme bei linearen Analysen, dass sich die Modellsteifigkeit niemals ändert, werden diese Gleichungen nur einmal aufgestellt und gelöst, d. h. dass während der Modellverformung keine Aktualisierungen vorgenommen werden müssen. Die lineare Analyse erfolgt somit von der Problemformulierung bis zum Abschluss geradlinig und liefert selbst bei sehr großen Modellen innerhalb weniger Sekunden oder Minuten die Ergebnisse.

Der nicht-linearen 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 nicht-linearen Gleichungslösers aktualisiert werden. Aufgrund dieser Iterationen dauert es länger, genaue Ergebnisse zu erzielen.

---

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

### Nicht-lineare Geometrie

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

Zu solchen durch die Form bedingten Änderungen der Steifigkeit kann es kommen, wenn ein Teil große Verformungen aufweist, die mit dem bloßen Auge zu erkennen sind. Als Faustregel gilt, bei einer Verformung von mehr als  $1/20$  der größten Teilbemaßung eine Analyse der nicht-linearen Geometrie auszuführen. Außerdem ist zu beachten, dass sich im Fall von großen Verformungen die Lastrichtung mit der Modellverformung ändern kann. Die meisten FEA-Programme bieten zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung dieser Richtungsänderung: nicht konservative und konservative Belastung.

Die Richtung einer nicht konservativen Belastung ändert sich, wie in Abbildung 2 gezeigt, in Bezug auf das verformte Modell. Eine konservative Belastung behält die ursprüngliche Richtung bei.

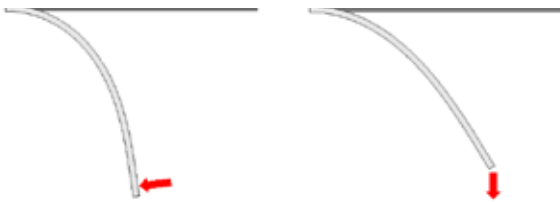


Abbildung 2: Die Richtung einer nicht konservativen Belastung ändert sich während der Verformung und bleibt normal auf den verformten Träger (links). Eine konservative Belastung behält die ursprüngliche Richtung bei (rechts).

Ein einem sehr hohen Druck ausgesetzter Druckbehälter, bei dem sich die Form erheblich ändert, ist ein weiteres Beispiel für die zuletzt beschriebene Situation. Die Drucklast wirkt immer normal auf die Wände des Druckbehälters. Während bei der linearen Analyse dieses Szenarios angenommen wird, dass sich die Form des Behälters nicht ändert, muss bei einer realistischen Analyse die geometrische Nichtlinearität mit nicht konservativer Belastung berücksichtigt werden.

---

Als Faustregel gilt, bei einer Verformung von mehr als  $1/20$  der größten Teilbemaßung eine Analyse der nicht-linearen Geometrie auszuführen. 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 unter Druck durchbiegt (siehe Abbildung 3).

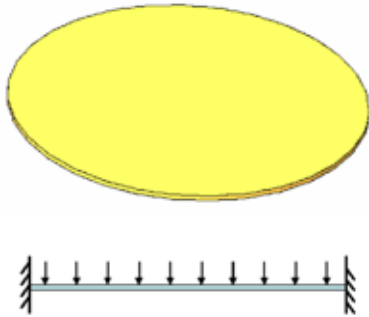


Abbildung 3: Bei der Analyse einer flachen Membran unter Drucklast müssen geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, obwohl die Verformung u. U. sehr gering ist.

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, so dass die verformte Membran weitaus steifer als die flache Membran ist.

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

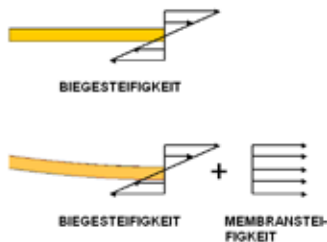


Abbildung 4: Eine flache Membran reagiert auf eine Last nur mit Biegesteifigkeit. Aufgrund der Verformung kommt die MembranstEIFigkeit hinzu. Daher ist die Steifigkeit weitaus höher, als mit einer linearen Analyse vorhergesagt wird.

### Nicht-lineares 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 zu den Laständerungen steigen. Es wird außerdem angenommen, dass es zu keiner dauerhaften Verformung kommt und das Modell seine ursprüngliche Form wieder annimmt, wenn die Last entfernt wurde.

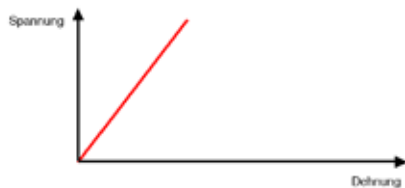


Abbildung 5

Auch bei geringen Verformungen kann es zu einer Änderung der Steifigkeit kommen. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine anfänglich flache Membran, die 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.

Obwohl diese Vereinfachung annehmbar ist, muss ein nicht-lineares Materialmodell verwendet werden, wenn die Lasten intensiv genug sind, um eine gewisse dauerhafte Verformung zu verursachen, wie dies z. B. bei den meisten Kunststoffen der Fall ist, oder wenn die Dehnungen sehr stark sind (in manchen Fällen über 50 %), wie bei Gummi und Elastomeren.

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

Wenn die Lasten intensiv genug sind, um eine gewisse dauerhafte Verformung zu verursachen, wie dies z. B. bei den meisten Kunststoffen der Fall ist, oder wenn die Dehnungen sehr stark sind (in manchen Fällen über 50 %), wie bei Gummi und Elastomeren, muss ein nicht-lineares Materialmodell verwendet werden.

MATERIAL-KLASSIFIZIERUNG	MODELL	ANMERKUNGEN
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 nicht komprimierbare Elastomere, wie z. B. Gummi.
	Blatz-Ko	Dieses Modell eignet sich für komprimierbaren PE-Schaumstoff.
Viskoelastisch	Mehrere Modelle (wahlweise mit anderen Modellen)	Dieses Modell eignet sich für Hartgummi oder Glas.
Kriechen	Mehrere Modelle (wahlweise mit anderen Modellen)	Kriechen ist eine zeitabhängige Dehnung, die unter Dauerspannung entsteht. Sie tritt in den meisten Konstruktionsmaterialien auf – insbesondere bei Metallen, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden, Kunststoffen mit hohem Polymergehalt, Beton sowie Festtreibstoffen in Raketentriebwerken.
Superelastisch (Formgedächtnislegierungen)	Nitinol	Formgedächtnislegierungen wie Nitinol zeigen einen superelastischen Effekt. Dieses Material unterliegt während der zyklischen Be- und Entlastung großen Verformungen, die jedoch nicht dauerhaft sind.

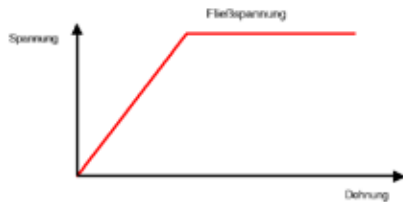


Abbildung 6: Spannungs-Dehnungskurve eines elastisch-ideal plastischen Materialmodells. Bei diesem Materialmodell kann die maximale Spannung die Spannungsgrenze im plastischen Bereich (Fließspannung) überschreiten.

Bei der Analyse eines elastisch-ideal plastischen Materialmodells (d. h. eines Materials, dem es gänzlich unmöglich ist, nach der Verformung wieder seine ursprüngliche Form anzunehmen) bleibt die Spannung oberhalb eines bestimmten Dehnungswerts konstant. Das Materialmodell beschreibt das Gusseisenmaterial eines durch acht Schrauben in Position gehaltenen Schotts und ist eines der einfachsten nicht-linearen Materialmodelle. Die Spannungs-Dehnungskurve ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die lineare Analyse ergibt eine maximale von-Mises-Spannung von 614 MPa (89.600 psi) gegenüber einer Materialfließgrenze von 206 MPa (30.000 psi). Die Ergebnisse dieser linearen Analyse sind in Abbildung 7 dargestellt.

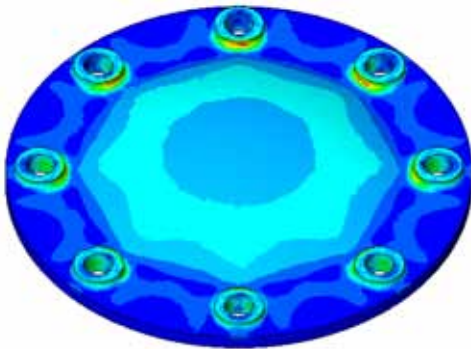


Abbildung 7: Das Ergebnis einer linearen Spannungsanalyse eines Schotts zeigt sehr hohe und örtlich begrenzte Spannungskonzentrationen.

Kommt es zu einem Bruch des Schotts, wenn die Spannung die Fließgrenze übersteigt? Um dies herauszufinden, muss ein elastoplastisches Materialmodell zur Bestimmung des Plastizitätsgrads des Materials verwendet werden. Abbildung 8 zeigt die nicht-lineare Lösung, bei der die maximale Spannung der Fließspannung entspricht. Die plastischen Bereiche sind weiterhin örtlich begrenzt, was darauf hinweist, dass das Schott nicht auseinander brechen wird. Natürlich ist bei der Entscheidung, ob diese Konstruktion akzeptabel ist, eine sorgfältige technische Beurteilung erforderlich.

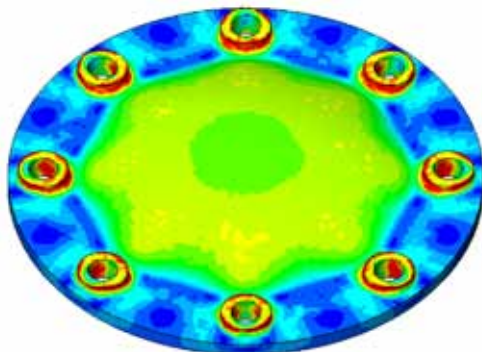


Abbildung 8: Mit einem elastisch-ideal plastischen Materialmodell erhaltene nicht-lineare Spannungslösung. Die roten Bereiche weisen auf die Plastifizierung des Materials hin. Die plastischen Bereiche sind örtlich begrenzt.

---

Bei der Analyse eines elastisch-ideal plastischen Materialmodells (d. h. eines Materials, dem es gänzlich unmöglich ist, nach der Verformung wieder seine ursprüngliche Form anzunehmen) bleibt die Spannung oberhalb eines bestimmten Dehnungswerts konstant.

Abbildung 9 zeigt das Ergebnis der linearen Spannungsanalyse einer Aluminiumhalterung. Die maximale Spannung beträgt 44 MPa (6.400 psi). Unberücksichtigt bleibt dabei die Tatsache, dass die Fließgrenze des Materials bei 28 MPa (4.100 psi) liegt.

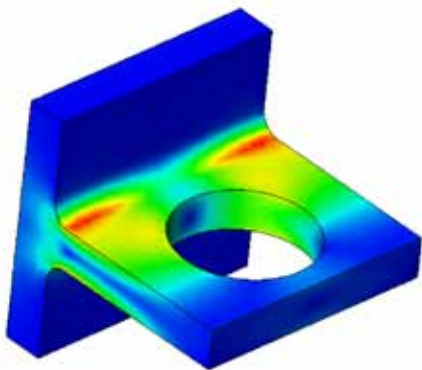


Abbildung 9: Die lineare Spannungsanalyse einer hohlen Halterung ergibt Spannungen oberhalb der Materialfließspannung.

Bei einer nicht-linearen Analyse des Materials kann berücksichtigt werden, dass das Material bei einer maximalen Spannung von 28 MPa (4.100 psi) zu fließen beginnt (Abbildung 10). Die nicht-linearen Spannungsergebnisse lassen erkennen, dass die Halterung ganz kurz vor einem Bruch steht. Nahezu der gesamte Querschnitt des Auslegers besteht aus plastischen Bereichen. Eine leichte Lasterhöhung würde zu einer vollständigen Plastizität des Querschnitts und der Entwicklung eines plastischen Gelenks führen, was den Bruch der Halterung zur Folge hätte.

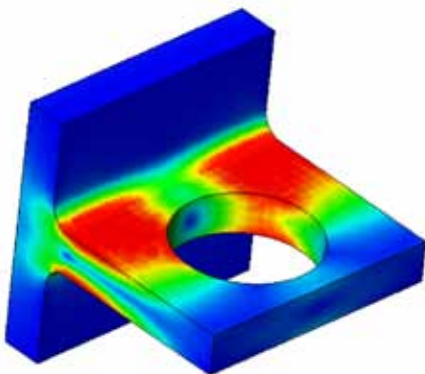


Abbildung 10: Das Ergebnis der nicht-linearen Spannungsanalyse ergibt, dass die maximale Spannung nicht höher als die Fließspannung ist. Der Plastizitätsgrad weist darauf hin, dass die Halterung kurz vor der Bildung eines plastischen Gelenks steht. Die maximale Belastung ist erreicht.

Kommt es zu einem Bruch des Schotts, wenn die Spannung die Fließgrenze übersteigt? Um dies herauszufinden, muss ein elastoplastisches Materialmodell zur Bestimmung des Plastizitätsgrads des Materials verwendet werden. Die plastischen Bereiche sind weiterhin örtlich begrenzt, was darauf hinweist, dass das Schott nicht auseinanderbrechen wird.



Bei der Modellierung des Auf- und Zurückbiegens einer herkömmlichen Metallbüroklammer müssen sowohl Material- als auch geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Abbildung 11 zeigt die verformte Geometrie der Büroklammer mit einem elastisch-ideal plastischen Materialmodell. In Abbildung 12 sind die Restspannungen dargestellt, nachdem die Büroklammer in die ursprüngliche Form zurückgebogen wurde.

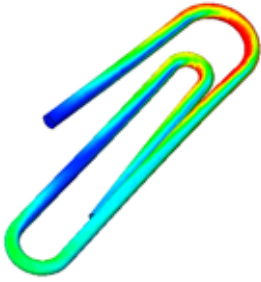


Abbildung 11: Das Biegen einer Büroklammer muss unter Berücksichtigung der Material- und geometrischen Nichtlinearitäten analysiert werden. Die auseinandergebogene Büroklammer weist plastische Spannungen auf.

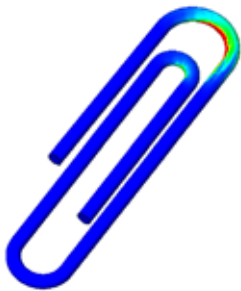


Abbildung 12: Die wieder in ihre ursprüngliche Form zurückgebogene Büroklammer zeigt Restspannungen.

### **Verlust der elastischen Stabilität (Knicken)**

Auch aufgrund angewendeter 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. Wenn die Steifigkeit der Struktur bei einer Drucklast auf Null sinkt, kommt es zum Knicken und einer rapiden Verformung. Die Struktur bricht dann entweder auseinander oder verfügt in der Form nach dem Knicken über eine neue Steifigkeit.

Mit der linearen Knickanalyse kann die Last berechnet werden, unter der es zum Knicken einer Struktur kommt (Euler-Last). Die Ergebnisse der linearen Knickanalyse sind jedoch nicht konservativ. Darüber hinaus können Idealisierungen des FEA-Modells dazu führen, dass die vorhergesagte Knicklast für das FEA-Modell weitaus höher als für das reale Teil ist. Daher sollten die Ergebnisse der linearen Knickanalyse mit Vorsicht behandelt werden.

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

In den Abbildungen 13 und 14 ist das Snap-Through-Verhalten dargestellt. Das Teil kann auch nach dem Knicken noch der Last standhalten.

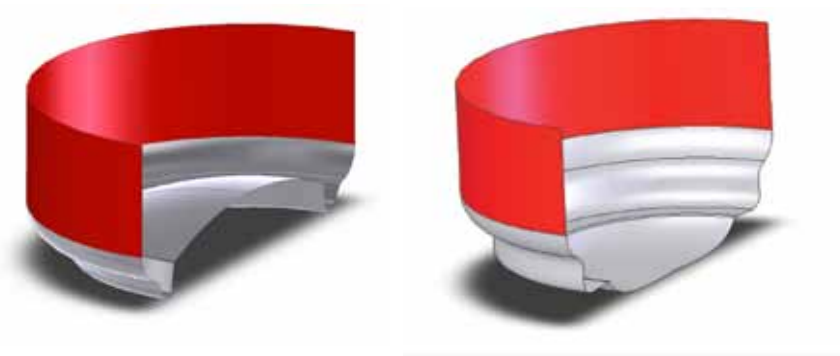


Abbildung 13

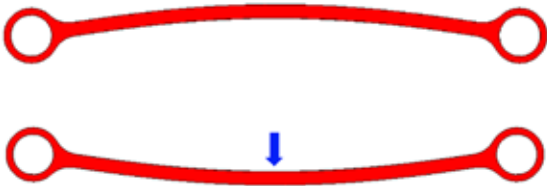


Abbildung 14: Zur Analyse des Snap-Through-Verhaltens ist ein nicht-linearer Ansatz erforderlich.

### **Kontaktspannungen und nicht-lineare Unterstüzungen**

Wenn sich die Unterstüzungsbedingungen, einschließlich der Kontakte, unter den Betriebslasten ändern, muss eine nicht-lineare 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 15 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 nicht-lineare Analyse erforderlich.

---

Wenn sich die Unterstüzungsbedingungen, einschließlich der Kontakte, unter den Betriebslasten ändern, muss eine nicht-lineare Analyse durchgeführt werden.

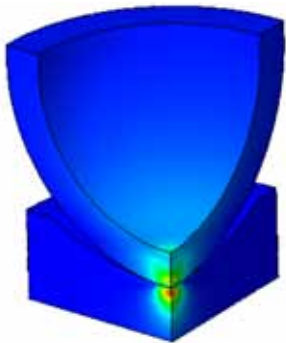


Abbildung 15: Die Kontaktspannungsanalyse, mit der die zwischen zwei Kugeln (in der Abbildung ist nur eines der beiden sich berührenden Teile dargestellt) entstehenden Spannungen modelliert werden, gehört zur Kategorie der Analyse mit nicht-linearen Unterstüzungen.

In Abbildung 16 ist ein Beispiel für nicht-lineare Unterstüztungen dargestellt. Die effektive Balkenlänge und die sich daraus ergebene Steifigkeit hängen vom Grad der Balkenverformung ab. Wenn der Balken die Unterstüztung berührt, steigt die Steifigkeit aufgrund der kürzeren effektiven Länge.

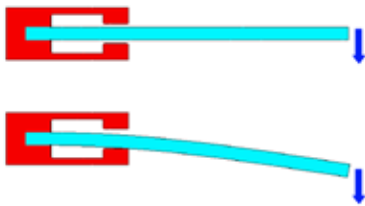


Abbildung 16: Durch diese Unterstüztung wird bei Aktivierung die effektive Länge des Balkens geändert. Infolgedessen ändert sich die Balkensteifigkeit, und für das Problem wird eine nicht-lineare Analyse erforderlich.

## Nicht-lineare dynamische Analyse

Bei der dynamischen Analyse werden Trägheitsmomente, Dämpfungseffekte und zeitabhängige Lasten berücksichtigt. So ist z. B. für Fallprüfungen, Schwingungen eines Motorblocks, eine Airbag-Auslösung oder Crash-Simulation eine dynamische Analyse erforderlich. Ist die dynamische Analyse aber nun linear oder nicht-linear? 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 Modellierung eines Metallpressprozesses ist eine nicht-lineare dynamische Analyse erforderlich, da es sowohl zu großen Verformungen (nicht-lineare Geometrie) als auch starken Dehnungen (nicht-lineares Material) kommt.

## Wie kann die nicht-lineare Analyse zur Konstruktion besserer Produkte beitragen?

Die Natur ist nicht-linear. Das bedeutet, dass mit der linearen Analyse das reale nicht-lineare Verhalten von Teilen und Baugruppen nur angenähert werden kann. In den meisten Fällen 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.

Wenn der Beurteilung, ob ein Teil unter Betriebslasten versagt, die Ergebnisse einer linearen Analyse zugrunde gelegt werden, führt dies möglicherweise zu einer Überkonstruktion des Teils. 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 nicht-lineare 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 strukturmechanische Integrität zu gefährden. Um ein weiteres Beispiel zu nennen, könnte ein Konstrukteur eine flache Platte überkonstruieren, 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 Konstruktion ursprünglich in Ordnung war.

---

In vielen Fällen unterscheiden sich die linearen Annahmen jedoch zu sehr von der Realität und liefern zu grobe oder irreführende Informationen. Wenn die Ergebnisse der linearen Analyse als Grundlage für die Entscheidung verwendet werden, ob ein Teil unter der Betriebslast versagt, ist möglicherweise ein überkonstruiertes Teil die Folge.

## Nicht-lineare Analyse in der Konstruktionspraxis

Sobald ein Konstrukteur ausreichend Erfahrung bei der Erkennung nicht-linearer Probleme gesammelt hat, zeigt sich eindeutig, dass die Anwendung dieser Technik nicht auf spezielle Situationen beschränkt ist. Konstruktionen, für die eine nicht-lineare 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 nicht-linearen Analyse getroffen werden kann. Bei vielen dieser Probleme liegen mehrere Arten der Nichtlinearität zugrunde.

### Umlenkrolle (Abbildung 17)

Diese gepresste Stahlrolle kann unter der Riemenlast knicken, bevor sich übermäßige Spannungen entwickeln. Obwohl eine lineare Knickanalyse u. U. ausreicht, um die Knicklast zu bestimmen, ist eine nicht-lineare Analyse zur Untersuchung des Verhaltens nach dem Knicken erforderlich.



Abbildung 17

### Membranfeder (Abbildung 18)

Die nicht-linearen Federeigenschaften machen eine Analyse der nicht-linearen Geometrie notwendig, um Membraneffekte zu berücksichtigen.



Abbildung 18

### Überrollschutz (Abbildung 19)

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 analysiert werden.



Abbildung 19

### **Geburtszange (Abbildung 20)**

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 nicht-linearen elastischen Material Rechnung zu tragen.



Abbildung 20

### **Lüftergitter (Abbildung 21)**

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

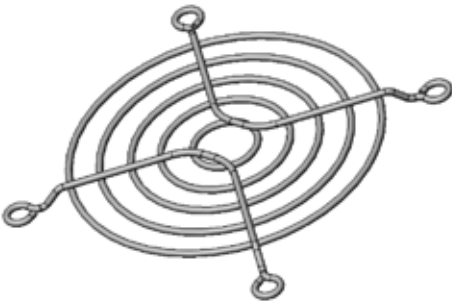


Abbildung 21

### **Sprengring (Abbildung 22)**

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



Abbildung 22

### **Luftfrachtcontainer (Abbildung 23)**

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

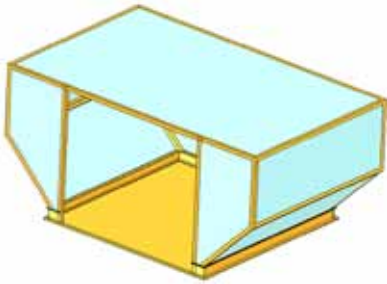


Abbildung 23

### **Bürostuhl (Abbildung 24)**

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



Abbildung 24

### **Inbusschlüssel (Abbildung 25)**

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

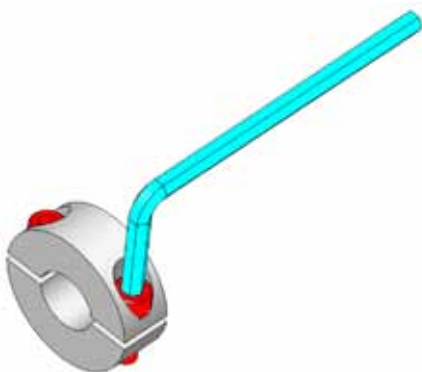


Abbildung 25

## Fazit

Die Entscheidung, ob die FEA-Software des Konstrukteurs um nicht-lineare Analysefunktionen erweitert werden soll, sollte auf Grundlage der Art der Analyseprobleme getroffen werden. Wenn die tägliche Arbeit nur den ist es u. U. sinnvoller, einen Analyseexperten zu Rate zu ziehen oder einen Berater zu beauftragen. Wenn aufgrund der Art der konstruierten Produkte bei der Analyse von Konstruktionsproblemen regelmäßig große Verformungen, Membraneffekte, Material-Nichtlinearitäten, Kontaktspannungen, Knicken oder nicht-lineare Unterstützungen zu berücksichtigen sind, sollte die von den Konstrukteuren im Unternehmen verwendete FEA-Software um Funktionen zur nicht-linearen Analyse erweitert werden.

In den letzten zehn Jahren haben sich Konstrukteure an die Verwendung der Finite-Elemente-Analyse als Konstruktionswerkzeug gewöhnt. Heute sind FEA-Software und Computer-Hardware genügend ausgereift, so dass die nicht-lineare Analyse problemlos integriert werden kann.

---

Unternehmenssitz  
Dassault Systèmes  
SolidWorks Corp.  
300 Baker Avenue  
Concord, MA 01742 USA  
Telefon: +1-978-371-5011  
E-Mail: [info@solidworks.com](mailto:info@solidworks.com)

Hauptsitz Europa  
Telefon: +33-(0)4-13-10-80-20  
E-Mail: [infoeurope@solidworks.com](mailto:infoeurope@solidworks.com)

Niederlassung Deutschland  
Telefon: +49-(0)89-612-956-0  
E-Mail: [infogermany@solidworks.com](mailto:infogermany@solidworks.com)

