

9 Zuverlässigkeit von FEM-Analysen

Das Vertrauen in die Güte von FEM-Analysen ist, basierend auf den langjährigen guten Erfahrungen bei deren Anwendung, erheblich gestiegen. Dementsprechend werden von den Auftraggebern (firmenintern oder -extern) qualitativ hochwertige Berechnungen verlangt. Fehler des Berechnungsingenieurs können in diesem Zusammenhang für diesen existenzbedrohend sein. Die aus der so genannten Produkthaftung entstehenden Haftungsrisiken können auf drei Arten beschränkt werden:

- Vermeiden von Fehlern
- Vertraglicher Ausschluss bzw. die Begrenzung der Haftung für Fehler
- Abschluss einer auf Risiken des Auftragnehmers (Ingenieurbüro) zugeschnittenen Haftpflichtversicherung.

Am wichtigsten ist natürlich die Vermeidung von Fehlern. Ich möchte hier nur auf diesen Punkt weiter eingehen. Eine wichtige Bemerkung von SolidWorks zu diesem Thema finden Sie unter *Simulation Info*:

Begründen Sie Ihre Konstruktionsentscheidungen nicht ausschließlich auf Ergebnisse der Simulation Konstruktionsanalyse-Software. Verwenden Sie diese Informationen in Kombination mit experimentellen Daten und praktischen Erfahrungswerten.
Praktische Tests sind zur Bewertung der endgültigen Konstruktion unerlässlich. Die Simulation Konstruktionsanalyse-Software hilft, die Zeit zur Erlangung der Marktreife zu reduzieren, indem praktische Tests verringert aber nicht eliminiert werden können.

Sowohl die Berechnung „von Hand“ wie auch die FEM-Analyse bergen oftmals viele Unsicherheiten und Ungenauigkeiten wie u. a.:

- Abmessungen und Werkstoffwerte haben Toleranzen
- Kanten sind nicht „scharf“
- Lager sind nicht starr
- Kräfte sind nicht punkt- oder linienförmig
- Finite Elemente Methode ist eine Näherungsmethode – eine absolute Genauigkeit ist nicht erreichbar.

Diese Unsicherheiten versucht man mit entsprechenden Sicherheitswerten aufzufangen. Die Qualität einer durchzuführenden Festigkeitsuntersuchung richtet man auch nach der Risikoklasse des Produktes. So teilt die NAFEMS (das ist die „International Association for the Engineering Analysis Community“) Produkte in drei Risikoklassen ein:

1. **höchst relevant**, d. h. bei Versagen der Struktur kann ein Katastrophenfall eintreten und die rechnerische Analyse ist alleiniger, zentraler Bestandteil des Qualifikationsnachweises.

2. **sicherheitsrelevant**, d. h. Versagen der Struktur muss entweder zur ernststen Gefährdung von Leib und Leben oder hohen direkten Schäden bzw. hohen Folgeschäden führen oder das Versagen fällt in Risikoklasse 1, ist aber nicht alleiniger Qualifikationsnachweis.
3. **beratend** – diese Kategorie wird in allen Fällen angewendet, die nicht in die beiden oberen Kategorien fallen.

Da die Sicherheit eines Produktes unter Umständen erheblich von den Rückschlüssen der Analyse abhängt, müssen die anzuwendenden Verfahren und Vorgehensweisen dementsprechend gewählt werden. Die Risikoklasse bestimmt also die Verifizierung der Software, die Überprüfung des Modells sowie die Personalauswahl, die für die jeweilige Berechnung angewandt wird.

Die Validierung, d. h. das Prüfen auf Richtigkeit der Ergebnisse einer Berechnung ist sehr schwierig und wohl genauso unmöglich wie der Nachweis, dass ein Rechenprogramm richtig arbeitet [8]. Gerade den Ergebnissen, die mit einem Computerprogramm ermittelt wurden, sollte unbedingt Skepsis entgegengebracht werden. Es können nämlich schnell schwerwiegende Fehler eintreten:

- **Falsche oder fehlerhafte Problemanalyse:** Bei mangelnden Grundkenntnissen in Mechanik, Festigkeitslehre, Konstruktionslehre und der FEM kann der Ingenieur keine fundierte Problemanalyse durchführen, d. h. er erkennt die Problematik nur unzureichend.
- **Unangemessene Vernetzung:** zu grobe Vernetzung.
- **Wahl eines falschen Programms:** Wenn in einer Konstruktion Nichtlinearitäten (Große Verformungen ergeben eine Änderung der Geometrie, Kontaktstellen mit sich ändernder Richtung und z. B. Gummibauteile) vorliegen, dürfen Sie keinesfalls eine statische Studie, wie sie in diesem Buch immer ausgeführt wurden, durchführen. Das würde auf jeden Fall zu völlig falschen und unbrauchbaren Ergebnissen führen.
- **Fehler in Computerprogrammen:** Wie wir leider alle wissen, hat vermutlich jede Software Fehler. Jeder Programm-Absturz deutet auf einen Programmierfehler hin. Man kann also die Ergebnisse einer FEM-Analyse nie als ganz sicher annehmen.
- **Falsche Bedienung eines Programms:** Sehr schnell hat man bei der Eingabe von Werten Fehler gemacht. Vor allem bei den Last- und Lagerdefinitionen können sehr schnell falsche Annahmen getroffen werden. Oftmals kann man für die gleiche Aufgabe verschiedene Lagertypen verwenden und das kann zu großen Abweichungen bei den Ergebnissen führen. Zusammengefasst muss man festhalten, dass eine Zehnerpotenz Fehler in einem Ergebnis einfach zu erreichen ist. Solche Werte sind leider unbrauchbar.
- **Falsch angenommene oder nicht berücksichtigte Lastfälle**
- **Falsche Werkstoffdaten**

Wie man in den vielen durchgerechneten Beispielen gesehen hat, wird bei einfachen Strukturberechnungen eine hohe Zuverlässigkeit und Qualität der Ergebnisse erreicht. Schwierige Analysen mit komplizierten Formen sind generell mit größerer Vorsicht zu betrachten.

Die Ergebnisse einer FEM-Analyse können auf verschiedene Arten kontrolliert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Validierung und Verifizierung. Unter Validierung

versteht man alternative theoretische Überprüfungen, wie Kontrollrechnungen von Hand. Mit einer Verifizierung sind praktische Messungen mit z. B. Dehnmessstreifen gemeint.

Zum Schluss noch eine Übersicht zur Ergebniskontrolle:

- **Vorgängiges Abschätzen der Ergebnisse:** Dies kann man mit überschlägigen Kontrollrechnungen machen.
- **Kontrolle durch das FEM-Programm selber:** Das Programm meldet z. B. fehlende Materialdaten, etc. Auch kann der Konvergenzverlauf mehrerer FEM-Analysen angezeigt werden.
- **Parallelanalyse:** Nachrechnung durch einen zweiten Berechnungsingenieur mit einer anderen Software.
- **Überprüfung durch praktische Messungen**