Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 116 (1998)
Heft: 14

Artikel: Qualitätssicherung bei FE-Simulation und -analysen
Autor: Farshad, Mehdi / Paradies, Rolf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79475

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Mehdi Farshad und Rolf Paradies, Dübendorf

Qualitätssicherung bei FE-Simulation und -analysen

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) ist ein weitverbreitetes Analyse- und Simulationsverfahren, das in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt wird. Aufgrund der bedienerfreundlichen FE-Programmsysteme sind z.B. auch ungeübte Anwender in der Lage, numerische Berechnungen durchzuführen. Um mögliche Fehler bei FE-Analysen erkennen zu können, ist eine entsprechende Qualitätskontrolle dringend empfehlenswert. Dieser Beitrag zeigt neben der Notwendigkeit der Qualitätssicherung bei FE-Simulationen auch Möglichkeiten zu deren Realisierung auf.

Die effiziente Bearbeitung ingenieurmässiger Untersuchungen bedingt den Einsatz angepasster Lösungsmethoden, von denen eine Vielzahl zur Verfügung steht, die sich in ihrem Arbeitsaufwand wesentlich unterscheiden. So können beispielsweise einige von ihnen - vorwiegend die numerischen Lösungsmethoden - nur unter dem Einsatz von Datenverarbeitungssystemen zufriedenstellend verwendet werden. Demzufolge werden die Lösungsmethoden auch in die Gruppe der sogenannten analytischen Methoden (geschlossene Lösungen) sowie in die Gruppe der numerischen Methoden eingeteilt, die sich jeweils in weitere Untergruppen aufteilen (Bild 1).

Der Hauptanwendungsbereich der numerischen Methoden liegt besonders in der Analyse komplexer Aufgabenstellungen, die mit Hilfe analytischer Modelle nicht bzw. nicht ausreichend genau beschrieben werden können. Typische Anwendungen sind z.B. Strukturen mit komplizierter Geometrie und/oder Materialverhalten, wie z.B. Luft- und Raumfahrtstrukturen, Schiffe, Autos, Brücken, Staudämme und Gummibauteile.

Weiterhin eignen sich numerische Lösungsmethoden besonders zur Analyse von Wechselwirkungen in Systemen, wie diese in der Mechanik (z.B. Kontaktprobleme), Strömungstechnik (Solid/Fluid-Wechselwirkungen) Elektrotechnik (elektrisch-thermisch-mechanische Wechselwirkungen) und Medizin bzw. Biomechanik (Wechselwirkung zwischen Knochen und Knochenprothese oder zwischen Blutfluss und Arterienwand) auftreten.

Aufgrund ihrer Vielseitigkeit werden numerische Methoden zur Auslegung und Optimierung von Strukturen bzw. Struktursystemen ebenso eingesetzt wie zur Kontrolle experimenteller Untersuchungen oder zum Aufbau von Expertensystemen. Ein typischer Vertreter der numerischen Lösungsmethoden ist die Methode der Finiten Elemente, mit der in einer virtuellen Umgebung (virtuelle Realität) ein Ersatzmodell der Realität unter Einsatz numerischer Methoden analysiert werden kann. Dabei ist festzuhalten, dass sowohl die Modellierung als auch die numerische Berechnung im eigentlichen Sinn eine Approximation darstellt, mit der nur unter Einhaltung der jeweiligen Gültigkeitsbereiche zuverlässige Aussagen über das Verhalten des realen Analyseproblems gemacht werden können.

Es existieren mehrere Typen von FE-Analysen, die nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden können.

In der Regel erfolgt die Einteilung nach der Art der Belastung, d.h. statisch oder dynamisch und dem Material- bzw. Strukturverhalten entsprechend in lineare und nichtlineare Analysen. In Bild 2 sind typische Beispiele dieser Analysetypen sowie deren mögliche Kombinationen aufgeführt.

Qualitätssicherung bei FE-Analysen

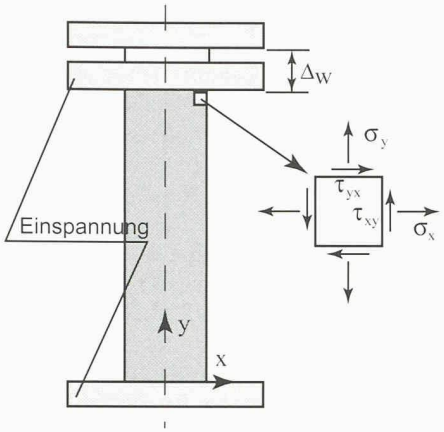
Bei einer FE-Analyse wird die Aufgabenstellung aus der Realität durch ein konzipiertes Modell (physikalisch-rechnerische Modellierung) rekonstruiert. Im Rahmen der dazu notwendigen Abstraktion der Realität über das physikalische zum rechnerischen Modell können unzulässige Vereinfachungen auftreten, infolge derer die Resultate der numerischen Berechnung wesentlich von der realen Situation abweichen. Das Ziel einer Qualitätssicherung bei FE-Analysen ist, diese möglichen Abweichungen zu vermeiden und somit die Richtigkeit von numerischen Berechnungsergebnissen zu gewährleisten. Dies umfasst neben der Richtigkeit des physikalischen Modells sowohl die Eignung des rechnerischen Modells als auch der rechnerischen Mittel und somit die Richtigkeit des rechnerischen Verfahrens und der darauf basierenden Ergebnisse inklusive deren Interpretation. Ferner beinhaltet es die Gewährleistung der Wiederholbarkeit, d.h., dass die gleichen Resultate sowohl von unterschiedlichen Anwendern als

FE-Analysematrix	Analysetyp
linear	Steifigkeits- und Versagensanalyse von isotropen, anisotropen Körpern, Verbund- und Sandwichstrukturen Beulanalyse
dynamisch (linear und nichtlinear)	Frequenzanalyse Modal- und Transientenanalyse Ermüdungsanalyse
nichtlineares Strukturverhalten	grosse Dehnung grosse Verformung grosse Dehnung und Verformung Nachbeulanalyse
nichtlineares Materialverhalten	Elastomere viskoelastisches Verhalten plastische Verformung Kriechanalyse Kontaktprobleme

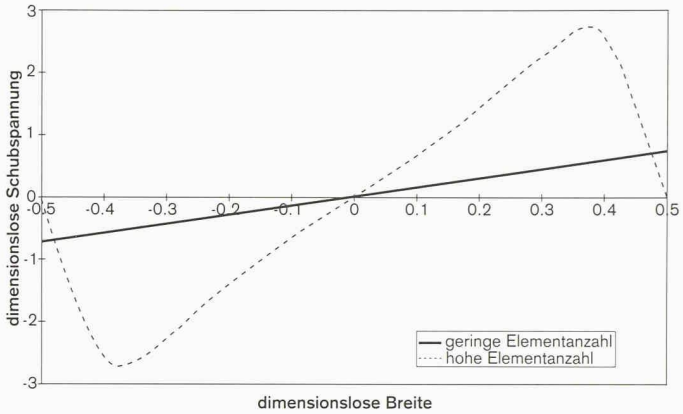
1 Lösungsmethoden für ingenieurmässige Untersuchungen

Analytische Methoden	Numerische Methoden
Differentialmethode	Finite-Elemente-Methode (FEM)
Integralmethode	Rand-Elemente-Methode (REM)
Methode der Differenzengleichungen	Finite-Differenzen-Methode (FDM)
Halbanalytische Methode	
Variationsmethode	

2 Einteilung unterschiedlicher FE-Analysen



3
Axial belasteter Zugstab mit ebenem Spannungszustand



4
Qualitativer Verlauf der Schubspannungsverteilung τ_{xy} am oberen Rand des Stabs in Abhängigkeit der Elementanzahl über die Stabbreite

auch auf verschiedenen Programmsystemen bestätigt werden. Die Notwendigkeit einer derartigen Qualitätssicherung bei FE-Analysen kann am folgenden einfachen Beispiel eines axial belasteten Zugstabs aufgeführt werden.

Das obere Ende des in Bild 3 skizzierten Zugstabs wird gleichmässig um die Strecke Δw verschoben und der aus dieser aufgezwungenen Verformung resultierende Spannungszustand im Zugstab mit Hilfe der FEM berechnet. Der qualitative Verlauf der Schubspannungsverteilung in der Nähe der oberen Einspannung ist in Bild 4 für zwei FE-Modelle mit unterschiedlicher Elementanzahl dargestellt. Dieser Vergleich zeigt, dass bei ungeeigneter Wahl des FE-Netzes physikalische Effekte, wie in diesem Fall die Konzentration der Schubspannung in der Nähe des freien Rands, nicht erkannt werden können.

Fehlerquellen bei FE-Analysen

Zu Beginn einer Qualitätssicherung muss eine Bestandesaufnahme der vorhandenen Situation durchgeführt werden. Dies bedeutet im Rahmen einer Qualitätssicherung bei FE-Analysen eine Auflistung aller möglichen Fehlerquellen. Diese sind zur besseren Übersicht in drei Gruppen bzw. vier Klassen eingeteilt (Bild 5).

Eine FE-Analyse setzt sich mindestens aus den drei Arbeitsschritten Modellierung, numerische Berechnung und Ergebnisdarstellung zusammen. Angesichts der dabei gleichbleibenden Reihenfolge kann die Reihenfolge angegeben werden, in der die aufgeführten Fehlerklassen während einer FE-Analyse eintreten (Bild 6).

Die System- und Simulationsfehler beziehen sich auf das verwendete FE-Programm und sollten vom Anwender dem Vertreiber bzw. Hersteller des Berechnungssystems gemeldet werden. Diese Fehler können vom Anwender stellenweise umgangen, in der Regel aber nicht behoben werden und sind somit nicht Hauptgegenstand der vorgestellten Qualitätssicherung bei FE-Analysen.

System- und simulationsbezogene Qualitätssicherung bei FE-Analysen

Zum Erkennen von System- und Simulationsfehlern stehen neben dem Vergleich der FE-Berechnung mit Resultaten aus Experimenten an der realen Struktur die sogenannten Benchmark-Tests zur Verfügung. Bei einem FEM-Benchmark werden die mit unterschiedlichen Programmen berechneten Resultate für speziell definierte Berechnungsprobleme miteinander und mit analytischen Modellen verglichen. Diese standardisierten Aufgabenstellungen werden in den USA von der «National Agency for Finite Element Methods and Standards» (NAFEMS) definiert.

Um mit diesen Benchmarks die Gültigkeit der FEM-Resultate zu gewährleisten, werden derartige Aufgabenstellungen mit ihren Lösungen – z.B. nichtlineare Verformungsanalyse von elastischen Stäben oder nichtlineare Beulanalyse von Kreiszylinderschalen – regelmässig in der Zeitschrift «Benchmark» publiziert. Diese FEM-Benchmarks sind ein Mittel zur Qualitätssicherung (QS) der FEM-Systeme, d.h. der System- und Simulationsfehler.

Welche Möglichkeiten der Qualitätssicherung existieren dagegen beim Einsatz der FEM-Systeme bzw. zur Vermeidung der Anwenderfehler?

Das vorgestellte Beispiel des Zugstabs zeigt, dass z.B. die geeignete Wahl des FE-Netzes einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat der numerischen Berechnung hat und somit der FE-Anwender die Genauigkeit einer FE-Analyse entscheidend mitbeeinflusst. Somit sind umfangreiche Kenntnisse über das Verhalten des realen Problems und ausreichende Erfahrung in der FE-Analyse notwendige Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung numerischer Simulationen, während geringe Kenntnisse vom Verhalten des realen Problems und unzureichende Erfahrung in der FE-Analyse zu den häufigsten Anwenderfehlern bei numerischen Simulationen gehören. Weitere häufige Anwenderfehler bei der FE-Modellierung sind:

5
Einteilung möglicher Fehler in einer FE-Analyse

Fehlertyp	Fehlerklasse	Beispiel
1. Systemfehler	Klasse 1 Programmierfehler	Fehler in der FE-Software bzw. in der Funktion der FE-Software
	Klasse 2 analytische Modellierungsfehler	Fehler im Elementtyp Fehler im Lösungsverfahren
2. Simulationsfehler	Klasse 3	Physikalische Modellierungsfehler Rechnerische Modellierungsfehler
3. Anwenderfehler	Klasse 4	Geringe Kenntnis vom Verhalten des Problems Geringe Erfahrung mit der FE-Analyse

Reihenfolge einer FE-Analyse			Fehlerklasse
reale Struktur	→	ideale Struktur	Klasse 3 und 4
ideale Struktur	→	FE-Modell	Klasse 2
FE-Modell	→	Netzmodell	Klasse 2
Netzmodell	→	Lösungsmodell	Klasse 2
Lösungsmodell	→	Lösung	Klasse 1
Lösung	→	Interpretation Ergebnisse	Klasse 2, 3 und 4

6
Reihenfolge des Auftretens möglicher Fehler in einer FE-Analyse

- Die Modellierung wird zum Selbstzweck und nicht als Lösung eines realen Problems eingesetzt
- Ungenügendes Verständnis des Problems mit daraus resultierendem unpassendem Modell
- Nichtbeachtung, dass Modellierung die Realität vereinfacht
- Die Realität und das dazugehörige Modell sind nicht absolut identisch
- Abweichungen in der Systemcharakterisierung gegenüber dem Problem
- Fehlerhafte Elementübergänge zwischen den einzelnen Systemkomponenten
- Benutzung unzureichender mathematischer Formulierungen
- Fehlerhafte mathematische Annahmen
- Schlecht ausgelegte Computermodellierung
- Unzweckmässiges oder ungenügendes Design der Experimente zur Verifikation der FE-Analyse oder Bestimmung von Modellparametern (z.B. Materialeigenschaften)
- Fehlerhafte oder unterlassene Interpretation der Resultate der mathematischen Analyse bezogen auf das entsprechende physikalische Problem
- Ungenügende Wahl der Kriterien für die Validierung des Modells
- Unterlassene kritische Überprüfung der Modellbeschränkungen
- Das Problem wird in den Rahmen eines bestimmten Modells gezwungen, statt das passende Modell zu wählen
- Es wird kein sinnvoller Kompromiss zwischen widersprüchlichen Faktoren gefunden
- Das mathematische Modell ist unnötig kompliziert entwickelt und birgt somit mögliche Fehlerquellen
- Selbstüberschätzung; die eigenen Beschränkungen werden nicht erkannt
- Komplexe Probleme benötigen unterschiedliche Spezialisten
- Konzentration auf Detaillösungen, ohne das Gesamtsystem zu verstehen (den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen)
- Engstirnigkeit; das Problem nur unter seinem eigenen Blickwinkel bzw. seinem eigenen Interesse und Fachwissen zu betrachten

7
Häufige Anwenderfehler bei der FE-Modellierung

Physikalisches Modell	Rechnerisches Modell
Eignung des Modells bezüglich der wirklichen Problemstellung überprüfen	Einheiten konsequent wählen
Geometrie festlegen	Geometrie und Abmessungen überprüfen
Materialeigenschaften (Dichte, Elastizitätsmodule, Masse, Fliessgrenze usw.) zuordnen	Materialeigenschaften überprüfen
	Elementtypen und -anzahl definieren
	Vernetzung, evtl. Verfeinerungen definieren
	Elementform überprüfen (Aspekt Ratio, Distorsion, Warping)
	Kontinuität und Plausibilität des Netzes überprüfen
Randbedingungen und Wechselwirkungen festlegen	Randbedingungen und Wechselwirkungen überprüfen
Belastungen zuordnen	Lasteingaben überprüfen
	Symmetriebedingungen definieren und überprüfen
	Auftreten von Stabilitätsproblemen abschätzen
	Auftreten von plastischen Deformationen abschätzen
Geeignetes Versagenskriterium festlegen	Geeignetes Versagenskriterium auswählen
Kontrolle, inwieweit physikalisches Modell wirklicher Problemstellung entspricht	Kontrolle, inwieweit das rechnerische dem physikalischen Modell bzw. wirklicher Problemstellung entspricht
Voraussetzungen dokumentieren	Rechnerische Vereinfachungen und Idealisierungen dokumentieren

- Unvollständige Dokumentation der FE-Analyse

Beim Einsatz kommerzieller FE-Programmsysteme können einige dieser Anwenderfehler auch als System- bzw. Simulationsfehler eingestuft werden. Die im folgenden vorgestellte Qualitätssicherung geht vom Einsatz derartiger kommerzieller FE-Programmsysteme zur FE-Analyse aus und konzentriert sich daher auf die Berechnungsprozedur und dabei auftretende Anwenderfehler.

Anwenderbezogene Qualitätssicherung bei FE-Analysen

Eine numerische Simulation mit Hilfe der FEM ist generell in die drei Arbeitsschritte der Modellgenerierung (Pre-Processing), der eigentlichen numerischen Berechnung (Solution) und der Ergebnisdarstellung (Post-Processing) eingeteilt. Die vorgeschlagene Qualitätskontrolle erfolgt begleitend zur numerischen Analyse, so dass auch diese in die drei Abschnitte QS vor der FE-Berechnung, QS während der FE-Berechnung und QS nach der FE-Berechnung unterteilt ist, auf die im folgenden genauer eingegangen wird.

Qualitätssicherung vor der FE-Berechnung

Jeder Modellierung sollten generell die folgenden Überlegungen vorausgehen:

- Besteht eine Notwendigkeit für eine FE-Analyse?
- Was ist das Ziel der FE-Analyse? (Spannungsanalyse?, Stabilitätsanalyse? statische/dynamische, elastische/nichtelastische, lineare/nichtlineare Analyse?)
- Ist das Problem richtig definiert?
- Kann das Verhalten des Systems abgeschätzt werden?
- Existieren massgebende Vorschriften, die berücksichtigt werden müssen?
- Steht die geeignete FE-Software zur Verfügung?

Erst wenn diese Vorabklärungen befriedigend beantwortet worden sind, sollte mit der eigentlichen Modellierung begonnen werden. Beim Abstrahieren der realen Aufgabenstellung in ein physikalisches Modell und dessen Umsetzung in ein rechnerisches Modell empfiehlt es sich, analog zu Bild 7 vorzugehen.

Qualitätssicherung während der FE-Berechnung

Im Anschluss an die Modellierung erfolgt die numerische Lösung des rechnerischen Modells, wobei auf die Berechnung wie folgt Einfluss genommen werden kann:

Prüfung der Ausgabedaten	Validierung der FE-Simulation
Allgemeine Plausibilität der Ergebnisse überprüfen	Wenn möglich, die FE-Ergebnisse mit Versuchen/Experimente vergleichen
Masse überprüfen	Wenn möglich, die FE-Ergebnisse mit früheren Berechnungen vergleichen
Gleichgewicht überprüfen	Sensitivitätsanalyse durchführen
Mit einfachen Handabschätzungen kontrollieren	Fehler der FE-Ergebnisse abschätzen
Art und Grösse der Deformationen kontrollieren bzw. beurteilen	- Analyse mit veränderten Eingabedaten (Belastung, Randbedingungen usw.) - Analyse mit veränderten Elementtypen, Elementzahl
Spannungskonzentrationen kontrollieren	Resultate im Team diskutieren oder durch einen Spezialisten beurteilen lassen
Daten sichern	
Die Ergebnisse mit Erfahrungen beurteilen	

8
Qualitätssicherung bei der Modellgenerierung

- Berechnungsparameter (Zeitschritte, Lastschritte) wählen
- Rechnerische Verfahren festlegen, z.B. bei Stabilitätsanalyse: Inverse Power, Subspace Iteration usw.; bei nichtlinearer Analyse: Newton-Raphson, MNR usw.
- Verfahrenskontrolle festlegen (Force Control, Deformation Control, Arclength Control)
- Konvergenzkriterien festlegen (Energie, Determinante usw.)
- Abbruchkriterien festlegen
- Deformationen und Spannungen beobachten
- Steifigkeitsmatrix beobachten
- Beobachtungen und Änderungen in den Berechnungsparametern dokumentieren

Qualitätssicherung nach der FE-Berechnung

Sofern das physikalische/rechnerische Modell keine gravierenden Fehler aufweist, wird die FE-Berechnung zu einem Ergebnis führen. Dieses Rechenergebnis kann z.B. aufgrund unentdeckter Modellierungsfehler verfälscht sein, so dass generell eine Kontrolle des Rechenergebnisses empfehlenswert ist. Diese Kontrolle sollte wenn möglich neben der Überprüfung der rechnerischen Modellierung anhand der Ausgabedaten auch einen Vergleich der vorliegenden FE-Ergebnisse mit Messungen und/oder anderen Berechnungen umfassen (Bild 8). Im Anschluss an diese Prüfung der FE-Ergebnisse folgt in der Regel eine Aktualisierung des FE-Modells mit erneuter Berechnung:

- Erfüllt die Analyse die Erwartungen, z.B. Beullast, Spannungsfeld
- Aktualisieren des physikalischen Modells (Geometrie, Material, Last, Randbedingungen)
- Überprüfen des Analysetyps, ist z.B. ein lineares Modell ausreichend?
- Aktualisieren des rechnerischen Modells hinsichtlich Elementtypen und -anzahl
- Aktualisieren des Analysetyps und des rechnerischen Verfahrens
- Aktualisieren des rechnerischen Programms
- Dokumentation der Aktualisierung

Dieser iterative Prozess wird bis zum Erreichen vorgegebener Randbedingungen (z.B. Festigkeitskriterium und max. Verformung erfüllt) durchgeführt, wobei jede Änderung und deren Auswirkung auf das FE-Ergebnis in der Dokumentation der Berechnung aufgeführt werden sollte. Die Berichterstattung in der FE-Berechnung soll verständlich, vollständig und optimal sein.

Zusammenfassung

Numerische Simulationen werden im zunehmenden Mass zur Analyse komplexer naturwissenschaftlicher und ingenieurmässiger Untersuchungen verwendet. Der Grund dafür ist neben der Vielseitigkeit dieses Lösungsverfahrens nicht zuletzt der verbesserte Bedienungskomfort der entsprechenden Programmsysteme. Die Komplexität einer numerischen Simulation mit ihren vielen Abstraktionen und daraus resultierenden Einschränkungen der FE-Ergebnisse bleibt bei diesen Programmen den meisten Anwendern verborgen. Die daraus resultierenden möglichen Fehlerquellen stellen ein Risiko dar, das es zu minimieren gilt. Ein möglicher Weg zur Minimierung ist die Einführung einer Qualitätskontrolle. Am Beispiel einer FE-Analyse wurden mögliche Fehlerquellen im Rahmen einer numerischen Untersuchung (FEM) und Mittel zu deren Vermeidung aufgezeigt. Die daraus resultierenden Empfehlungen zur Entwicklung von FE-Modellen sind die folgenden:

- Das Modell nicht als Selbstzweck, sondern als Mittel zur Problemlösung betrachten
- Einen Systemansatz für das Gesamtproblem wählen und die Modellierung als Untersystem betrachten
- ausreichende Systemcharakterisierungen berücksichtigen
- Genügende mathematische Abstraktion und Formulierung verwenden
- passende Analyse und Berechnung durchführen
- passende Experimente durchführen
- Auswertungs- und Gültigkeitsbereich bestimmen
- Genügende Interpretation der Resultate der Modellierung und Korrelation mit dem realen Problem
- Sich immer vergegenwärtigen, dass auch das beste Modell nur eine Approximation der Realität ist und somit immer weiterentwickelt werden kann.

Basierend auf der Summe der anwenderbezogenen Fehlerquellen wurde an der Empa ein Qualitätskontrollblatt für FE-Berechnungen ausgearbeitet. Dieses QS-Kontrollblatt bietet eine wertvolle Grundlage zur Minimierung von Anwenderfehlern bei FE-Analysen.

Adresse der Verfasser:
Mehdi Farshad, Prof. Dr.-Ing., und *Rolf Paradies*, Dr. sc. techn., Abteilung Kunststoffe/Composites, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf