

## Hochschulen

Technische Hochschule Bingen

# Simulationstechniken in der Produktentstehung - eine Übersicht

Von Herbert Baaser

Simulationstechniken sind in vielen Bereichen nicht mehr wegzudenkende Hilfsmittel der Ingenieur Tätigkeit. In der Produktentstehung helfen sie zum Beispiel durch die Einsparung von realen Modellen und Versuchen bei der Kostensenkung der Entwicklungsarbeiten und bei der Fertigung und Montage sorgen sie für hohe Qualität der Produkte und kurze Lieferzeiten

Unser Alltag ist durchdrungen von Smartphones, Tablet-Computer und Rechner-Anwendungen; kaum noch ein Behörden-gang oder ein geschäftlicher Vorgang ohne online-Formular, kaum noch eine Aktivität ohne vorherigen Check auf der Wetter-App, der Bahn-App oder der Stau-App, wie der Tag verlaufen wird, die Börse gerade notiert oder wie Freunde und Bekannte gerade Ihren Urlaub verbringen

Dies ist nur der kleine, wohlwollende Auszug einer Alltäglichkeit im Jahr 2016. Selbst einige Fiktionen aus Orwells „1984“ muten dagegen inzwischen als altbacken an. Unsere Kinder werden als „digital natives“ bezeichnet und können sich ein Leben ohne Internet und digitale Vernetzung nicht vorstellen. Dabei ist diese Zeit noch gar nicht so lange her und die meisten von uns wissen noch, wohin man die Briefmarke auf das Kuvert eines handgeschriebenen Briefs kleben muss.

Im Ingenieurwesen (und inzwischen auch in der Politik) kennen wir spätestens seit der HannoverMesse 2011 den Begriff „Industrie 4.0“, der verdeutlichen soll, dass wir nun seit der industriellen Revolution vor mehr als 150 Jahren auf einer weiteren Entwicklungsstufe angekommen sind: Industrielle Produktionsprozesse sind in sich und untereinander mit Informations- und Kommunikationstechnik („ICT“) vernetzt, siehe auch Wikipedia „Industrie 4.0“.

Diese Beispiele verdeutlichen, wie und wo wir uns als Industrienation inzwischen definieren, dass der „digitale Transformationsprozess“ voll im Gange ist und erst durch die eingangs genannten Alltäglichkeiten allmählich ins gesellschaftliche Bewusstsein rückt.

Hinter dieser Fassade der Anwendungen mit ihren bunten und blinkenden Benutzer-Oberflächen steckt ein Jahrzehnte langer Entwicklungsprozess der Computertechnologie inklusive aller Errungenschaften in der Hardware und Software und der jeweiligen Zulieferindustrie, die weltumfassend agiert und ebenfalls mehrfach verzahnt ist.

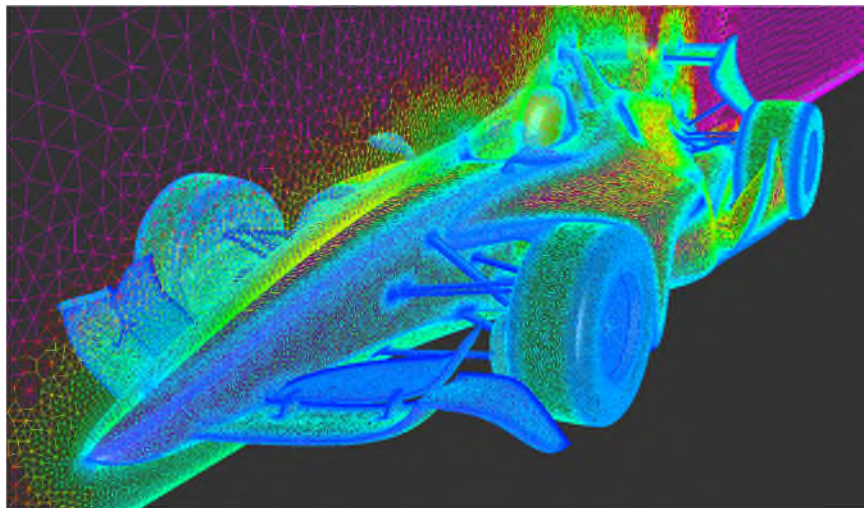
Es wird also deutlich, dass erst die grafischen Oberflächen mit ihren zu-

meist intuitiven Bedienmöglichkeiten die Akzeptanz der Rechneranwendungen in allen Bereichen unseres Lebens für weite Teile fast aller gesellschaftlichen Gruppen möglich gemacht hat. Die technischen Möglichkeiten dazu hat es bereits im Hintergrund gegeben. Zuvor war die Anwendung und Bedienung von Rechner-systemen vergleichsweise wenigen Experten mit entsprechendem Fachwissen vorbehalten. Später kommen wir nochmals auf diesen Aspekt in einem ähnlichen Zusammenhang zurück.

Aber nicht nur die Akzeptanz – inzwischen bis hin zu einer Abhängigkeit (!) – ist dadurch erhöht worden, auch das Bewusstsein für die „vielen kleinen Rechner im Hintergrund“ wächst erst allmählich und ist wohl Ausdruck von dem, was wir „digitalen Transformationsprozess“ nennen und im „Internet der Dinge“ alles miteinander interagiert.

wicklungsprozess. Dieses soll an dieser Stelle – manchem bestimmt etwas zu sehr vereinfachend und verkürzend – als „Simulationstechniken in der Produktentstehung“ eingeordnet werden.

Hier sind wir an einem Stadium angelangt, das wir unter dem Dach „Industrie 4.0“ zusammenfassen und das bestimmt in verschiedenen Bereichen unterschiedlich gedeutet wird und ausgeprägt ist. Man kann zumindest feststellen, dass entlang einer beliebigen Prozesskette von der Entwicklung und Konstruktion eines Bauteils, eines Geräts oder einer Maschine bis hin zu ihrer endgültigen Fertigung („Entstehung“), dem Verkauf gegenüber Kunden und teilweise noch das nachrangige Geschäft (Service, Reparatur, „after market“) aus möglicherweise vielen Einzelkomponenten jeder Schritt digital verarbeitet wird. Dies ist ein weit gefasster Begriff, der wiederum viele Ausprägungsstufen beinhalten kann. Mancher denkt jetzt



**Bild 1 CFD-Computational Fluid Dynamics:** Ergebnis aus der Umströmungssimulation eines Formel-1-Rennwagens. Ohne Versuche im Windkanal können somit in einer frühen Phase der Entwicklung Aussagen zum Luftwiderstandsbeiwert ( $c_w$ -Wert) gemacht werden. Grafik: [www.pointwise.com](http://www.pointwise.com)

## Ingenieure und Entwicklungsprozesse

Im Ingenieurwesen kennen wir bereits seit mehreren Jahrzehnten den Einsatz von Rechnersystemen in unterschiedlichsten Ausprägungsstufen, aber auch in einem stetig fortschreitenden geschichtlichen (Weiter-)Ent-

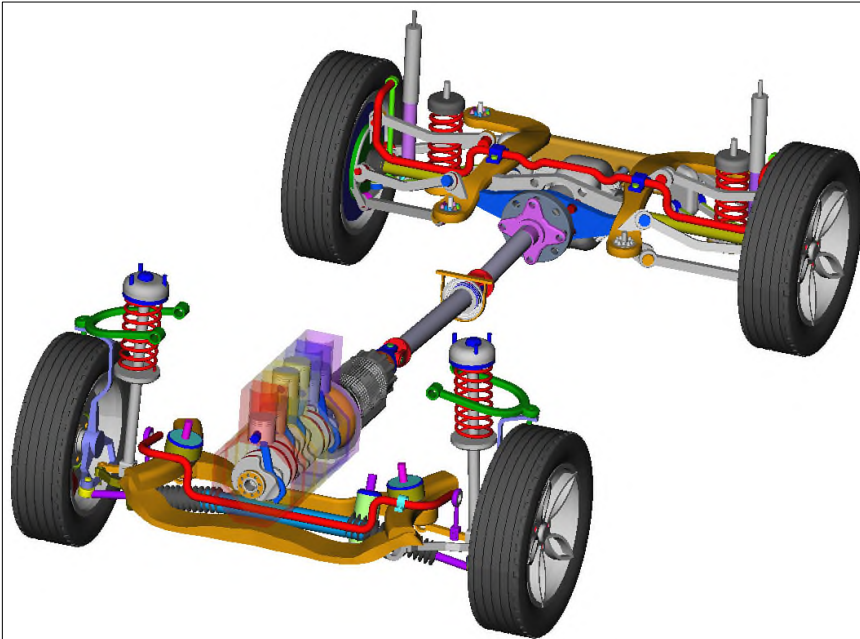
vielleicht an eine reine Datenerfassung von Durchlaufzeiten, andere an das Auslesen von bereits erstellten Bar-Codes an Einzelkomponenten, wieder andere an umfassende Ablaufsimulationen oder Video-Clips von Montagebändern ganzer Automobile. Etwas allgemeiner können wir auch von einer

„begleitenden Simulation“ sprechen, in der – im besten Fall – alle Daten entlang der Prozesskette durchgängig verfügbar sind. Dabei ist mit „Daten“ jegliche Information gemeint: Farbe, Masse, Werkstoff, Herstelldatum, technische Zeichnung, Kunde, Bestell- oder Verfallsdatum, Bestimmungsort und andere.

Wir sprechen nun also vom „Datenmanagement“ mit unterschied-

auch diese Disziplin mehr oder weniger in weitere Teilaspekte unterteilbar. Hier eine Übersicht zu bewahren, ist auch für Experten schwierig.

Wagen wir an dieser Stelle eine Gliederung aus Sicht der „klassischen Anwendung“ von Simulationstools, die – wie oben geschrieben – selbst mehr und mehr verschmelzen, von Ansatz aber unterschiedliche Ziele verfolgen:



**Bild 2 MKS-Mehr-Körper-Simulation eines PKW mit Motor und Antriebsstrang:** Fahrmanöver auf einer Schlechtwegstrecke lassen sich bereits in der Vorentwicklung veranschaulichen. *Grafik: www.klatt-dynamics.de*

lichsten Fragestellungen und ständig wachsender Komplexität: „Welche Software kann welche Daten und in welcher Form lesen?“ – „Wann stehen welche Daten in welcher Form zur Verfügung?“ – „Wer und wie kann man Informationen und Daten zurückverfolgen?“ – „Wie wird es möglich, nachträglich Änderungen in den Daten vorzunehmen, wenn beispielsweise an einer Konstruktion was geändert oder durch einen Kunden schlicht eine andere Farbe des Produkts gewünscht wird?“ – „Wann und wie muss ein Datenstand eingefroren werden?“ Für all diese Punkte muss ein Verständnis aufgebaut werden und dies ist in sich wiederum ein dynamischer Prozess.

## Berechnungs- und Simulationssysteme

Somit können wir erkennen, dass heutzutage die Werkzeuge im Ingenieurwesen mehr und mehr miteinander verschmelzen oder zumindest sehr weitgehend miteinander interagieren. Während „CAD“ („Computer Aided Design“) in Deutschland in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts populär wurde und dieser vielleicht auch heute noch als Inbegriff von „Entwickeln mit Computerhilfe“ selbst landläufig ein Begriff sein mag, ist

Die Methode der Finiten Elemente („FEM“) ist das Berechnungswerkzeug im Ingenieurwesen, und es ermöglicht die Berechnung von Struktureigenschaften von Festkörpern. Damit ist gemeint, dass es mit diesem Simulationstool möglich ist, Steifigkeiten, Verformungen und Spannungen, aber auch Schwingungsanalysen an Bauteilen bis hin zu deren Versagen zu berechnen.

Über vielzählige Variationen in den betrachteten Strukturen sind damit inzwischen sogar automatisierte Optimierungsverfahren zur Bauteilauslegung anwendbar. Man lässt den Rechner also durch bestimmte Algorithmen „spielen“ und versucht damit eine bessere Auslegung zu erreichen.

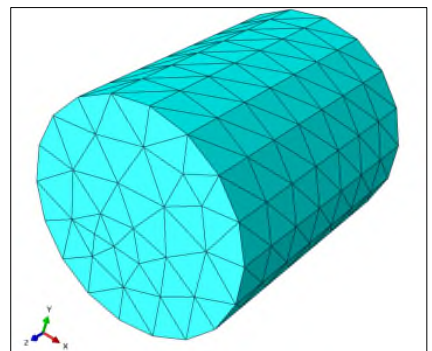
Mithilfe von Strömungssimulationen („CFD“ - „Computational Fluid Dynamics“) beschreibt man dagegen das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen in technischen Anwendungen. Die Berechnung des Umströmungsverhaltens von Automobilen oder Flugzeugen zur Reduzierung ihres Luftwiderstands ist dafür ein schönes und anschauliches Beispiel, siehe Abb. 1. Es werden aber auch beispielsweise Füllprozesse von Kunststoffschmelzen oder die Wirkung von Luftfiltern mit dieser Methode analysiert.

Mit der Mehr-Körper-Simulation („MKS“) ist man in der Lage, ganze Bewegungsabläufe und räumliche Abhängigkeiten von Systemen mehrerer Teilkörper untereinander zu beschreiben. Nimmt man diese Körper zunächst als starr an, kann man schon sehr eindrucksvoll ein Verständnis von zum Beispiel der Kinematik im Federbein eines Fahrzeugs oder in Getrieben gewinnen. Auch ganze Bewegungsabläufe in Werkhallen oder die Warenverteilung in Logistikunternehmen werden damit analysiert..

## Mathematisch-mechanische Grundlagen

Die Beschreibung physikalischer Vorgänge findet durch die Lösung von Differentialgleichungen („DGL“) statt, die das jeweilige Feldproblem in einer oder mehreren Variablen definieren. Genauso wie wir die Bewegung von Körpern im Raum entlang einer Zeitachse beschreiben, lassen sich beispielsweise auch Spannungs-DGL zur Bestimmung der Beanspruchung eines Bauteils angeben. In der Regel sind diese beschreibenden DGL nur noch für Sonderfälle analytisch lösbar, weshalb man – je nach Quelle – spätestens in den 1940er-Jahren darüber nachgedacht hat, hierfür Computer zu verwenden. Sich gegenseitig bis heute beeinflussend hat damit in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts eine rasante Entwicklung der Umsetzung dieser Ideen stattgefunden.

Das grundlegende Vorgehen solcher Umsetzungen besteht in der Unterteilung und Zerlegung von räumlichen Strukturen und der Zeit (mathematisch „Gebiet“, „Feld“) in kleinere Abschnitte, in denen die gesuchten Feldgrößen („mechanisch



**Bild 3 „Diskretisierung:“** Räumliche Zerlegung einer 3D-Struktur (Diskretisierung) in Teilkörper (hier Tetraeder) zur Verwendung im Rahmen der Finite Elemente Methode. *Grafik: Baaser*

Spannung“, „Geschwindigkeit“, „Temperatur“, ...) mit relativ einfachen Funktionen beschrieben und gelöst werden. Diesen Vorgang nennt man „Diskretisierung“, weil damit der Übergang von einem kontinuierlichen Verlauf zu einem diskreten Abbild vorgenommen wird. Ein nahezu triviales



# Hochschulen

Beispiel dazu ist der schon aus der Antike bekannte Versuch, den Kreisumfang durch eine Summe von möglichst vielen linearen Teilabschnitten anzunähern, siehe Wikipedia „Kreis“.

Durch dieses Vorgehen entstehen somit auf dem betrachteten Gebiet oder der Zeitachse sogenannte „Knoten“punkte zwischen den Teilgebieten („Elemente“), auf denen die Feldfunktionen beschrieben und angenähert werden, siehe dazu in Abb. 3 die „Zerlegung“ eines beliebigen zylindrischen Körpers.

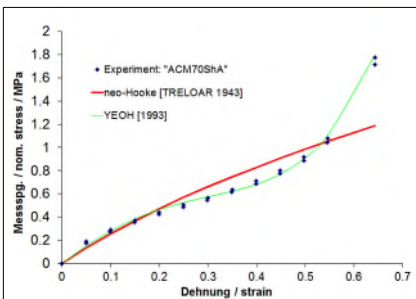
Der „Zusammenbau“ (oder „Assemblierung“) der einzelnen Teillösungen ergibt dann die Gesamtlösung als Näherung für das gestellte Problem

## Anbindung an Realität – Anpassen freier Parameter

Berechtigterweise muss man dieser Stelle auch fragen, inwieweit die vorgestellten Simulationsmethoden in der Lage sind, die Realität, die Physik abzubilden! Es sind Modelle, mehr oder weniger vereinfachend, mit Annahmen, die einerseits die Modellierung erst möglich machen, andererseits aber vielleicht wesentlich Aspekte ausblenden – bewusst oder unbewusst, wissentlich oder unwissentlich für den Anwender.

Dieser Aspekt des „Everything should be made as simple as possible, but not simpler“ (*Alles soll so einfach wie möglich gemacht werden, aber nicht einfacher*. Ein Zitat, das Albert Einstein zugeschrieben wird.) ist und muss auch zukünftig jeweils eine entscheidende Fragestellung bleiben und lässt sich nicht völlig ausblenden; ja, „Fehler“ lassen sich durch immer bessere Modelle reduzieren, vermeiden kann man dieser aber nie.

Je nach Modellansatz und Vorgehen enthalten alle Simulationsmethoden mehr oder weniger freie Parameter aus den gewählten (Teil-) Modellen, die zuvor in einem unabhängigen Prozess an die Wirklichkeit angepasst werden müssen: Siehe dazu exemplarisch die Anpassung zweier



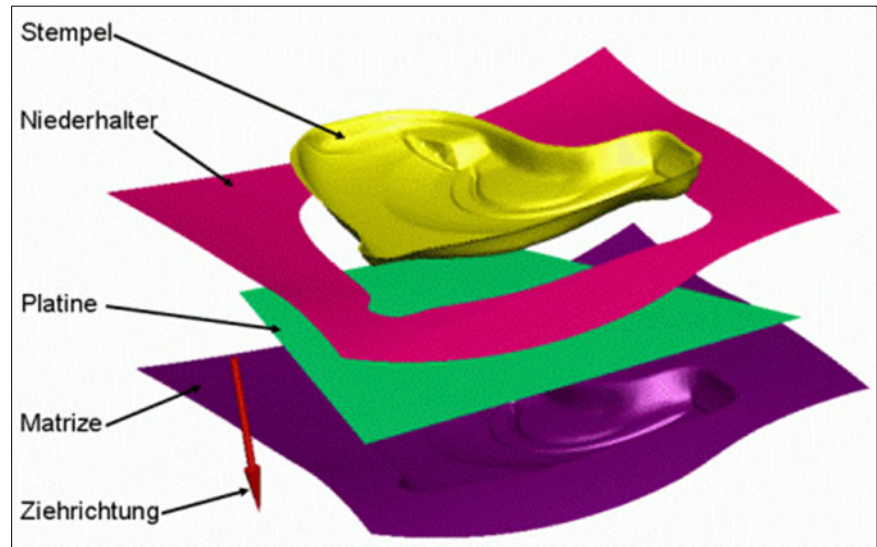
**Bild 4 Werkstoffmodelle sind eine besondere Herausforderung:** Hier die Anpassung für Elastomere an ein Zugexperiment. Grafik: Baaser 2012

Werkstoffmodelle an experimentelle Befunde in Abb. 4. Dies ist eine besondere Herausforderung, eine eigene

Disziplin und Ingenieurkunst, die nicht unterschätzt und insbesondere bei immer ambitionierteren Modellen keineswegs vernachlässigt werden darf. Auf diese Aspekte gehen wir hier nicht weiter ein.

Allerdings lässt sich feststellen, dass durch Anwendung der Simulationstechniken in allen Bereichen nun eine andere Qualität in mindestens zweierlei Gesichtspunkten vorherrscht: Zum einen werden teure und aufwändige Experimente vermieden oder gar Einblicke in technische Systeme geschaffen, die zuvor nicht möglich waren; zum anderen hat sich die Qualität der experimentellen Untersuchungen verändert, weil man zunehmend von Einzeluntersuchungen wegkommt hin zu einem generalisierten Verständnis

(„Preprocessing“), den (mathematischen) Lösungsteil („Solution“ und „Solver“) und schließlich die Nachbereitung („Postprocessing“). Dabei gibt es inzwischen für jede dieser drei Teildisziplinen eine eigene Softwaregattung und entsprechende Spezialisten unter den Berechnungsingenieuren, die auch jeweils ihre Berechtigung durch ihre Expertise in den Details der Anwendungen haben. Durch eine immer ausgefeiltere Benutzerführung der Programme mit entsprechenden grafischen Oberflächen und zusätzlichen Entwicklungswerkzeugen wird das KnowHow im Verständnis und in der Bedienung zunehmend von den mathematisch-mechanischen Grundlagen hin zur „Datenverarbeitung“ und Interaktion der Teilsysteme verschoben.



**Bild 5 Tiefziehsimulation:** Das Bild zeigt die Einzelheiten zur Berechnung der Blechumformung mithilfe der FEM (Finite Elemente Methoden). Damit kann man Aussagen zur Beanspruchung des Bleches beim Tiefziehen treffen. Grafik: www.1.beuth-hochschule.de

der Konstruktionen und der eingesetzten Werkstoffe.

Diese beiden Fakten können als wesentlicher Gewinn der Anwendung von rechnergestützten Methoden angesehen werden, die einem fortwährenden Rechtfertigungsdruck hinsichtlich der entstehenden Kosten ausgesetzt sind.

## Anwendung und Funktionsweise

Neben einer grundlegenden Hochschulausbildung und persönlichen Schulungen zur Anwendung dieser Verfahren gehört dazu auch eine ganze Menge an Erfahrung (oder „Intuition“), um schon in der Modellbildung und der Auswahl des Verfahrens selbst die richtigen Wege einzuschlagen. Wie oben beschrieben, verschwimmen die Grenzen der einzelnen Verfahren zunehmend, weshalb wir an dieser Stelle nochmals das „klassische“ Vorgehen darstellen möchten:

Üblicherweise wendet man hier ein dreistufiges Vorgehen an, das unterteilt wird in das Vorbereiten

Wesentlich muss und wird allerdings gerade in der Vorbereitung und der Nachbereitung der Kontakt zum Kunden und Auftraggeber bleiben. Es müssen vor der jeweiligen Analyse die exakte Fragestellung und die Erwartungen mit den Möglichkeiten abgestimmt werden. Hier ist die Angabe von Randbedingungen in Form von Lasten, Temperaturen, Schwingungen unabdingbar. Ebenso wird die Kommunikation des Bearbeiters mit dem Kunden nach der Analyse immer wichtiger, weil hier die Ergebnisse dargestellt, eingeordnet und interpretiert werden müssen, sonst ist die eigentliche Ingenieurkunst im Lösungsteil in vielerlei Hinsicht nicht darstellbar.

## Lehre an Hochschulen

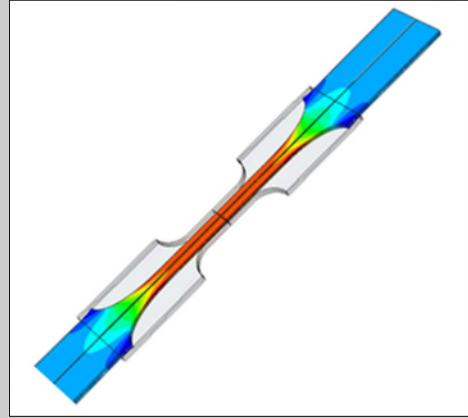
Wie oben ausführlich beschrieben und diskutiert, unterliegen in der heutigen Zeit die Simulationsmethoden durch die ständige Weiterentwicklung von Hard- und Software einem andauernden Veränderungsprozess, der auch in der Hochschulausbildung berücksichtigt werden muss. Während

## Beispiel aus der Werkstoffprüfung



Auch die Lebensdauer-Abschätzung durch Experimente (a) und Untersuchungen am Rechner durch Simulation (b) befruchten sich gegenseitig in aktuellen Fragestellungen. So versucht man heute, die Ergebnisse klassischer Wöhler-Versuche zur Ermittlung der Werkstoff-Ermüdung in die Simulation als zusätzliche Information mit einfließen zu lassen, um schon im Entwicklungsprozess vergleichende Aussagen für Bauteile zu erhalten. *Quelle: Baaser und Mehling (Freudenberg 2013)*

(a) Pulsationsmaschine mit Proben Spannungsermittlungen durch Simulation (b)



die etablierte Grundlagenausbildung in Mathematik und Mechanik beispielsweise in moderner Matrix-Vektor-Notation weiterhin unabdingbar zur späteren Modellerstellung und Interpretation der Ergebnisse ist, stellt schon alleine die Bedienung der immer komplexer werdenden Simulationsprogramme mit ihrer Interaktion untereinander mit jedem Software-Update eine neue Herausforderung dar – insbesondere dies vor einer größeren Gruppe von Studenten zu unterrichten.

Dieses Spannungsfeld in der Ausbildung zwischen Grundlagen und der Anwendung der hochspezialisierten

Software-Systeme, von denen man in der Regel nur die hübsche grafische Oberfläche sieht und zunächst nicht weiß, was sich im Detail dahinter und damit hinter jeder „default“-Einstellung verbirgt, verlangt ebenfalls nach neuen und jeweils angepassten Lehrmethoden. Gewiss ist es für die Beteiligten zuerst unverständlich, weshalb man überhaupt noch ein Mindestmaß an (theoretischen) Grundlagen lernen muss, um später dann „selbstfunktionierende“ Programme zu bedienen – welcher Autofahrer weiß denn heute, wie die Software-Steuerung seines Verbrennungsmotor funktioniert?

## Forschung

Die oben beschriebenen unterschiedlichen Simulationsmethoden sind weitestgehend etabliert und inzwischen durch große Programmsysteme kommerzialisiert. Die universitäre (Grundlagen-)Forschung findet – ohne vermessen sein zu wollen – nur noch für hochspezielle Anwendungsbereiche statt und hat in den letzten beiden Jahrzehnten eine gewisse Sättigung erreicht.

Dennoch gibt es weiterhin offene Fragestellungen und ungelöste Probleme, die es zukünftig zu behandeln gilt. Auch die Verbesserung existierender Algorithmen zur Erhöhung der numerischen Stabilität und der Effizienz – insbesondere mit Hinblick auf moderne Parallelrechner-Architekturen – ist ein weiterhin bestehendes Thema.

Es besteht allerdings weiterhin großer Handlungsbedarf in der Beschreibung moderner Konstruktionswerkstoffe, dem jeweiligen Werkstoffverständnis mit allen zumeist nicht-linearen und zeitabhängigen Aspekten. Gerade am Beispiel „Leichtbau“ mit immer neuen Werkstoffen und -Kombinationen der aktuellen Entwicklungen in Mehrkomponenten-Technologien, hochfester Metall-Legierungen oder der 3D-Drucktechnik lässt sich zeigen, wie viele Fragestellungen für die mechanische Modellierung noch behandelt werden müssen.

Autor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Herbert Baaser lehrt an der Technischen Hochschule Bingen im Fachbereich 2 (Technik, Informatik, Wirtschaft) Technische Mechanik und Finite Elemente Methoden.  
H.Baaser@TH-Bingen.de  
www.th-bingen.de

## 8.2.1 Typen finiter Elemente in der Strukturmechanik

Abhängig von der Fragestellung und den damit gewählten Ansatzfunktionen ergeben sich als (einfachste) Typen finiter Elemente im 2D-Fall Dreieck- oder Viereck-Elemente, siehe Abb. 8.3. Für Aufgaben, die axialsymmetrisch

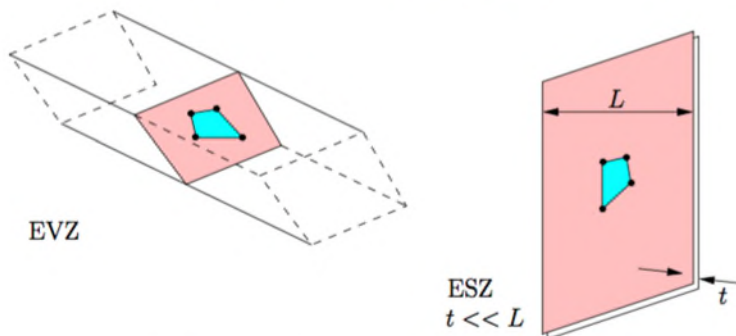


Abbildung 8.3: 2D-Elemente. Idealisiert ebener Verzerrungszustand (EVZ) und ebener Spannungszustand (ESZ)

**Bild 6 Finite Elemente:** Die Zerlegung von Flächen (2D) oder Volumen (3D) erfolgt mithilfe bestimmter Elemente kleiner, aber endlicher Abmessung, um das „Gebiet“ möglichst genau zu beschreiben. Die mechanischen Eigenschaften werden darin jeweils durch mathematische Zusammenhänge formuliert.

Grafik: Auszug Vorlesungskript Baaser, Darmstadt 2016

## Schlussbemerkungen

Bestimmt habe ich hier nicht alle Aspekte genannt und für manchen Leser die genannten Punkte nicht ausreichend beleuchtet. Nehmen Sie's als wohlwollende Anregung zur Diskussion. Schon jetzt bedanke ich mich für Ihre Rückmeldungen dazu an H.Baaser@TH-Bingen.de

Wir machen hiermit auch auf die Neugründung eines Arbeitskreises im VDI Rheingau-Bezirksverein aufmerksam: Am 14.09.2016 wollen wir uns in Mainz zu einem ersten Austausch über „Simulationstechniken“ treffen.

Nähere Auskunft: H.Baaser@TH-Bingen.de

Herbert Baaser