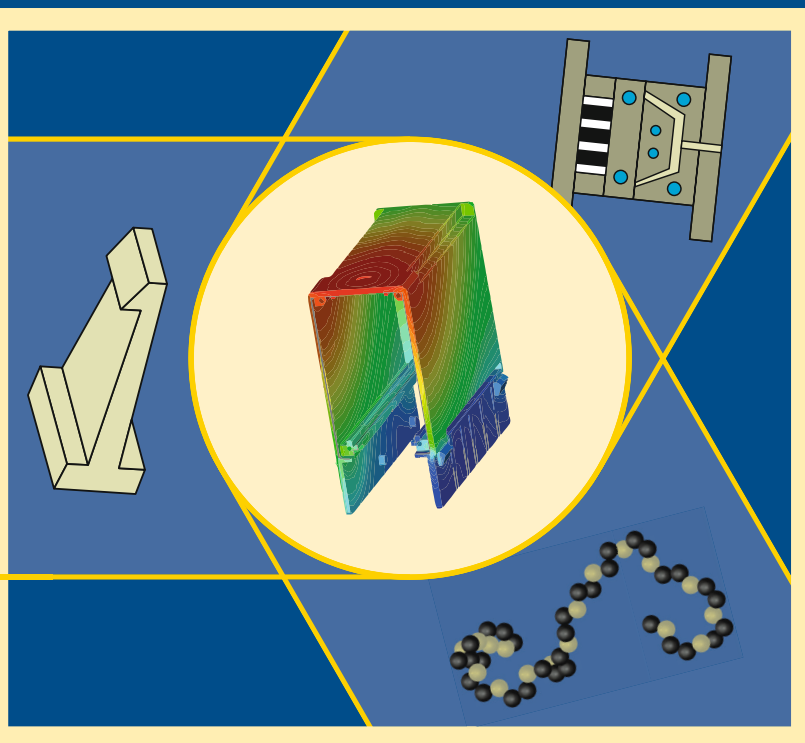


Ruben Schlutter



Einstieg in die Spritzgieß- simulation



HANSER

Schlutter
Einstieg in die Spritzgießsimulation



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-vDCyY-bVknB

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

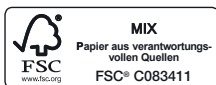
Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Ruben Schlutter

Einstieg in die Spritzgießsimulation

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-47710-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47814-5

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanserfachbuch.de

Lektorat: Mark Smith

Herstellung: Cornelia Speckmaier

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverbild: © Ruben Schlutter; Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	IX
Über den Autor	XI
1 Einführung in die Methode der Finiten Elemente	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Anwendungsfelder der Finiten-Elemente-Methode	2
1.3 Grundlagen der Modellbildung	4
1.3.1 Anforderungen an Modelle	5
1.3.2 Verfahren der Modellbildung	6
1.3.3 Anforderungen an den Modellbildner	8
1.3.4 Modellvalidierung und Modellverifikation	10
1.4 Finite-Elemente-Modellierung	12
1.5 Grundregeln zur korrekten Anwendung der FEM	14
1.5.1 Fehlerquellen	14
1.5.2 Netzaufbau	15
1.5.3 Genauigkeit der Ergebnisse	17
2 Simulation des Füllprozesses	21
2.1 Einleitung	21
2.2 Zeitpunkte für Füllsimulationen	22
2.3 Ablauf einer Füllsimulation	26
2.4 Netzaufbau und Modellerstellung	29
2.4.1 Kunststoffgerechte Auslegung des Formteils	29
2.4.2 Auslegung des Angusses	36
2.4.3 Auslegung des Kühlsystems	41

2.4.4	Grundlagen der Strömungstechnik	47
2.4.5	Netzaufbau	60
2.4.6	Bewertung der Netzqualität	64
2.4.6.1	Netzqualität im Moldex3D	68
2.4.6.2	Netzqualität im Autodesk Moldflow Insight	81
2.4.6.3	Netzqualität im CADMOULD	104
2.4.6.4	Fazit	117
2.5	Abbildung des Spritzgießprozesses	117
2.5.1	Kompaktspritzgießen	118
2.5.2	Mehrkomponentenspritzgießen	128
2.5.3	Sandwichspritzgießen	131
2.5.4	Gasinnendruck-Verfahren	132
2.5.5	Spritzprägen	133
2.5.6	Thermoplast-Schaumspritzgießen	135
2.5.7	Spritzgießen mit Elastomeren und Duromeren	137
2.5.8	Ansätze zur numerischen Simulation des Aufschmelzverhaltens	139
2.6	Grundlagen der Materialdaten	141
2.6.1	Aufbau der Kunststoffe	142
2.6.2	Rheologisches Verhalten der Kunststoffschmelze	144
2.6.3	Das p-v-T-Diagramm	151
2.6.4	Bestimmung der thermischen Kennwerte	155
2.6.5	Die Wärmekapazität	159
2.6.6	Die Wärmeleitfähigkeit	161
2.6.7	Der Wärmeausdehnungskoeffizient	163
2.6.8	Mechanische Kennwerte	165
2.6.9	Orientierungseffekte	166
2.6.10	Kristallisation von Kunststoffen	172
2.6.11	Werkstoffauswahl für Kunststoffformteile	175
2.7	Qualität der Spritzgießsimulation	176
2.8	Die Ergebnisinterpretation	180
2.8.1	Das Füllbild	181
2.8.2	Die Fließfronttemperatur	192
2.8.3	Die Temperaturverteilung im Formteil	193

2.8.4	Die Druckverteilung im Formteil	195
2.8.5	Die Scherung im Formteil	197
2.8.6	Die Schwindung des Formteils	198
2.8.7	Die Faserorientierung im Formteil	199
2.8.8	Der Verzug des Formteils	199
2.8.9	Die Kühlung des Formteils	201
2.8.10	Auswertung mittels automatisierter Variantenanalyse	203
3	Druckverluste im Spritzgießprozess	211
3.1	Stand der Wissenschaft	211
3.2	Prozessmesstechnik	217
3.2.1	Drucksensoren	218
3.2.2	Temperatursensoren	221
3.2.3	Volumenstromsensoren	223
3.2.4	Aufbau eines messtechnischen Umfelds	225
3.3	Durchführung der Spritzgießversuche	227
3.3.1	Verwendete Werkstoffe	227
3.3.2	Vorbereitung der Spritzgießversuche	228
3.3.3	Auswertung der Spritzgießversuche	230
3.4	Durchführung der Spritzgießsimulationen	233
3.4.1	Aufbau des Simulationsmodells	233
3.4.2	Auswertung der Spritzgießsimulationen	237
3.5	Unterschiede zwischen dem realen Spritzgießprozess und der Spritzgießsimulation	242
	Literatur	249
	Index	257

Vorwort

Durch die kürzer werdenden Entwicklungszeiten von Kunststoffformteilen und das immer weitere Ausreizen der Grenzen bei der Fertigung entsprechender Formteile nimmt der Anteil der Simulationen während der Formteil- und Werkzeugentwicklung zu. Die Formteile und Fertigungsprozesse werden von vornherein weiter optimiert, sodass weniger Iterationsschleifen in der Fertigung durchgeführt werden müssen, bevor verkaufsfähige Formteile produziert werden können.

Das vorliegende Buch bietet einen Leitfaden und begleitet Produktentwickler und Werkzeugkonstrukteure. Dafür gibt es einen Einblick in die Hintergründe der Spritzgießsimulation im Allgemeinen. Die simulationsseitigen Hintergründe und Einschränkungen werden weitestgehend softwareunabhängig vorgestellt. In Anschluss werden unterschiedliche Programme anhand verschiedener Formteile vorgestellt und miteinander verglichen, um die Möglichkeiten der jeweiligen Programme vorzustellen und um auf Problemstellungen hinzuweisen, die während der Durchführung einer Spritzgießsimulation und der für den Anwender extrem wichtigen Interpretation der Ergebnisse auftreten können.

Der im Buch beschriebene Deckel kann auf der Webseite des Hanser-Verlags (Hanser-PLUS) als STL- und STP-Datei heruntergeladen werden. Zusätzlich werden Anleitungen für die Programme Autodesk Moldflow Insight, Moldex3D und CADMOULD angeboten, um einen ersten Einstieg in die jeweiligen Programme zu bieten und erste Simulationen eigenständig durchführen und interpretieren zu können. Für den Link zum Download-Portal sowie den Zugangs-Code siehe auf Seite I.

Ich möchte mich herzlich bei allen Personen bedanken, die an der Entstehung dieses Buches mitgewirkt haben, im Speziellen beim Carl Hanser Verlag für die Übernahme der Verlegung des Buches, bei der Firma SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH für die anregenden Gespräche und die Testlizenz der Software, bei der SIMCON kunststofftechnische Software GmbH ebenfalls für die anregenden Gespräche und die Testlizenz der Software und beim das Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft für die Bereitstellung der CAD-Daten des Relaisgehäuses.

Über den Autor



Dr. Ruben Schlutter ist als selbstständiger Dozent in der Aus- und Weiterbildung im Bereich der Kunststofftechnik und Simulation tätig. Er lehrt vorrangig die Fächer Spitzgießsimulation, strukturmechanische Simulation und Konstruieren mit Kunststoffen Formteilauslegung. Nach seinem Maschinenbaustudium mit dem Schwerpunkt Produktentwicklung und Konstruktion an der Hochschule Schmalkalden promovierte er in einer kooperativen Promotion zwischen der Technischen Universität Chemnitz und der Hochschule Schmalkalden bei Prof. Dr. Michael Gehde und Prof. Dr. Thomas Seul im Themengebiet der Druckverlustanalyse in der Spritzgießsimulation. Nach der

Promotion wechselte er an das Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft in Lüdenscheid. Dort hat er verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte, wie die Internationalisierung des bestehenden Netzwerkes oder Spitzgießen im Umfeld der Industrie 4.0 (MONSOON) betreut. Im Jahr 2018 wechselte er in die gemeinnützige Forschungs-GmbH und betreute Projekte über die Herstellung und Verwendung biozider Nanopartikel und die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur qualitativen Beurteilung der Schaumstruktur von Kunststoffformteilen. Parallel engagierte sich Dr. Schlutter in den Weiterbildungsangeboten des Kunststoff-Instituts für die mittelständische Wirtschaft in den Schwerpunkten Form- und Lagetoleranzen, kunststoffgerechte Formteilauslegung und Kunststofftolerierung nach ISO 20457. Seit 2022 ist er selbstständiger Dozent und Mitglied des Verbands deutscher Werkzeug- und Formenbauer (VDWF).

1

Einführung in die Methode der Finiten Elemente

■ 1.1 Einleitung

Die verschiedenen Anwendungsgebiete wachsen durch den breiten Einsatz von CAx-Systemen mehr und mehr zusammen. So werden die Formgebung (Industriedesign) und das eigentliche Produkt zunehmend parallel entwickelt. Das spätere Nutzungsverhalten, die Wartungsfähigkeit und die Recyclingfähigkeit des Produktes stehen im Blickfeld der heute zunehmenden Diskussion um die Nachhaltigkeit von Produkten und werden zunehmend in Simulationen abgebildet. In der Mechatronik werden mechanische Elemente mit elektrischen, elektronischen und informationstechnischen Effekten und Objekten verbunden. Die Vielfalt und Anzahl mechatronischer Produkte nimmt stark zu, wie der Zuwachs an Produkten der Unterhaltungs- und der Kommunikationsindustrie eindrucksvoll zeigt.

Das Ziel bei der Verwendung der CAx-Technologien ist dabei immer, relevante Entscheidungen während der Entstehung eines Produktes zu einem möglichst späten Zeitpunkt und unter Berücksichtigung möglichst vieler Einflussfaktoren zu treffen. Erkenntnisse aus anderen Bereichen als der Produktentwicklung fließen dabei in den Entscheidungsprozess mit ein. Verschiedene Alternativen werden möglichst realitätsnah simuliert und bewertet (vgl. Bild 1.1). Durch den Einsatz von CAx-Technologien können wesentlich mehr potenzielle Fehlentwicklungen während der Produktentstehung früher erkannt werden. Die Behebung der Fehler ist mit geringerem Aufwand möglich als ohne den Einsatz von CAx-Technologien. Bild 1.1 verdeutlicht diesen Effekt [VWZ+18].

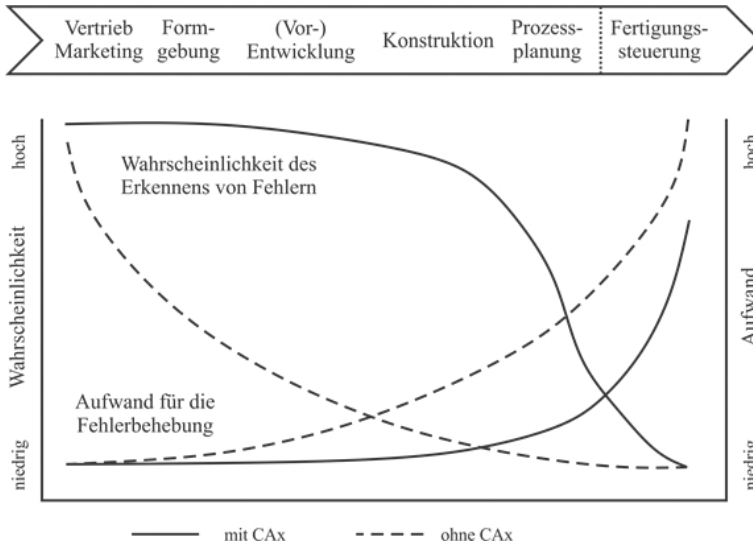


Bild 1.1 Fehlererkennung und Fehlerbehebung (eigene Abbildung in Anlehnung an [VWZ+18])

■ 1.2 Anwendungsfelder der Finiten-Elemente-Methode

Grundsätzlich kann jede physikalische oder chemische Problemstellung durch eine Finite-Elemente-Methode betrachtet und gelöst werden, welche sich durch zeit- und ortsabhängige Differenzialgleichungen oder ein äquivalentes Variationsprinzip beschreiben lässt. Nachfolgend werden verschiedene bekannte Anwendungen zusammengestellt. Der Schwerpunkt der meisten Simulationen mittels FEM liegt dabei auf Festigkeitsproblemen, Potenzialanalysen und Multiphysikproblemen [Kle07]:

- lineare Elastostatik: Hooke'sches Materialverhalten ($\sigma = E \cdot \epsilon$)
- nichtlineare Elastostatik: nichtlineares Materialverhalten (Plastizität)
geometrisch nichtlineare Probleme (Instabilitätsprobleme, große Verschiebungen bei kleinen Dehnungen)
impulsartige große Verformungen (Crash)
Umformprozesse
- lineare Elastodynamik: Eigenschwingungen
freie und erzwungene Schwingungen
zufallserregte Schwingungen

- nichtlineare Elastodynamik: zeit- und verschiebungsabhängige Kräfte
Stabilität, Kreiselbewegung
- Starrkörperdynamik: Mehrkörpersysteme (MKS)
elastische Mehrkörpersysteme (EMKS)
- Elastohydrodynamik: Schmierfilm
- Ermüdungsfestigkeit: Schädigung, Lebensdauer, Rissbruch
- Aeroelastizität: elastisches Strukturverhalten unter Anströmung
- Wärmeübertragung: stationäre und instationäre Wärmeleitung
- Thermoelastizität: mechanische Beanspruchung unter hohen Temperaturen
- Flüssigkeitsströmungen: Sickerströmung, Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturfelder
- Elektrotechnik: elektrisches Strömungsfeld, Magnet- und Wellenfelder
- Akustik: Schalldruckverteilung, Druckstöße
- Gießtechnologie: Spritz- und Druckgießen, Schwerkraftgießen
- Multiphysik: gekoppelte Strömung, Temperatur mit Elastik

Im Bereich der Elastostatik und der Elastodynamik werden entweder die Differentialgleichung des Gleichgewichts oder ersatzweise die Gleichheit der inneren und äußeren virtuellen Arbeit als Berechnungsgrundlage der Simulation gelöst und berechnet. Die analytische Lösung beider Gleichungen ist bei hinreichend komplexer Geometrie nicht mehr möglich. Die näherungsweise Lösung der Differentialgleichungen durch geeignete Ansätze ist jedoch möglich. Allerdings sind die Ergebnisse nicht mehr exakt. Sie stellen Näherungen an das exakte Ergebnis dar.

Die Verschiebungsgrößen-Methode wird in der Regel verwendet, wenn elastostatische und elastodynamische Probleme betrachtet werden. Die wirkenden Kräfte auf eine Struktur sind dabei bekannt. Unbekannt sind die daraus resultierenden Verschiebungen und Verformungen der Struktur. Das Verschiebungsverhalten der Elemente wird vorgegeben und das entstehende Gleichungssystem wird numerisch gelöst.

Möglich, aber unüblich ist ebenfalls die Anwendung der Kraftgrößen-Methode. Hier sind die Kräfte, die auf eine Struktur wirken, unbekannt. Häufig ist es einfacher, die wirkenden Kräfte zu ermitteln und zu beschreiben als die Verschiebungen, sodass sich die Verschiebungsgrößen-Methode weitestgehend in der Praxis durchgesetzt hat.

Die Finite-Elemente-Methode wird immer weiter entwickelt. Parallel steigt die Leistungsfähigkeit der Computersysteme, wodurch komplexere Systemmodellierungen, die Feldprobleme oder multiphysikalische Probleme behandeln, einen immer

größeren Stellenwert einnehmen und zunehmend breitere Anwendungsfelder erschlossen werden. So werden dynamische und elastodynamische Systeme zunehmend durch Mehrkörpersysteme und elastische Mehrkörpersysteme abgebildet. Feldprobleme stellen vor allem Probleme der Wärmeleitung, der Potenzialströmung und des Magnetismus dar. Diese lassen sich durch einen identischen Typ von Differenzialgleichungen beschreiben. Wärmeleitungsprobleme werden durch die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung abgebildet. Bei Potenzialströmungen erfolgt die Verwendung der Poisson'schen Gleichung für Potenzialströmungen. Die Simulation magnetischer Kraftwirkungen ist mithilfe der Maxwell'schen Gleichung möglich. CFD-Programme (Computational Fluid Dynamics) können Strömungsprobleme in der Luft oder im Wasser oder in zähflüssigen Medien, wie Kunststoffen, abbilden [Kle07].

■ 1.3 Grundlagen der Modellbildung

Ein wesentliches Prinzip des Systemdenkens besteht darin, Systeme und komplexe Zusammenhänge durch modellhafte Abbildungen zu veranschaulichen. Modelle sind Vereinfachungen und Abstraktionen der Realität. Sie zeigen deshalb auch nur notwendige Teilaspekte auf. Daher ist es wichtig, dass die Modelle genügend aussagefähig sind, was die Situation und die Problemstellung betrifft. Bei allen Überlegungen muss die Frage nach der Zweckmäßigkeit und der Problemrelevanz gestellt werden [DH02].

Die Modellbildung wird gezielt zur Lösung von Problemen genutzt. Dabei wird der Problemlösungsprozess von der Ausgangsebene (z. B. der Realitätsebene) auf eine abstrakte Ebene verlagert, sodass die Lösungsfindung in der Regel leichter ist. Auf der abstrakten Modellenebene werden Lösungen mithilfe abstrahierter Modelle gesucht und erarbeitet. Dabei ist das Ziel, dass die Lösung bzw. Interpretation des Modells eine möglichst hohe Relevanz (Validität, Gültigkeit) für die Lösung des ursprünglichen (originalen, z. B. realen) Problems hat. Die Modellbildung stellt also eine wichtige Problemlösungstechnik im Sinne einer zielgerichteten Vereinfachung dar, indem ein (nicht notwendigerweise reales) Original durch Abstraktion auf das Notwendige reduziert wird (vgl. Bild 1.2) [VWZ+18].

Im technischen und naturwissenschaftlichen Umfeld ist ein Realitätsbegriff notwendig, der die Möglichkeit zulässt, dass technische Gebilde real existieren und mindestens ein Teil der Wahrheit über deren Realität durch Messergebnisse repräsentiert werden kann. Ansonsten sind die Beobachtung von Regelmäßigkeiten und die Erstellung von Prognosen an diesen Gebilden nicht möglich. Die Wissenschaft übersetzt die durch Wahrnehmungen, Hypothesen und Modellierung beobachtete

Wirklichkeit in Symbole einer Theoriesprache, wie beispielsweise eine mathematische Formalisierung.

Im Zusammenhang mit Theorien aus den Hypothesen und Modellen entstehen wissenschaftliche Daten über diese Wirklichkeit. Die Daten erlangen ihre Bedeutung bzw. Interpretation jedoch erst in Verbindung mit den jeweiligen Hypothesen und Modellen [DH02].

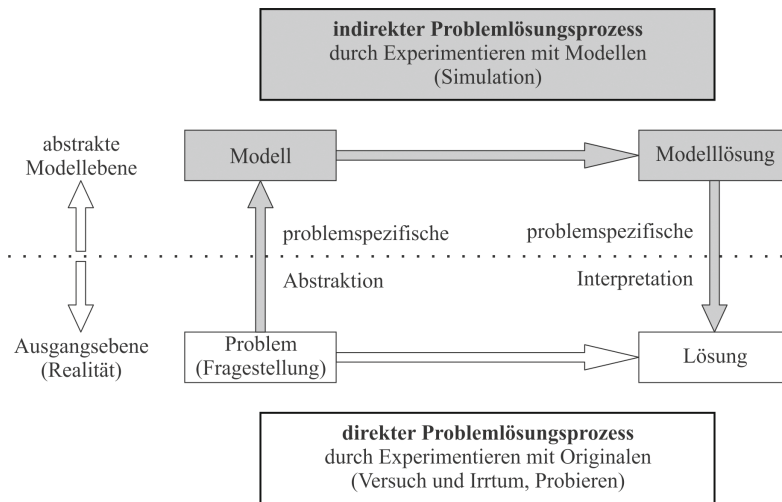


Bild 1.2 Direkte und indirekte Problemlösung durch problemspezifische Abstraktion (eigene Abbildung in Anlehnung an [VWZ+18])

1.3.1 Anforderungen an Modelle

Modelle müssen nah am Ausgangsobjekt oder der Ausgangssituation sein. Sie müssen die charakteristischen Eigenschaften enthalten, die den Untersuchungszweck beschreiben. Dabei sind vorgegebene Fehler in der Regel tolerierbar oder werden bewusst in Kauf genommen. In der Produktentwicklung ist der Modellzweck stark abhängig von der jeweiligen Lebensphase des Produkts, auf die sich die Untersuchung bezieht. Ein angemessenes Aufwand-/Nutzen-Verhältnis ist anzustreben. Der Detaillierungsgrad des Modells ist dabei eng verbunden mit dem Aufwand für die Modellierung und die nachfolgende Analyse. In vielen Fällen ist nicht nötig, eine sehr „genaue“ Modellierung, da die Unsicherheiten des detaillierten Modells so groß sein können, dass dessen Nutzen im Vergleich zu einem einfacheren Modell infrage gestellt werden muss. Ein Modell muss klar definiert, eindeutig beschreibbar, in sich widerspruchsfrei, redundanzfrei und handhabbar sein, um es für die Lösung einer bestimmten Aufgabe leicht einsetzen zu können [Rod06].

In einem gegebenen Gültigkeitsbereich muss das Verhalten eines Modells dem realen Systemverhalten entsprechen (Modellgültigkeit). Dieses Verhalten ist das Resultat aus den charakteristischen Eigenschaften der Modellelemente sowie deren Verknüpfungen untereinander. Wenn verschiedene Möglichkeiten zur Modellierung eines Systems existieren, die den oben genannten Forderungen genügen, so sollte der einfachsten Möglichkeit der Vorzug gegeben werden (Modelleffizienz). Für die Erstellung eines einfachen, effizienten und gültigen Modells gibt es keine allgemeingültigen Regeln. Die Erfahrung und das Vorwissen des Modellbildners spielen daher eine große Rolle [VWZ+18].

1.3.2 Verfahren der Modellbildung

In der praktischen Anwendung von Modellen haben sich verschiedene Methoden der Modellbildung etabliert und durchgesetzt [Ise99, Rod06, HGP07].

Rechnerische Verfahren

Für rechnerische Verfahren werden mathematische Modelle benötigt, die durch algebraische Gleichungen, Differenzialgleichungen oder Ähnliches beschrieben werden. Für die Lösung der mathematischen Modelle stehen heute neben den traditionellen analytischen Verfahren leistungsfähige numerische und symbolische Softwareprogramme zur Verfügung. Der Vorteil der rechnerischen Verfahren besteht darin, dass weder reale Strukturen noch physikalische Modelle notwendig sind. Modellvarianten, beispielsweise durch konstruktive Veränderungen, können mit geringem Aufwand untersucht werden. Die Durchführung von Parameterstudien und Optimierungen ist vergleichsweise einfach. Die Idealisierungen und Vereinfachungen, die für die Modellbildung notwendig sind, wirken sich stark auf die Qualität der Ergebnisse aus.

Die rechnerischen Verfahren sind heute sehr weit entwickelt. Dennoch kann zur Absicherung der Gültigkeit der mathematischen Modelle nicht vollständig auf physikalische Experimente verzichtet werden. Die Optimierung von Produkten, Parameterstudien und das Aufstellen allgemeiner Zusammenhänge (Näherungslösungen) sind typische Anwendungsgebiete. Zur Anwendung werden CAX-Systeme wie FEM-Systeme, MKS-Simulationswerkzeuge, CAD-Systeme oder Computeralgebra-Werkzeuge verwendet.

Experimentelle bzw. messtechnische Verfahren

Experimentelle oder messtechnische Verfahren benötigen physikalische, gestalt-hafte Modelle für Experimente. An diesen können Versuche, Messungen und Auswertungen durchgeführt werden. Typischerweise sind dies Prototypen, Testobjekte, Versuchsanordnungen oder maßstäbliche Modelle, die häufig im Maschinenbau

verwendet werden. Durch den Einsatz physikalischer Modelle ist die messtechnische Erfassung aller wesentlichen Einflüsse möglich.

Messungen werden an der realen Struktur durchgeführt. Die aufgenommenen Signale werden nur durch eventuelle Messfehler beeinflusst. Es können nur direkt messbare Größen erfasst werden. Innere bzw. der Messtechnik unzugängliche Zustandsgrößen können bei Anwendung ausschließlich dieser Methode nicht erfasst werden. Sie bleiben verborgen, wodurch das Problem entsteht, dass das Gesamtsystem nur teilweise erfasst und beschrieben werden kann. Zum Erfassen von Zusammenhängen werden Parameterstudien durchgeführt. Diese erfordern einen großen Aufwand. Experimentelle oder messtechnische Verfahren werden vor allem bei Motorprüfständen, der Analyse von Prototypen, der Schwingungsüberwachung, der Schadensfrüherkennung und der Diagnose und der Verifikation rechnerischer Ergebnisse (Stichproben) angewendet.

Hybride Verfahren (Kombination von Berechnung und Experiment bzw. Messung)

Diese Verfahren nutzen sowohl mathematische Modelle als auch Messgrößen. Bei rechnerischen Verfahren treten Fehler vor allem aufgrund von Modellierungsungenauigkeiten auf. Bei experimentellen Verfahren können mehr oder weniger große Messfehler nicht vermieden werden. Wenn Ergebnisse aus den mathematischen Verfahren und den experimentellen bzw. messtechnischen Verfahren vorliegen, so können Hypothesen über die Art der Fehler aufgestellt werden. Das Modell kann dann so verbessert werden, dass sich eine bessere Übereinstimmung von Rechnung und Experiment ergibt. Die daraus resultierenden hybriden Verfahren werden den Identifikationsverfahren zugeordnet und werden in Parameteridentifikation und Modellidentifikation unterschieden. Bei der Parameteridentifikation werden lediglich die Parameter eines bestehenden mathematischen Modells aus Messdaten rekonstruiert, während bei der Modellidentifikation die Messdaten (auch) zum Aufstellen eines mathematischen Modells selbst – einschließlich seiner Struktur – dienen. Diese Verfahren finden breite Anwendung in der Regelungstechnik und auch in der Qualitätskontrolle [VWZ+18].

Der Ablauf zur Entstehung eines rechnerinternen Modells für die Modellanalyse wird in Bild 1.3 zusammengefasst. Zuerst entwickelt der Modellbildner eine gedankliche Vorstellung des zu untersuchenden Originals. Dabei kann es sich um ein reales technisches Objekt oder ein neues Produkt handeln. Das Ergebnis ist das mentale Modell (Gedankenmodell). Dieses wird durch Informationselemente und -strukturen formalisiert, um es datentechnisch erfassen zu können. Dieses „Informationsmodell“ wird am Rechner implementiert (rechnerinternes Modell, vgl. [PBF+07, DA95]). Eine zentrale Bedeutung kommt dabei dem mentalen Modell zu. Es enthält bereits die notwendigen Abstraktionen und stellt den Ausgangspunkt für eine effiziente Formalisierung dar. Die Formalisierung ist entscheidend

für die erfolgreiche Implementierung des Modells auf einem Rechner. In der Regel werden Modelle in mehreren Iterationsschleifen optimiert. Abhängig von der Modellgenauigkeit können einige Iterationsschleifen notwendig sein. Die Weiterentwicklung von Software, Hardware und Methoden bietet dabei immer mehr Möglichkeiten. So ergeben sich wichtige Rückkopplungen auf den gesamten Modellbildungsprozess, die sogar das Original selbst beeinflussen und verändern können. Dieser Trend wird eindrucksvoll durch die Entwicklungen rund um Cyber-physische Systeme oder Industrie 4.0 bestätigt [VWZ+18].

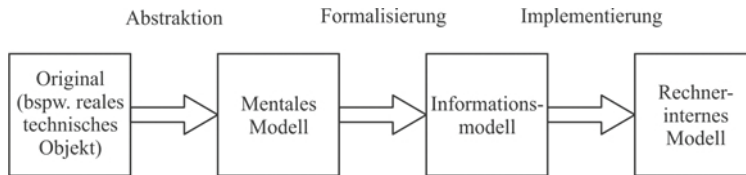


Bild 1.3 Entstehung eines rechnerinternen Modells (eigene Abbildung in Anlehnung an [VWZ+18])

1.3.3 Anforderungen an den Modellbildner

Der Modellbildner ist die Person, die das Modell erstellt. Sie benötigt also Kenntnisse und Erfahrungen sowohl über die zu untersuchende Fragestellung als auch über die Modellbildung/Simulation oder Versuchs- und Messtechnik. Ihre Arbeitsweise sollte systematisch und methodenunterstützt sein, um die Anforderungsspezifikationen erfolgreich durchzuführen. Gute Modellbildung bedeutet immer: „Das Richtige weglassen.“

Der Modellbildner sollte folgende Basisqualifikationen haben:

- Tiefgreifende Kenntnisse über das zu untersuchende System. Der Modellbildner muss entscheiden, was vernachlässigt werden kann und daher in den Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt wird.
- Weiterführende Kenntnisse und die Beherrschung der vorhandenen Werkzeuge und zur Verfügung stehenden Methoden für die Modellierung und Simulation oder die Versuchs- und Messtechnik.
- Erfahrungen bei der Auswahl geeigneter Modelle unter Berücksichtigung der Kosten, der Zeit und der Aussagefähigkeit der Modellergebnisse.
- Kreativität bei der Erstellung, der Abgrenzung und der Definition des Modells.
- Übung in der Interpretation von Ergebnissen: Die Ergebnisse müssen „richtig“ interpretiert werden. Dabei muss unter anderem zwischen physikalischen Effekten und Artefakten (Messfehlern oder numerischen Effekten) unterschieden werden können.

Die Auswahl der Hilfsmittel zur Modellbildung ist abhängig von der Aufgabenstellung, vom Anwendungsbereich und vom Nutzen/Aufwand-Verhältnis. Es stehen viele rechnergestützte Hilfsmittel zur Verfügung. Die Klassifikation von Simulationen ist abhängig vom verwendeten Modell. Dabei kann es sich um physikalische, numerisch-analytische oder grafische Modelle handeln. Eine scharfe Abgrenzung zwischen den verschiedenen Simulationsarten ist in der Praxis kaum möglich. Je nach Zugänglichkeit der Berechnungsaufgabe kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. Verschiedene Methoden ergänzen sich oftmals synergetisch. So können Messungen an realen Objekten zur Identifikation von Modellparametern durchgeführt werden oder numerische Modelle durch bekannte analytische Lösungen überprüft werden. Unter einer Berechnung kann entsprechend dieser Systematik eine Simulation mit analytischen bzw. numerischen Modellen verstanden werden [VWZ+18].

Simulationen werden zur Beantwortung unterschiedlichster Fragestellungen durchgeführt. Die folgende Aufstellung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

- Es ist kein reales System verfügbar (z. B. in der Entwurfsphase).
- Das Experiment am realen System dauert zu lange.
- Das Experiment am realen System ist zu teuer (z. B. bei einem Crashtest).
- Das Experiment am realen System ist zu gefährlich (z. B. bei Flugzeugen, Kraftwerken).
- Die Zeitkonstanten des realen Systems sind zu groß (z. B. Klimamodelle).
- Die Testszenarien („Lastfälle“) können nicht gesteuert werden.

Bild 1.4 zeigt den Zusammenhang zwischen Simulation und Modellbildung. Neben den entsprechenden Modellen werden Lösungsverfahren und Darstellungsmodelle zur Durchführung einer Simulation benötigt. Die gängigen Simulationssysteme bieten erweiterbare Bibliotheken und Schnittstellen zum Import und Export von Daten. Die Eingabe und Erstellung von Modellen erfolgt grafisch und Funktionen können visualisiert werden.

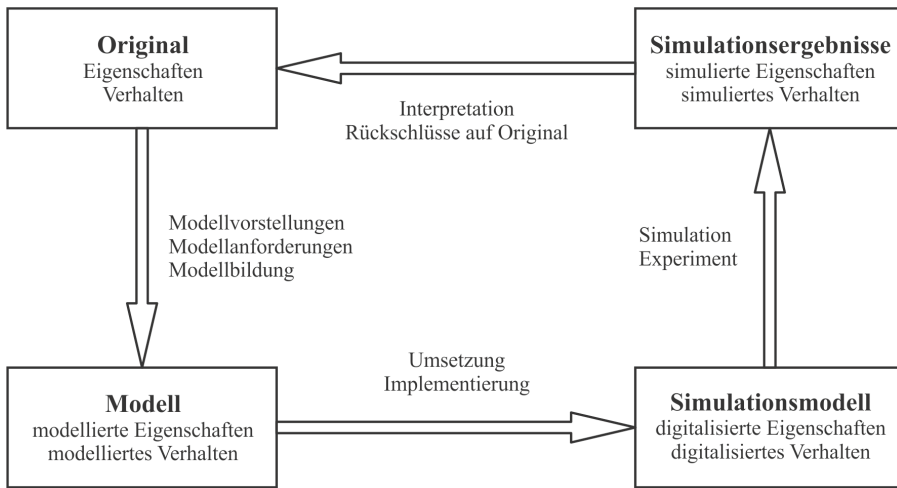


Bild 1.4 Simulationskreislauf mit Modellen (eigene Abbildung in Anlehnung an [VWZ+18])

1.3.4 Modellvalidierung und Modellverifikation

Die Begriffe Verifikation und Validierung können wie folgt beschrieben werden. Sie dürfen nicht verwechselt werden [VDI99, VDI03]. Die Einordnung der Verifikation und Validierung in den Modellierungs- und Simulationsprozess wird in Bild 1.5 gezeigt.

Verifikation

Während der Verifikation wird kontrolliert, ob die spezifizierten Anforderungen durch das Modell erfüllt werden. Auch die Implementierung des Modells in die Simulationssoftware wird überprüft. Mithilfe einfacher Berechnungen wird das Modell verifiziert. Als Basis für die Verifikation dienen eigene oder fremde Erfahrungen. Durch Testrechnungen, wie systematische Experimente oder Konsistenzprüfungen, wird geprüft, ob sich das Modell grundsätzlich plausibel verhält. Es wird auf interne Konsistenz geprüft. Fallen hier Ungereimtheiten auf, so muss untersucht werden, ob das Modell fehlerhaft ist oder ob der Fehler in der Erwartungshaltung über das Verhalten des realen Systems begründet liegt. Die Verifikation erfolgt also nur für das Modellverhalten und ist unabhängig von Vergleichen mit dem originalen System. Häufig erfolgt die Verifikation durch Sensitivitätsanalysen. Dabei werden einzelne Randbedingungen, wie aufgebrachte Lasten, geometrische Parameter oder Werkstoffparameter, geändert und das Verhalten des Modells auf Plausibilität geprüft. Wenn geringe Änderungen der beschriebenen Parameter zu unplausiblen Änderungen der Ergebnisse führen, muss das Modell kritisch hinterfragt werden.

Validierung

Während die Verifikation auf die Güte des Modells bezogen ist, überprüft die Validierung, ob das reale System durch das erstellte Modell zufriedenstellend nachgebildet wird. Auch die Grenzen des Modells, also in welchem Bereich das Modell eine Gültigkeit besitzt, werden bei der Validierung bestimmt. So muss sichergestellt sein, dass das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei durch das Modell abgebildet werden kann. Es wird die Frage beantwortet, ob das Richtige gemacht wurde. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die ersten Simulationsläufe zu richten. Diese dienen der Validierung des Simulationsmodells. Die vollständige Übereinstimmung des Simulationsmodells mit dem abzubildenden realen System ist unmöglich. Das ist aber auch nicht erforderlich. Wie auch die Verifikation kann die Validierung ebenso durch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Das Verhalten des Modells wird bei Änderung der Lastfälle oder einzelner Parameter des Modells untersucht. Im Gegensatz zur Verifikation erfolgt bei der Validierung der Vergleich mit dem Verhalten des realen Systems. Neben der Sensitivitätsanalyse werden Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Dabei werden die Wertebereiche von Eingabe- und Ergebnisdaten und die Konsistenz der physikalischen Einheiten im Hinblick auf die zu untersuchenden realen Systeme untersucht. Der Vergleich mit Messungen am realen Objekt oder an einem Prototyp zählt ebenfalls dazu [VWZ+18].

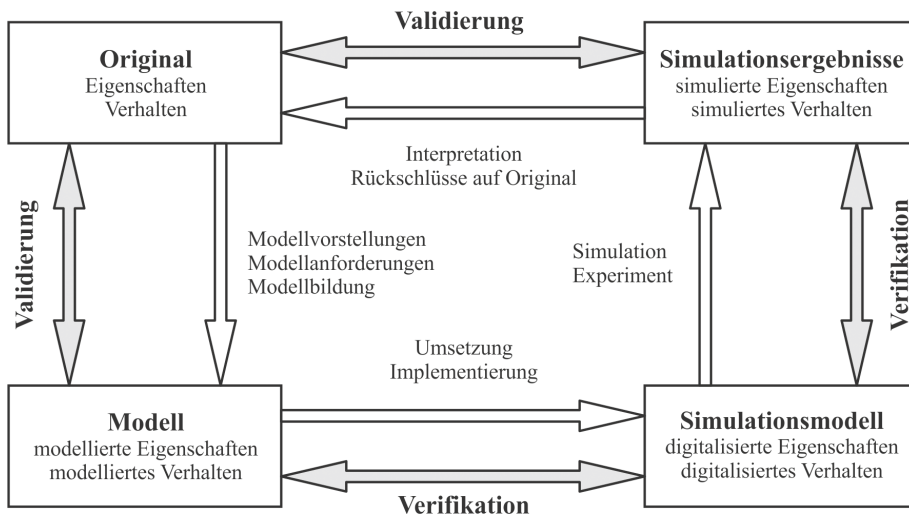


Bild 1.5 Simulationskreislauf mit Modellen (eigene Abbildung in Anlehnung an [VWZ+18])

■ 1.4 Finite-Elemente-Modellierung

Die Methode der finiten Elemente zählt zu den wichtigsten numerischen Rechenverfahren und wird im Ingenieurwesen mit am häufigsten eingesetzt. Erste Verwendungsmöglichkeiten gab es bei physikalisch basierten, mathematischen Modellen im Bereich der Spannungs- und Verformungsprobleme in der Strukturmechanik. Darauf aufbauend wurde die Finite-Elemente-Methode auf das Gebiet der Kontinuumsmechanik erweitert.

Sie ist ein Näherungsverfahren und wird zur Lösung von Problemen des Ingenieurwesens und der Physik verwendet. Zur Näherung werden mathematische Modelle eingesetzt, bei denen feste oder flüssige Körper in Elemente endlicher Größe („finite Elemente“) zerlegt werden. An den Elementgrenzen müssen geeignete Bedingungen für die Übergänge zwischen den einzelnen Elementen definiert werden. Dabei ist es wichtig, dass die Summe aller Elemente in Verbindung mit den Übergangsbedingungen dem Gesamtmodell entspricht. Durch das Zerlegen eines Körpers in finite Elemente ist es möglich, komplexe Geometrien „beliebig genau“ zu approximieren. Das für die Berechnung gewählte Extremalprinzip (z. B. Minimum der potenziellen Energie) gilt dabei sowohl für das globale Modell als auch für die einzelnen finiten Elemente. Zur Lösung des Berechnungsproblems wird zunächst ein adäquates mathematisches Modell ausgewählt. Dieses wird durch algebraische Gleichungen, gewöhnliche oder partielle Differenzialgleichungen oder durch eine Kombination daraus beschrieben. Die Gleichungen können dabei jede Form aufweisen und linear oder nichtlinear sein. Als Problemstellungen kommen sowohl stationäre (zeitlich unveränderliche, insbesondere auch statische) als auch transiente (zeitlich veränderliche, instationäre, dynamische) Vorgänge bzw. Systeme infrage [VWZ+18].

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Rechnersysteme in den letzten Jahrzehnten ist auch die Nutzung der FEM in vielen verschiedenen Ingenieurdisziplinen angestiegen. Anwendungen sind beispielsweise bei der Festigkeitsrechnung, bei der Dimensionierung von Maschinenelementen oder bei der Berechnung von Magnetfeldern zu finden. Die Simulation mittels FEM stellt dabei ein numerisches Experiment dar und bietet einige Vorteile gegenüber physikalischen Experimenten [VWZ+18]:

- Zeit- und Kostenersparnis (Reduzierung des mit dem Prototypenbau verbundenen Aufwands für Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen)
- Berechnungsnachweise werden immer öfter als Qualitätsnachweise gefordert
- Möglichkeit, kostengünstige und schnelle Variantenstudien und Parametervariationen am rechnerinternen Modell durchzuführen

- Analyse von Bereichen, die für Messungen nur schwer oder gar nicht zugänglich sind (z. B. Motorbrennraum, Hochofen, Dampfturbine, Werkstücke bei Gieß-, Umform- oder spanenden Fertigungsverfahren, Strukturelemente bei Crashuntersuchungen)
- Analyse von Systemen, an denen Versuche nicht möglich, zu gefährlich oder zu teuer sind (z. B. Erdbebenbelastung großer Strukturen)
- Ermittlung und Analyse vollständiger zwei- bzw. dreidimensionaler Verteilungen physikalischer Größen (Spannungen, Verschiebungen, Auflagerreaktionen etc.)

Die FEM-Simulation kann jedoch nicht alle Fragestellungen beantworten, sodass Experimente nach wie vor nötig sind. Berechnungsergebnisse müssen an realen Modellen überprüft werden. Die Berechnungsverfahren unterliegen einer fortlaufenden Verbesserung. Gegenwärtig werden FEM-Systeme überwiegend in den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt. Dabei werden unterschiedlichste Fragestellungen analysiert und beantwortet [VWZ+18].

FEM-Systeme werden heute in nahezu allen Branchen intensiv eingesetzt, vor allem in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und dem allgemeinen Maschinenbau (Werkzeugmaschinen-, Stahlbau, Schiffsbau usw.). Außerdem werden FEM-Systeme in der Kunststoff-, der Konsumgüter-, der Elektro- und Elektronikindustrie angewendet.

Trotz der weiten Verbreitung von FEM-Systemen in der praktischen Anwendung ist die korrekte Nutzung dieser Systeme eine qualifizierte Ingenieurarbeit. Sie bedarf üblicherweise eines Spezialisten. Früher wurde deshalb zwischen CAD-Konstrukteuren und FEM-Analysten unterschieden, wobei beide Tätigkeitsfelder heute zunehmend ineinander übergehen. Trotz aller Vereinfachungen werden die FEM-Probleme nicht automatisch durch Rechner gelöst. Tabelle 1.1 fasst eine Tätigkeitsanalyse zusammen, die zeigt, dass der Rechner nur das zentrale Hilfsmittel ist, ohne dessen Leistungsfähigkeit die Methode generell nicht wirtschaftlich nutzbar wäre.

Tabelle 1.1 Tätigkeitsanalyse zur Bearbeitung von FEM-Problemen (Quelle: [Kle07])

Anfallende Bearbeitungsschritte	Geschätzter zeitlicher Arbeitsaufwand	Geschätzte Rechenzeit
methodengerechte Aufbereitung des Problems	10 %	
Generierung eines FE-Modells im Pre-Prozessor	50 %	20 %
Rechenlauf		70 %
Ergebnisauswertung im Post-Prozessor und Dokumentation	30 %	10 %
Plausibilitätsprüfung	10 %	

■ 1.5 Grundregeln zur korrekten Anwendung der FEM

Zum Abschluss der Einführung in die Methode der finiten Elemente werden einige Grundprinzipien der Anwendung diskutiert. Diese sollten bei der Erstellung von Simulationsstudien berücksichtigt werden, da deren Nichtbeachtung entweder zu Fehlern oder unnötigem Nachbesserungsaufwand führt. In der Praxis sind die Anwendungen und damit die auftretenden Probleme naturgemäß sehr vielschichtig, sodass im Folgenden nur die wichtigsten Fehlerquellen betrachtet werden können [Kle07].

1.5.1 Fehlerquellen

Die Methode der finiten Elemente ist ein ingenieurmäßiges Werkzeug und damit fehlerbehaftet. Auch durch den Einfluss des Modellbildners und des Berechnungsingenieurs können sich Fehler in der Simulation einstellen. Neben der Durchführung der Simulation und der Interpretation der Ergebnisse ist es eine der wichtigsten Aufgaben des Modellbildners und des Berechnungsingenieurs, sich dieser Unwägbarkeit bewusst zu sein und eine Sensibilität gegenüber möglichen Fehlerquellen zu entwickeln. Tabelle 1.2 fasst die wichtigsten Fehlerquellen zusammen. Der Berechnungsingenieur ist dafür verantwortlich, dass die notwendigen Schritte mit der erforderlichen Sorgfalt durchgeführt werden [Deg02].

Tabelle 1.2 Fehlerquellen bei einer Analyse mittels der Finite-Elemente-Methode (Quelle: [Kle07, Deg02])

	Anwender	Programm-Handhabung
Pre-Processing	<ul style="list-style-type: none"> ▪ falsche Idealisierung ▪ schlechte Elemente ▪ verletzte Kompatibilität ▪ ungenaue Materialdaten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ schlechte Vernetzung ▪ schlechte Elementformulierung ▪ keine Warnungen (Element-Check)
Lösungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ falsche Randbedingungen ▪ schlechtes Lösungsverfahren ▪ zu grobes Konvergenzkriterium 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zu ungenauer Gleichungslöser ▪ ungenaue Rückrechnung ▪ keine Warnungen
Post-Processing	<ul style="list-style-type: none"> ▪ falsche Selektion 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ falsche Mittelung ▪ falsche Darstellung ▪ keine Warnungen