

Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik

Markus Rabe · Sven Spieckermann · Sigrid Wenzel

Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik

Vorgehensmodelle und Techniken

 Springer

Dr.-Ing. Markus Rabe
Fraunhofer-Institut
für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik (IPK)
Pascalstraße 8–9
10587 Berlin
markus.rabe@ipk.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel
Universität Kassel
FB 15 Maschinenbau
Inst. Produktionstechnik und Logistik
Kurt-Wolters-Str. 3
34125 Kassel
s.wenzel@uni-kassel.de

Dr. Sven Spieckermann
SimPlan AG
Edmund-Seng-Str. 3–5
63477 Maintal
sven.spieckermann@simplan.de

ISBN 978-3-540-35281-5

e-ISBN 978-3-540-35282-2

DOI 10.1007/978-3-540-35282-2

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

© 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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 benutzt werden dürften.

Herstellung: le-tex publishing services oHG, Leipzig
Einbandgestaltung: WMXDesign, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort

Dieses Buch ist das Ergebnis einer mehr als dreijährigen Tätigkeit einer Arbeitsgruppe in der Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Anlass für die Gründung dieser Arbeitsgruppe war die Erkenntnis, dass Verifikation und Validierung (V&V) eine kaum zu unterschätzende Bedeutung für die Simulation in Produktion und Logistik haben. Trotzdem gab es überraschenderweise nur wenige deutsche Veröffentlichungen zu diesem Thema, die darüber hinaus häufig der Öffentlichkeit als interne Forschungsberichte kaum zugänglich waren. Praktische Handlungshilfen, die eine systematische Durchführung der Verifikation und Validierung unterstützen, standen für die Simulation in Produktion und Logistik so gut wie gar nicht zur Verfügung. Im Gegensatz hierzu wird die sehr ähnliche Aufgabe der V&V im Rahmen der Softwareentwicklung durch konkrete Vorgehensmodelle und Verfahren unteretzt und z. T. sogar softwaretechnisch unterstützt.

Die ASIM-Arbeitsgruppe „Validierung“ hat sich daher zum Ziel gesetzt, verfügbare Informationen zu V&V zu analysieren, zu systematisieren und konkrete Handlungshilfen zu entwerfen. Durch die Zusammensetzung der Arbeitsgruppe aus Simulationsanwendern, -dienstleistern und -werkzeuganbietern sowie Mitgliedern von Forschungsinstituten konnten die unterschiedlichen Anforderungen der an Simulationsprojekten Beteiligten berücksichtigt und Vorschläge zur Vorgehensweise jeweils unmittelbar an der Realität gespiegelt und im Einzelfall auch direkt erprobt werden. Darüber hinaus wurde die enge Zusammenarbeit mit der parallel arbeitenden ASIM-Arbeitsgruppe „Qualitätskriterien“ gepflegt, was sowohl zur direkten Nutzung der Ergebnisse untereinander als auch zu einer für beide Seiten äußerst fruchtbaren Diskussion der Arbeitsinhalte zwischen den beiden Arbeitsgruppen geführt hat. Vor diesem Hintergrund ist der zeitgleich im Springer-Verlag erscheinende Band „Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik“ als ideale Ergänzung des hier vorliegenden Buches zu sehen, auch wenn keiner der Bände die Lektüre des jeweils anderen voraussetzt.

Seit ihrer Gründung im Jahr 2003 hat die Arbeitsgruppe „Validierung“ die Erfordernisse und Methoden von V&V für die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen systematisch aufbereitet. Dabei wurden auch

Konzepte aus verwandten Anwendungsbereichen und Fachgebieten untersucht, z. B. aus der Simulation im militärischen Bereich und im Operations Research sowie V&V-Ansätze aus der Informatik. Insbesondere wurden Ansätze des Software Engineering dabei als Ideengeber berücksichtigt. Allerdings werden V&V-Techniken aus der Informatik, auch wenn sie unzweifelhaft Aufgaben der V&V betreffen, in diesem Buch nicht im Detail behandelt, da hierzu bereits umfangreiche und detaillierte Literatur vorliegt, die auf Softwareentwicklungsaufgaben im Umfeld der Simulation unmittelbar angewendet werden kann.

Aufbauend auf den existierenden Vorarbeiten wurde ein neues Vorgehensmodell entwickelt, das in diesem Buch im Detail beschrieben wird. Mit dem Ziel, das Vorgehensmodell möglichst einfach anwendbar zu machen, wurde es mit Handlungshilfen zur Modelldokumentation, strukturierten Fragelisten sowie Hinweisen zu geeigneten Validierungstechniken untersetzt. Für die Forschung sowie für das vertiefende Studium erläutert das Buch zusätzlich die wissenschaftliche Basis des Vorgehensmodells und seiner Elemente.

Ohne den hohen persönlichen Einsatz der Arbeitsgruppenmitglieder wäre diese umfangreiche Arbeit nicht denkbar gewesen. Besonderer Dank gilt Stefan Heinrich (Audi AG) und Simone Collisi-Böhmer (Siemens AG) für die kritische Beleuchtung der Ergebnisse aus Anwendersicht, Axel Lehmann (Universität der Bundeswehr München) für die substantiellen Hinweise zu Vorarbeiten im militärischen Bereich und in der Informatik sowie Tobias Schmuck (Universität Erlangen) für die intensive Mitarbeit insbesondere bei der aufwändigen Ausarbeitung der Handlungshilfen.

Die Herausgeber hoffen, dass dieses Werk den Stellenwert von V&V in der Simulation bewusster macht und zugleich als Rat- und Ideengeber einen Beitrag für die praktische Handhabung des komplexen V&V-Prozesses leistet.

Im Namen der ASIM
Berlin/Maintal/Kassel, Mai 2008

Markus Rabe, Sven Spieckermann und Sigrid Wenzel

Inhalt

Inhalt.....	IX
1 Einführung.....	1
1.1 Ziele der V&V	2
1.2 Spezifische Aspekte von Simulationsmodellen für die V&V	3
1.3 Vorgehen bei der Simulation mit V&V.....	4
1.4 Fokus dieses Buches.....	8
1.5 Aufbau und Zielgruppen dieses Buches	9
2 Definitionen.....	11
2.1 Grundbegriffe der Simulation.....	12
2.2 Grundbegriffe zu VV&T	13
2.2.1 Verifikation.....	14
2.2.2 Validierung	15
2.2.3 Test	16
2.2.4 Akkreditierung.....	17
2.3 V&V-Kriterien für Simulationsmodelle in Produktion und Logistik.....	19
2.4 Rollen im Vorgehensmodell zur Simulation	23

3	Bestehende Vorgehensmodelle	27
3.1	Einordnung von Vorgehensmodellen.....	27
3.2	Simulationsvorgehensmodelle und V&V.....	29
3.3	Modelle zur V&V in der Simulation.....	33
3.4	Modelle zur V&V aus anderen Disziplinen.....	37
3.5	Das V&V-Vorgehensmodell von Brade.....	41
3.6	Ableitungen aus den vorhandenen Modellen.....	43
4	Simulationsvorgehensmodell und Dokumentstrukturen als Arbeitsgrundlage	45
4.1	Simulationsvorgehensmodell.....	45
4.1.1	Einteilung der Modellbildung in Phasen.....	46
4.1.2	Die Behandlung von Daten in einer Simulationsstudie.....	51
4.1.3	Zusammensetzung und Entstehung von Phasenergebnissen.....	53
4.2	Dokumentstrukturen.....	55
4.2.1	Zielbeschreibung.....	58
4.2.2	Aufgabenspezifikation.....	61
4.2.3	Konzeptmodell.....	66
4.2.4	Formales Modell.....	74
4.2.5	Ausführbares Modell.....	78
4.2.6	Simulationsergebnisse.....	81
4.2.7	Rohdaten.....	86
4.2.8	Aufbereitete Daten.....	89

5	Techniken der Verifikation und Validierung	93
5.1	Abgrenzung	94
5.2	Beschreibung der Techniken	95
5.2.1	Animation	95
5.2.2	Begutachtung	97
5.2.3	Dimensionstest	98
5.2.4	Ereignisvaliditätstest.....	98
5.2.5	Festwerttest.....	99
5.2.6	Grenzwerttest.....	100
5.2.7	Monitoring.....	101
5.2.8	Schreibtischtest.....	102
5.2.9	Sensitivitätsanalyse.....	102
5.2.10	Statistische Techniken	103
5.2.11	Strukturiertes Durchgehen	104
5.2.12	Test der internen Validität	105
5.2.13	Test von Teilmodellen	106
5.2.14	Trace-Analyse.....	107
5.2.15	Turing-Test.....	107
5.2.16	Ursache-Wirkungs-Graph.....	108
5.2.17	Validierung im Dialog.....	109
5.2.18	Validierung von Vorhersagen.....	109
5.2.19	Vergleich mit anderen Modellen	110
5.2.20	Vergleich mit aufgezeichneten Daten.....	111
5.3	Verwendbarkeit von Techniken im Verlauf der Simulationsstudie	112
5.4	Verwendung von Techniken für die Teilergebnisse der Phasen.....	113
5.5	Grad der Subjektivität	115

6	Vorgehensmodell für V&V zur Simulation in Produktion und Logistik.....	117
6.1	Struktur des V&V-Vorgehensmodells	118
6.1.1	Systematik des V&V-Vorgehensmodells	118
6.1.2	Typen von V&V-Elementen.....	120
6.1.3	Dokumentation der V&V	123
6.2	Einsatz des Vorgehensmodells in spezifischen Projekten	126
6.2.1	Tailoring nach Komplexität einer Simulationsstudie	127
6.2.2	Tailoring beim Einsatz von bausteinorientierten Simulationswerkzeugen.....	130
6.2.3	Tailoring bei automatisch generierten Modellen.....	131
6.2.4	Tailoring bei betriebsbegleitender Simulation.....	133
6.2.5	Tailoring bei Emulation.....	134
6.3	V&V-Elemente.....	136
6.3.1	Zielbeschreibung	138
6.3.2	Aufgabenspezifikation.....	140
6.3.3	Konzeptmodell	144
6.3.4	Formales Modell.....	151
6.3.5	Ausführbares Modell	157
6.3.6	Simulationsergebnisse	166
6.3.7	Rohdaten.....	173
6.3.8	Aufbereitete Daten.....	180
7	Zusammenfassung.....	193
	Literatur	197
	Anhang A1 Dokumentstrukturen.....	207
	Anhang A2 V&V-Elemente.....	217
A2.1	Zielbeschreibung	218
A2.2	Aufgabenspezifikation.....	219
A2.3	Konzeptmodell	220
A2.4	Formales Modell	223
A2.5	Ausführbares Modell.....	225
A2.6	Simulationsergebnisse	228
A2.7	Rohdaten.....	230
A2.8	Aufbereitete Daten	232
	Anhang A3 Die Autoren und Mitautoren.....	235

1 Einführung

Die Simulation hat sich als wichtige Analysemethode in der Produktion und Logistik etabliert. Sie wird häufig eingesetzt, wenn Entscheidungen mit erheblicher Tragweite getroffen werden müssen, und entweder die Konsequenzen dieser Entscheidung nicht unmittelbar ersichtlich sind oder keine geeigneten analytischen Hilfsmittel zur Verfügung stehen. Dies bedeutet jedoch, dass die Richtigkeit und Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse von erheblicher Bedeutung für das weitere Handeln sind. Fehlerhafte Simulationsergebnisse, als Entscheidungsvorschlag formuliert und umgesetzt, können zu Kosten führen, die mehrere Dimensionen größer sind als die Kosten der Simulationsstudie selbst. Dieses Buch beschränkt sich auf die ereignisdiskrete Simulation („Discrete Event Simulation“; für eine Abgrenzung zu anderen Simulationsmethoden vgl. Robinson 2004, S. 13ff.; Pritsker 1998, S. 37ff.).

Verifikation und Validierung (V&V) sind daher unverzichtbare Bestandteile einer Simulationsstudie. Nur durch konsequente V&V kann die Gefahr von fehlerhaften Aussagen aus Simulationsstudien wirksam vermindert und damit die Gefahr von Fehlentscheidungen begrenzt werden. Charakteristisch ist, dass sich die vollständige Korrektheit eines Simulationsmodells – außer bei trivialen Modellen – nicht nachweisen lässt. Dies entspricht der Erkenntnis der Softwareentwicklung, dass sich die Fehlerhaftigkeit eines Programms durch ein einziges Beispiel beweisen lässt, während die Korrektheit auch durch eine geeignete Zahl systematisch durchgeführter Beispiele nur wahrscheinlich gemacht, nicht aber bewiesen werden kann (Dijkstra 1970, S. 7). Diese Erkenntnis lässt sich auf Simulationsmodelle als Software unmittelbar übertragen.

Zur Korrektheit kommt noch die Frage der Eignung: Auch ein fehlerfreies Modell kann für eine gegebene Fragestellung ungeeignet sein, weil es wesentliche Elemente oder Aspekte vernachlässigt.

Hieraus folgt, dass V&V eine anspruchsvolle und komplexe Aufgabe ist (vgl. Law 2007, S. 243), die nur durch Systematisierung, Zerlegung in handhabbare Einzelaufgaben und Unterstützung mit geeigneten Testverfahren beherrscht werden kann. Eine Prüfung anhand von Endergebnissen ist nur begrenzt möglich. Daher ist ein Vorgehen notwendig, das möglichst jeden einzelnen Modellierungsschritt mit seinem Ergebnis einer geeigneten

V&V unterzieht. Dies betrifft den gesamten Weg von der Zielbeschreibung einer Studie bis zur Ausarbeitung von Entscheidungsvorschlägen auf Basis von Simulationsergebnissen.

1.1 Ziele der V&V

Das übergeordnete Ziel von V&V ist, wirksam zu verhindern, dass aus einer Simulationsstudie fehlerhafte Aussagen gewonnen werden, die zu Fehlentscheidungen führen. Für dieses Ziel muss V&V in den Prozess der Modellbildung eingebunden sein, damit Fehler in Modellen möglichst gar nicht erst entstehen. Genauso muss V&V aber auch bei der Nutzung des Modells und bei der Auswertung der Simulationsergebnisse zur Anwendung kommen. Andernfalls könnten (ursprünglich gültige) Modelle außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches fehlerhafte Aussagen liefern bzw. durch falsche Interpretation von (korrekten) Ergebniswerten fehlerhafte Aussagen abgeleitet werden.

Darüber hinaus sparen rechtzeitig erkannte Mängel innerhalb einer Simulationsstudie direkt Zeit und Geld. Schätzungen besagen, dass Fehler, die in den Anfangsphasen einer Modellierung gefunden werden, nur zehn Prozent von dem kosten, was die Behebung derselben Fehler in späteren Phasen kosten würde (Banks et al. 1988). Ein Ziel der V&V ist daher, Fehler möglichst frühzeitig zu finden. Daraus folgt, dass V&V schon am Beginn einer Simulationsstudie, idealerweise bei der Festlegung der Ziele und Randbedingungen, beginnen muss.

Die erforderlichen Aktivitäten im Rahmen der V&V lassen sich nicht objektiv vorgeben, sondern sind – wie die Modellbildung selbst – immer zumindest teilweise subjektiv (vgl. Balci 1989) und müssen ihrerseits kritisch geprüft und hinterfragt werden (vgl. van Horn 1971, S. 251). Da sich die *vollständige* Korrektheit eines Modells formal nicht nachweisen lässt, muss (subjektiv) entschieden werden, welche Aktivitäten notwendig erscheinen und welche nicht. Die Aussage, ein Modell sei „validiert“, kann daher nur bedeuten, dass Aktivitäten der Validierung durchgeführt wurden, sie gibt aber keinen Hinweis über die objektive Gültigkeit des Modells.

Ziel der V&V ist daher nicht der *formale Nachweis der Validität* eines Modells, sondern die Bestätigung seiner *Glaubwürdigkeit* („Credibility“). Ein Modell ist nach Carson (1989) glaubwürdig, wenn es vom Auftraggeber als hinreichend genau akzeptiert wird, um als Entscheidungshilfe zu dienen. Einige Autoren verwenden allerdings den Begriff Validität im Sinne dieser Glaubwürdigkeit. So definiert Sargent (1996, S. 56): „Whether the model is valid [...] is a subjective decision based on the results of

the various tests and evaluations conducted as part of the model development process“.

Da Glaubwürdigkeit eine Frage der Akzeptanz ist, hängt sie von den „akzeptierenden“ Personen ab. Damit tritt wieder der subjektive Charakter des V&V-Begriffes hervor. Ziel der V&V muss sein, möglichst systematische Grundlagen für diese Akzeptanzentscheidung zu liefern und nachvollziehbar zu dokumentieren. Da die Glaubwürdigkeit für den Auftraggeber entscheidende Bedeutung hat, muss dieser für die V&V Zeit und Ressourcen im Projekt ansetzen und die entsprechenden Leistungen verfolgen (vgl. Balci 1994).

Damit lassen sich die Ziele der V&V wie folgt zusammenfassen:

- V&V soll fundierte und nachvollziehbare Grundlagen für die Entscheidung über die Glaubwürdigkeit des Modells schaffen und so verhindern, dass aus fälschlicherweise für glaubwürdig erklärten Modellen Entscheidungen abgeleitet werden.
- V&V soll Fehler während der Modellbildung frühzeitig erkennen und damit einerseits Zeit und Geld sparen, andererseits aber auch Fehler schon an ihren (oft leichter erkennbaren) Wurzeln sichtbar machen.
- V&V soll sicherstellen, dass einmal gewonnene Erkenntnisse vollständig und korrekt in die weitere Modellbildung einfließen.
- V&V soll die richtige Anwendung glaubwürdiger Modelle gewährleisten und damit fehlerhafte Schlüsse aus richtigen Modellen verhindern.

1.2 Spezifische Aspekte von Simulationsmodellen für die V&V

Grundsätzlich müssen nicht nur Simulationsmodelle, sondern alle Arten von Modellen verifiziert und validiert werden. In diesem Abschnitt werden einige für Simulationsmodelle typische Eigenschaften diskutiert, die Besonderheiten in Bezug auf die Durchführung von V&V mit sich bringen.

Die Tatsache, dass viele Simulationsmodelle realitätsnah visualisiert werden, birgt die Gefahr, dass ihr Modellcharakter für den Betrachter verloren gehen kann, sie als Realität angenommen werden bzw. dass sie von den eigentlichen Modellinhalten ablenken (Wenzel und Jessen 2001; Rabe 2006). Der Modellcharakter eines visuell ansprechend gestalteten Simulationsmodells ist weniger deutlich als beispielsweise bei einem Differentialgleichungssystem, das jeder Betrachter unmittelbar als Modell erkennt und bewertet. V&V muss sich dieser Gefahr bewusst sein und die erforderliche Distanz zum Modell erzeugen.

Während eine Visualisierung von Simulationsmodellen auf der einen Seite die Gefahr birgt, vom Modellcharakter abzulenken, ist sie gleichzeitig ein wichtiges Hilfsmittel der V&V, da auf Basis der ereignisdiskreten Simulation nahezu beliebige Strukturen und Verhaltensweisen nachgebildet werden können (zur Nutzung der Visualisierung während einer Simulationsstudie vgl. Wenzel 1998). Im Gegensatz zu vielen anderen Modellen sind bei Simulationsmodellen Struktur, Annahmen und Grenzen nicht immer explizit erkennbar (van Horn 1971). Daher bedürfen Simulationsmodelle spezieller Mechanismen zur Darstellung des Verhaltens wie z. B. der Animation, statistischer Auswertungen oder Ereignisprotokolle („Traces“). Der Einsatz dieser Mechanismen bedarf besonderer Sorgfalt, damit aus der Darstellung falsche oder unzureichende Modelleigenschaften erkennbar werden.

Als weitere typische Eigenschaft kommt hinzu, dass Simulation oft gerade für Prozesse verwendet wird, bei denen relevante Größen stochastisch um ihre Mittelwerte schwanken (z. B. zur Nachbildung des Verhaltens eines Materialflusssystemes über den Tag mit unterschiedlichen tageszeitabhängigen und stochastisch schwankenden Belastungen). Der Vergleich von Simulationsergebnissen mit statisch kalkulierten Werten ist daher oft nur für vereinfachte Modelle möglich (Page 1991). Um die Eignung eines Simulationsmodells für eine gegebene Fragestellung zu prüfen, müssen dessen Ergebnisse statistisch abgesichert werden. In diesen Zusammenhang gehört auch, dass aus einem einzigen Simulationslauf, der in den Zielkorridor passt, nicht auf die Eignung des modellierten Systems geschlossen werden darf. Diese Gefahr besteht beispielsweise, wenn das Ziel des Simulationsprojektes die richtige Dimensionierung eines Systems ist (vgl. Carson 2002, S. 53). Schon bei kleinsten Änderungen, wie z. B. zeitlich geringfügig anders liegenden Störungen oder marginalen Abweichungen im Produktionsprogramm, könnte das Verhalten desselben Systems weit außerhalb des Zielkorridors liegen.

1.3 Vorgehen bei der Simulation mit V&V

Das Verständnis der Einbindung von V&V in die Simulation bedarf zunächst eines Vorgehensmodells für die Simulation selbst. Die Autoren haben in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (VDI 2008, Bild 7) ein entsprechendes Simulationsvorgehensmodell entworfen (Spieckermann et al. 2004) sowie zur Diskussion gestellt und es anschließend zu dem hier verwendeten Vorgehensmodell (Abbildung 1) weiterentwickelt.

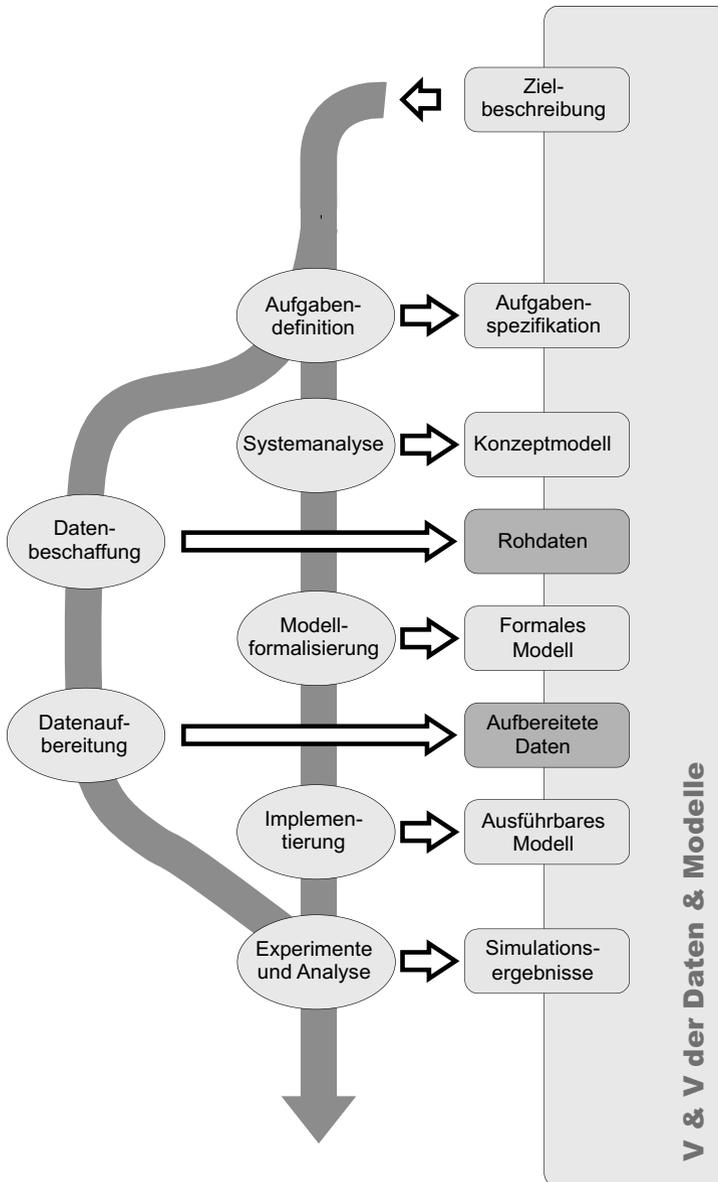


Abb. 1. Vorgehensmodell bei der Simulation mit V&V

Dieses Simulationsvorgehensmodell betrachtet ausgehend von einer gegebenen Zielbeschreibung nur Aufgaben, die typischerweise *nach* der Beauf-

tragung einer Simulationsstudie anfallen, wobei nicht zwischen der Beauftragung eines externen Dienstleisters und einer internen Auftragsvergabe unterschieden wird. Daher beginnt das Vorgehensmodell mit der Aufgabendefinition, die als der erste Analyseschritt innerhalb einer Simulationsstudie verstanden wird.

Das Simulationsvorgehensmodell ist im Vergleich zu anderen Vorgehensmodellen (vgl. die Erläuterungen zu Vorgehensmodellen in Abschnitt 3.2) durch die konsequente Einführung von Phasenergebnissen sowie die gesonderte Behandlung von Modell und Daten gekennzeichnet.

Das Vorgehen bei der Modellbildung wird in die *Phasen* Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung sowie Experimente und Analyse (Ellipsen in Abbildung 1) gegliedert.

Jeder dieser Phasen des Simulationsvorgehensmodells wird ein *Phasenergebnis* zugeordnet (Vierecke in Abbildung 1). Phasenergebnisse können Modelle und Dokumente oder eine Kombination von beiden sein, wobei Modelle zusätzlich auch selbst dokumentiert werden sollten. Gleichwohl wird in diesem Buch teilweise vereinfachend von *Dokument* als Phasenergebnis gesprochen. Das Dokument „Zielbeschreibung“ ist kein Phasenergebnis aus der Simulationsstudie sondern Ausgangsbasis einer Simulationsstudie.

Die Phasen „Datenbeschaffung“ und „Datenaufbereitung“ mit den Phasenergebnissen „Rohdaten“ und „Aufbereitete Daten“ sind bewusst aus der Reihenfolge der Modellierungsschritte ausgegliedert, da sie inhaltlich, zeitlich sowie bezüglich der einzubindenden Personen unabhängig von der Modellierung erfolgen können. Die graphische Einordnung des Phasenergebnisses „Rohdaten“ bedeutet also nicht, dass die Rohdaten erst nach dem Konzeptmodell entstehen können. Genauso wenig müssen die Rohdaten vollständig erfasst sein, bevor das formale Modell entstehen kann. Das Gleiche gilt analog für die aufbereiteten Daten. Das Vorgehensmodell sagt nur aus, dass die Datenaufbereitung Rohdaten voraussetzt, die Datenbeschaffung die Ergebnisse der Aufgabenspezifikation nutzt und dass für die Nutzung des ausführbaren Modells aufbereitete Daten vorliegen müssen.

Angesichts des Titels des vorliegenden Buches mag es erstaunen, dass Verifikation und Validierung in Abbildung 1 nicht als Phasen des Simulationsvorgehens vorkommen. Tatsächlich wird V&V häufig als Abschluss der Implementierung eines Simulationsmodells verstanden (vgl. Baron et al. 2001, S. 127f.). Die VDI-Richtlinie 3633 zur Simulation legte in ihrem Bild zur Vorgehensweise in Blatt 1 lange Zeit nahe, dass erst nach den Experimenten validiert wird, auch wenn aus anderen Textpassagen der Richtlinie erkennbar wurde, dass dies so nicht gemeint sein konnte. Die Aussage des Bildes ist erst mit der Ausgabe von 2008 hinsichtlich der Einbindung von V&V präzisiert worden. Die ausschließliche Durchführung von V&V

mit Abschluss der Modellbildung ist wirtschaftlich unsinnig, da sie das frühzeitige Erkennen und Beheben von Fehlern nahezu unmöglich macht. Simulationsmodelle sind in der Regel derart komplex, dass eine nur auf Basis der Endergebnisse erfolgende V&V nicht zuverlässig sein kann.

Die V&V ist folglich in allen Phasen des Modellierungsprozesses durchzuführen (Banks et al. 1988). Daher verzichten die Autoren bewusst auf eine eigene Phase „V&V“ und ordnen die V&V der Daten und Modelle *während der ganzen Simulationsstudie* phasenbegleitend ein (vgl. den rechtsseitigen Kasten in Abbildung 1), da *alle* Phasenergebnisse überprüft werden müssen. Sogar die Zielbeschreibung kann, auch wenn ihre Erstellung nicht Gegenstand der Simulationsstudie ist, vor Beginn der Aufgabendefinition unter anderem auf ihre Stimmigkeit und strukturelle Vollständigkeit hin überprüft werden.

V&V ist also kein einmaliger Vorgang bei Projektende und insbesondere kein Vorgang, der nach Erstellung des ausführbaren Simulationsmodells so oft durchgeführt wird, bis das Modell „stimmt“. V&V begleitet das Simulationsprojekt vom Beginn bis zum Ende, und V&V-Aktivitäten sind in jeder einzelnen Phase der Modellbildung erforderlich.

Auch für jede einzelne Phase kann (und sollte) V&V keineswegs nur bei Abschluss der Phase erfolgen. Wenn ein sinnvoller, abgeschlossener Zwischenstand erreicht ist, ist dieser sofort zu validieren, um Fehler frühzeitig erkennen und deren Auswirkungen auf den Modellierungsaufwand begrenzen zu können.

Verifikation und Validierung implizieren immer Prüfungen (Tests), die einen Gegenstand der Prüfung erfordern. Daher wird die V&V an den *Ergebnissen* der Phasen durchgeführt und nicht an den Phasen selbst. Dies wird im Simulationsvorgehensmodell durch die Anordnung der „V&V der Daten und Modelle“ an den Phasenergebnissen dargestellt (vgl. Abbildung 1). Die konsequente Anwendung von V&V setzt demzufolge eine sorgfältige Dokumentation dieser Phasenergebnisse voraus. Diese Dokumentation ist eine wesentliche Grundlage der Tests. Selbst dort, wo ein Test direkt am laufenden Modell stattfindet (z. B. mit Hilfe der Animation), müssen die Voraussetzungen und Annahmen, gegen die das laufende Modell zu testen ist, dokumentiert vorliegen.

Ein Test überprüft einen bestimmten Aspekt eines Phasenergebnisses. Negative Testergebnisse in einem Modellierungsschritt können ihre Ursache in den Aktivitäten und den eingesetzten Methoden dieser Phase selbst, aber auch in jeder der vorhergehenden Phasen haben. Für eine vollständige Validierung sind dann alle Validierungsaktivitäten zu wiederholen, die auf dem Ergebnis dieser fehlerhaften (ggf. früheren) Phase aufbauen.

Die Ergebnisse der Tests sind zu dokumentieren, da nur dadurch die Validität des Modells später nachvollzogen und bewertet werden kann

(Conwell et al. 2000, S. 823). Aus der V&V entstehen dadurch für jede Phase des Modellbildungsprozesses eigene Berichte, die eine wichtige Basis für eine detaillierte Modell- oder Projektabnahme darstellen. Zusätzlich können diese Berichte aber auch bei jeder Veränderung des ursprünglichen Studienzweckes die Entscheidung, ob das Modell auch für die geänderte Fragestellung gültig ist, wirksam unterstützen.

1.4 Fokus dieses Buches

Dieses Buch konzentriert sich auf den immer noch häufigsten Anwendungsfall der Simulation in Produktion und Logistik in Form einer (planungsbegleitenden) Simulationsstudie. Spezielle Anwendungen wie z. B. verteilte Modelle (vgl. Pohl et al. 2005) oder Modelle, die als Trainingsumgebung dienen sollen (vgl. McLoughlin et al. 2004), bedürfen einer Erweiterung des hier vorgestellten V&V-Ansatzes. Lediglich die betriebsbegleitende Simulation sowie die Nutzung von Simulation zum Test von Steuerungssystemen werden wegen der Ähnlichkeit der Problemstellung und der zunehmend häufigen Anwendung in den Abschnitten 6.2.4 und 6.2.5 kurz behandelt.

V&V befasst sich in erster Linie mit *Eigenschaften* bereits erstellter Modelle (in unterschiedlichen Phasen), aber nicht direkt mit der *Erstellung* dieser Modelle. Das hier vorliegende Buch behandelt den Modellierungsprozess daher nur, soweit es für die Einordnung der V&V in diesen Modellierungsprozess erforderlich ist. Wichtige qualitätssichernde Maßnahmen sind zwar auch vor der Beauftragung sowie nach der Auswertung der Experimente erforderlich (z. B. im Rahmen der Angebotserstellung, bei der Abnahme der Projektergebnisse oder bei der Nachnutzung; vgl. Wenzel et al. 2008). Diese Maßnahmen haben wesentlichen Einfluss auf die V&V, da die Gültigkeit eines Modells nur dann sorgfältig geprüft werden kann, wenn die Untersuchungsziele der Simulation und die Kriterien für die Modellabnahme bereits bei der Beauftragung möglichst umfassend und eindeutig dokumentiert sind. Da es sich hier in erster Linie um die Schaffung der unternehmensspezifischen Voraussetzungen für die Projektabwicklung handelt (z. B. in Gestalt der Zielbeschreibung des beauftragenden Unternehmens oder der Angebotserstellung des potentiellen Auftragnehmers), werden diese Maßnahmen hier nicht weiter betrachtet.

1.5 Aufbau und Zielgruppen dieses Buches

Dieses Buch soll dem Leser eine Hilfestellung bei der systematischen Durchführung von Verifikation und Validierung geben. Zu diesem Zweck wird als Kern dieses Buches ein Vorgehensmodell zur V&V für die Simulation in Produktion und Logistik (V&V-Vorgehensmodell) eingeführt. In Kapitel 6 wird dieses V&V-Vorgehensmodell beschrieben, konkrete V&V-Aktivitäten zeitlich und kausal eingeordnet sowie Handlungshilfen zum Einsatz des Vorgehensmodells gegeben. In den Kapiteln 2 bis 5 werden die erforderlichen Voraussetzungen geschaffen:

- Kapitel 2 definiert die wichtigsten *Begriffe*.
- Kapitel 3 fasst den interdisziplinären *Stand der Technik* zu Vorgehensmodellen, die in Bezug zu V&V in der Simulation stehen, zusammen.
- Kapitel 4 befasst sich mit der *Dokumentation* entlang einer Simulationsstudie und beschreibt vorgeschlagene Strukturen für die in jeder Projektphase entstehenden Dokumente als wesentliche Basis der V&V. Hierzu orientiert es sich an dem in Abschnitt 1.3 vorgestellten Vorgehensmodell zur Simulation.
- Kapitel 5 stellt *V&V-Techniken* vor und gliedert diese in die Phasen des Modellbildungsprozesses ein.

Zusätzlich stellen die Anhänge A1 und A2 in kompakter Form die Dokumentstrukturen aus Kapitel 4 sowie in Ergänzung zu Kapitel 6 konkrete, beispielhafte Fragen der V&V zusammen.

Insgesamt richtet das Buch sich an unterschiedliche *Zielgruppen* vom Simulationsexperten bis zum Wissenschaftler. Die Definitionen (insb. Abschnitte 2.1 und 2.2) sind für alle Zielgruppen von Interesse, da die folgenden Kapitel auf diesen Definitionen aufbauen.

Dem *Manager* bieten das Simulationsvorgehensmodell in Abschnitt 1.3 sowie das V&V-Vorgehensmodell in Abschnitt 6.1 – auch ohne die detaillierte Kenntnis der Dokumentstrukturen und V&V-Elemente – die erforderliche Übersicht über Randbedingungen und Struktur des V&V-Prozesses. Sie unterstützen ihn bei der Beurteilung der Glaubwürdigkeit von Simulationsergebnissen. Die Beschreibung der Rollen im Vorgehensmodell (Abschnitt 2.4) ist eine wertvolle Hilfe bei der Zuordnung der Verantwortlichkeiten im Projektteam.

Dem *Simulationsexperten* bieten in erster Linie die Hinweise zum Vorgehen bei der Simulation (Abschnitt 1.3), zur Dokumentation (Kapitel 4) sowie zum Vorgehen der V&V (Kapitel 6) unmittelbare Handlungshilfen. Diese werden unterstützt durch die Übersicht über die Dokumentstrukturen (Anhang A1), wobei jedoch ausdrücklich die Lektüre des Kapitels 4

empfohlen wird. Entsprechendes gilt für die bei der V&V anwendbaren Fragen (Anhang A2), deren Nutzung das Verständnis des grundsätzlichen Vorgehens (Kapitel 6) voraussetzt. Die Auswahl geeigneter V&V-Techniken wird durch die Systematisierung und Beschreibung der Techniken in Kapitel 5 unterstützt.

Für den *Wissenschaftler* sowie am Detail interessierte Leser sind zusätzlich Vorgehensmodelle mit unterschiedlichen Aufgaben und Anwendungsfeldern (Kapitel 3) vorgestellt, um so auch die Ableitung der hier vorgestellten Vorgehensmodelle nachvollziehen zu können.

Jede Zielgruppe kann einzelne Teile des Buches – bei grundsätzlicher Kenntnis der insbesondere in den beiden Vorgehensmodellen beschriebenen Zusammenhänge – auch als *Nachschlagewerk* nutzen. Dies gilt besonders für die Abschnitte 4.2 (Dokumentstrukturen), 5.2 (Techniken) und 6.3 (V&V-Elemente) sowie für die Anhänge A1 und A2.

2 Definitionen

Für das Verständnis der Vorgehensmodelle und Handlungshilfen, die in den Kapiteln 3 bis 6 vorgestellt werden, ist es hilfreich, einheitliche Begriffe zu verwenden. Als zentrale Grundbegriffe gehören hierzu zunächst die Begriffe Simulation und Experiment. Auch wenn die entsprechenden Definitionen der VDI-Richtlinien diesbezüglich eine gute Ausgangsbasis bieten, berücksichtigen sie doch den wichtigen Aspekt statistisch unabhängiger Wiederholungen nicht im erforderlichen Umfang (VDI 1997a). Diese Begriffe werden daher in Abschnitt 2.1 erläutert.

Im Zusammenhang mit der Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik kommen in der Literatur unterschiedliche Begriffe zum Tragen (vgl. Sargent 1982), deren umfassende vergleichende Erläuterung nicht Ziel dieses Buches ist. Daher werden in Abschnitt 2.2 die für den folgenden Text zentralen Begriffe *Verifikation*, *Validierung* und *Test* definiert. In Literaturquellen mit Bezug auf militärische Anwendungen wird der Begriff *Akkreditierung* im engen Zusammenhang mit der Validierung verwendet und teilweise sogar zur Abkürzung „VV&A“ verschmolzen. Auch wenn eine unabhängige Akkreditierung für Projekte in der Produktion und Logistik üblicherweise nicht angemessen sein wird, soll doch zumindest der Begriff geklärt werden (Abschnitt 2.2.4).

Jedenfalls steht die Schaffung der Glaubwürdigkeit des Modells im Zentrum der V&V (vgl. Abschnitt 1.1). Hier sind einerseits Aspekte der Angemessenheit eines Modells für die Anwendung zu diskutieren und andererseits Korrektheitskriterien wie z. B. Vollständigkeit, Konsistenz oder auch Genauigkeit zu beachten, die sich sowohl auf das Modell als auch auf den Prozess der Modellbildung beziehen können (Abschnitt 2.3).

Das in Abschnitt 1.3 kurz beschriebene Vorgehensmodell lässt deutlich werden, dass die Modellerstellung ein Prozess ist, für den unterschiedliche Kompetenzen (z. B. Kenntnis der Unternehmensdaten, Erfahrungen in der Systemanalyse, Kenntnis von Simulationswerkzeugen) erforderlich sind. Da in den folgenden Kapiteln auf solche Kompetenzen sowie auf die erforderlichen Verantwortlichkeiten Bezug genommen wird, werden in Abschnitt 2.4 mögliche *Rollen* innerhalb der Vorgehensmodelle zur Simulation kurz beschrieben.

Ergänzend sei noch auf die VDI-Richtlinie 4465 „Modellbildungsprozess“ (vgl. Furmans und Wisser 2005) hingewiesen, die sich zur Drucklegung dieses Buches noch in der Entstehung befindet. Sie enthält weitere Begriffserklärungen und Hinweise zu den Prozessschritten der Modellbildung.

2.1 Grundbegriffe der Simulation

Der Begriff *Simulation* wird in der VDI-Richtlinie 3633 definiert als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...]“ (VDI 2008, Abschnitt 1.4). Kuhn und Rabe (1998, S. 3ff.) haben einzelne Facetten dieses Simulationsbegriffes aus Sicht der Anwendung vertiefend erläutert. Für die Begriffe *System* und *Modell* sei ebenfalls auf die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (VDI 2008, Abschnitt 1.4) verwiesen. Diese Richtlinie klärt auch weitere Begriffe aus dem Umfeld der Simulation. Aus der VDI-Richtlinie 3633 „Begriffsdefinitionen“ (VDI 1996), die vom VDI ständig erweitert wird und daher bewusst als „Entwurf“ deklariert ist, sind weitere Begriffe zu entnehmen, z. B. *Ergebnisinterpretation*, *Optimierung* oder *Simulationsstudie*.

Ein *Simulationslauf* ist „die Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem [...] Modell über einen bestimmten (Modell-) Zeitraum [...], wobei gleichzeitig die Werte untersuchungsrelevanter Zustandsgrößen erfasst und ggf. statistisch ausgewertet werden“ (VDI 2008, Abschnitt 1.4). Bei einem Simulationslauf wird das Modell also genau einmal über einen bestimmten Zeitraum ausgeführt.

Eine Aussage zur statistischen Sicherheit von Simulationsergebnissen wird erst dann möglich, wenn ein Simulationslauf mit den gleichen Daten und Parametern, aber mit anderen Startwerten für die Programme zur Erzeugung von Zufallszahlen mehrfach wiederholt wird (*Replikation*). Aus der statistischen Auswertung der (typischerweise unterschiedlichen) Ergebnisse dieser Läufe lässt sich auf die Verlässlichkeit der Ergebnisse schließen (vgl. VDI 1997a) und – unter Nutzung statistischer Verfahren – ein verlässlicher Satz an Ergebnisdaten für die gegebenen Daten und Parameter gewinnen. Einen Sonderfall bilden solche Modelle, die kein festes zeitliches Ende vorsehen (Simulation mit offenem Ende). Bei diesen Modellen kann u. U. Aufwand eingespart werden, indem nicht n Simulationsläufe über einen gegebenen Zeitraum ΔT ausgeführt werden, sondern ein einziger Lauf über einen Zeitraum $n \cdot \Delta T$. Die statistische Auswertung erfolgt dann nicht durch Vergleich der n Läufe, sondern durch Vergleich

der n Zeitabschnitte in dem einzigen durchgeführten Lauf, die als statistisch unabhängig betrachtet werden. Hinweise für die hiermit verbundenen Gefahren gibt die VDI-Richtlinie 3633 in Blatt 3 (VDI 1997a).

Nach VDI ist ein *Simulationsexperiment* die „gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation“ (VDI 2008, Abschnitt 1.4). Diese Definition differenziert nicht zwischen der Wiederholung von Simulationsläufen mit gleichen Parametern und unterschiedlichen Startwerten für Zufallszahlen (Replikation) und der Wiederholung von Simulationsläufen mit unterschiedlichen Parametern. Für die statistisch abgesicherte Analyse sind für jeden Parametersatz mehrere Replikationen (ohne Variation der Simulationsparameter, aber mit unterschiedlichen Startwerten für die Zufallszahlengenerierung) durchzuführen.

In diesem Buch wird der Begriff *Simulationslauf* im Sinne der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 verwendet. Mit dem Begriff *Replikation* werden Simulationsläufe mit identischen Parametern, aber unterschiedlichen Startwerten für die Zufallszahlen bezeichnet. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 umfasst das *Experiment* dann eine Reihe von Läufen (bzw. Replikationen) mit unterschiedlichen Parametern.

2.2 Grundbegriffe zu VV&T

Verifikation und Validierung sind die zentralen Begriffe dieses Buches und werden daher in den folgenden beiden Abschnitten ausführlich diskutiert. Sowohl Verifikation als auch Validierung setzen die Durchführung von Tests voraus, die sich einerseits auf die Gültigkeit des Modells oder Dokumentes als Phasenergebnis (vgl. Abschnitt 1.3) und andererseits auf den Prozess zur Erstellung dieses Phasenergebnisses beziehen können.

Während sich ein Test immer einer bestimmten Phase (unter Nutzung des – ggf. noch vorläufigen – Phasenergebnisses) zuordnen lässt, ist die eindeutige Zuordnung eines Tests zu den Begriffen Verifikation und Validierung nicht immer möglich: „Model testing is ascertaining whether inaccuracies or errors exist in the model. [...] Testing is conducted to perform either validation or verification or both.“ (Balci 1998, S. 336). Aus diesem Grund wird der Begriff „Test“ im Bezug zur V&V in Abschnitt 2.2.3 unabhängig behandelt.

2.2.1 Verifikation

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert die Verifikation (teilweise auch als „Verifizierung“ bezeichnet) als den „[...] formalen Nachweis der Korrektheit des Simulationsmodells“ (VDI 2008, Abschnitt 6.5.3). In diesem Zusammenhang ist in Analogie zur Softwareerstellung, bei der unter Verifikation der Beweis der Konsistenz zwischen der Programmimplementierung und seiner Spezifikation verstanden wird (vgl. Balzert 2005, S. 476), zu prüfen, ob das erstellte Simulationsprogramm das konzeptionelle Modell (Konzeptmodell) korrekt wiedergibt. (vgl. Schlesinger et al. 1979; Davis 1992). Vielfach wird diese Definition in die Frage „Ist das Modell richtig?“ („Are we creating the X right?“) zusammengefasst (vgl. Balci 2003).

Es sei darauf hingewiesen (vgl. Page 1991; Balci 1998), dass sich der Korrektheitsnachweis aufgrund der hohen Komplexität von Simulationsmodellen in der Regel formal nicht vollständig führen lässt. Daher sind eine saubere Anwendung der Methoden des Software Engineering und der Einsatz von Programmtestmethoden zwingend.

Balci spricht in diesem Zusammenhang von der hinreichenden Genauigkeit, die erreicht werden muss, wenn ein Modell in ein anderes transformiert wird (Balci 1998, S. 336). Kennzeichnend ist hier einerseits der Hinweis auf die Überführung: Nicht die Korrektheit des Modells als solche wird geprüft, sondern die *Korrektheit der Transformation* („Transformational Accuracy“, vgl. Balci 2003) aus einem anderen Modell (z. B. dem Konzeptmodell). Andererseits wird auf *hinreichende Genauigkeit* hingewiesen. Hierdurch wird der Begriff der Verifikation deutlich aufgeweicht, da „hinreichend“ immer ein (teilweise) subjektives Kriterium sein wird.

Auf der Basis dieser Definitionen und Aussagen geben die Autoren für dieses Buch folgende Definition:

Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde.

Plakativ, aber im Sinne der vorherigen Ausführungen auch vereinfachend, lässt sich die Definition in die Frage „Ist das Modell richtig?“ fassen. Nach der eigentlichen Bedeutung des Wortes (lat. *verificare*: wahrmachen) soll das verifizierte Modell als wahr und korrekt, also fehlerfrei, angesehen werden können. Dies ist allerdings eine sehr theoretische Sichtweise, da der Nachweis der vollständigen Korrektheit eines Simulationsmodells im günstigen Fall sehr aufwendig, aber in den meisten Fällen mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich ist.

Da bei einer Simulation die Implementierung des tatsächlichen Programmcodes sicherlich die Tätigkeit ist, die am leichtesten nach konkreten Kriterien bewertet werden kann, wird das Verifizieren häufig auf die *Überprüfung* des Programmcodes beschränkt. Die hier verwendeten Definitionen beziehen sich aber auf alle Vorgänge, die während einer Simulationsstudie durchgeführt werden. Verifizieren bedeutet also eine *Überprüfung* von Phasenergebnissen während des gesamten Simulationsprojektes.

2.2.2 Validierung

Nach der VDI-Richtlinie 3633 ist Validierung eine „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Originalsystem“. Validierung soll sicherstellen, „[...] dass das Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt: Ist es das richtige Modell für die Aufgabenstellung?“ (VDI 2008, Abschnitt 6.6) – „Are we creating the right X?“ (vgl. Balci 2003).

Schmidt weist zusätzlich darauf hin, dass „[...] empirisch erhobene Daten aus dem realen System mit Daten verglichen werden müssen, die das abstrakte Modell liefert“ (Schmidt 1987, S. 59). Hierzu ist zunächst aber eine Validitätsprüfung dieser erhobenen Daten erforderlich. Ebenso müssen Daten aus realen Systemen, die in das Simulationsmodell einfließen sollen, valide sein. Zur Validierung gehört demnach auch die (teilweise unabhängige) Validierung von erfassten Daten.

Im englischen Sprachraum gelten unter anderem die Publikationen von Balci als Referenz zur Validierung von Simulationsmodellen. Seine Definition, „Model validation is substantiating that within its domain of applicability, the model behaves with satisfactory accuracy consistent with the study objectives“ (Balci 1998, S. 336) geht zurück auf eine Definition der Society for Computer Simulation (Schlesinger et al. 1979) und entspricht der Definition des VDI.

Auf dieser Basis geben die Autoren folgende Definition:

Validierung ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben.

Plakativ lässt sich diese Definition in die Frage „Ist es das richtige Modell?“ fassen. Validierung überprüft, ob das zur Zielerreichung wichtige *Verhalten* des Modells mit dem des abgebildeten Systems übereinstimmt.

Im Rahmen einer Simulationsstudie werden mehrere Modelle entwickelt. Das reale System, das sowohl eine real existierende als auch eine geplante Anlage sein kann, wird zunächst in eine Beschreibung transformiert, die Teil der Aufgabenspezifikation ist und damit bereits ein erstes Modell darstellt. Diese Beschreibung wird in ein Konzeptmodell überführt, welches die Grundlage für die Entwicklung des Simulationsmodells ist. Die Validierung begleitet jeden dieser Schritte (vgl. Abbildung 1) und überprüft, ob das entstehende Modell im Hinblick auf das Untersuchungsziel *hinreichend* genau ist. Für diese Überprüfung können alle zuvor erstellten Modelle und Dokumente herangezogen werden.

2.2.3 Test

Vom Beginn seiner Entwicklung bis zu seiner Fertigstellung wird das Modell regelmäßig unterschiedlichen Tests unterworfen (Balci 1998). Diese Tests sollen sicherstellen, dass (vgl. Endres 1977):

- das Modell das untersuchte System hinreichend genau wiedergibt (sachliche Korrektheit).
- das Modell die für die Zielstellung erforderlichen Funktionen beinhaltet (funktionale Korrektheit).
- das Modell die für die Zielstellung erforderlichen Randbedingungen, wie z. B. Rechenzeitverbrauch und verfügbare Schnittstellen erfüllt (technische Korrektheit).

Tests sind Mittel zur Verifikation und Validierung. Dabei lässt sich die Mehrzahl der Tests nicht eindeutig der Verifikation oder Validierung zuordnen; dies gilt insbesondere bei fortgeschrittener Modellierung (formales Modell, ausführbares Modell). Wird z. B. als Test ein Vergleich mit gemessenen Systemdaten durchgeführt, ist bei negativem Ergebnis zu untersuchen, ob dieses aus falschen Annahmen (Validierung) oder aus einer fehlerhaften Umsetzung korrekter Annahmen (Verifikation) herrührt. Es ist durchaus erwartbar, dass Maßnahmen zur Verifikation Fehler in den Annahmen aufdecken und sich damit nachträglich als Validierungsmaßnahme erweisen (vgl. Davis 1992, S. 5). Die enge Verbindung mit den erforderlichen Tests wird in der Literatur teilweise in der Zusammenfassung „Verifikation, Validierung und Test“ (VV&T) ausgedrückt.

Ein einziger korrekt angelegter Test mit negativem Ergebnis weist nach, dass das Modell für den Untersuchungszweck nicht verwendet werden kann. Bei positivem Ausgang des Tests ist dagegen nur nachgewiesen, dass das Modell unter den Testbedingungen in der erwarteten Weise reagiert (Pohl et al. 2005, S. 42); über das Verhalten des Modells unter ande-