

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 Materialflusssystems 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.

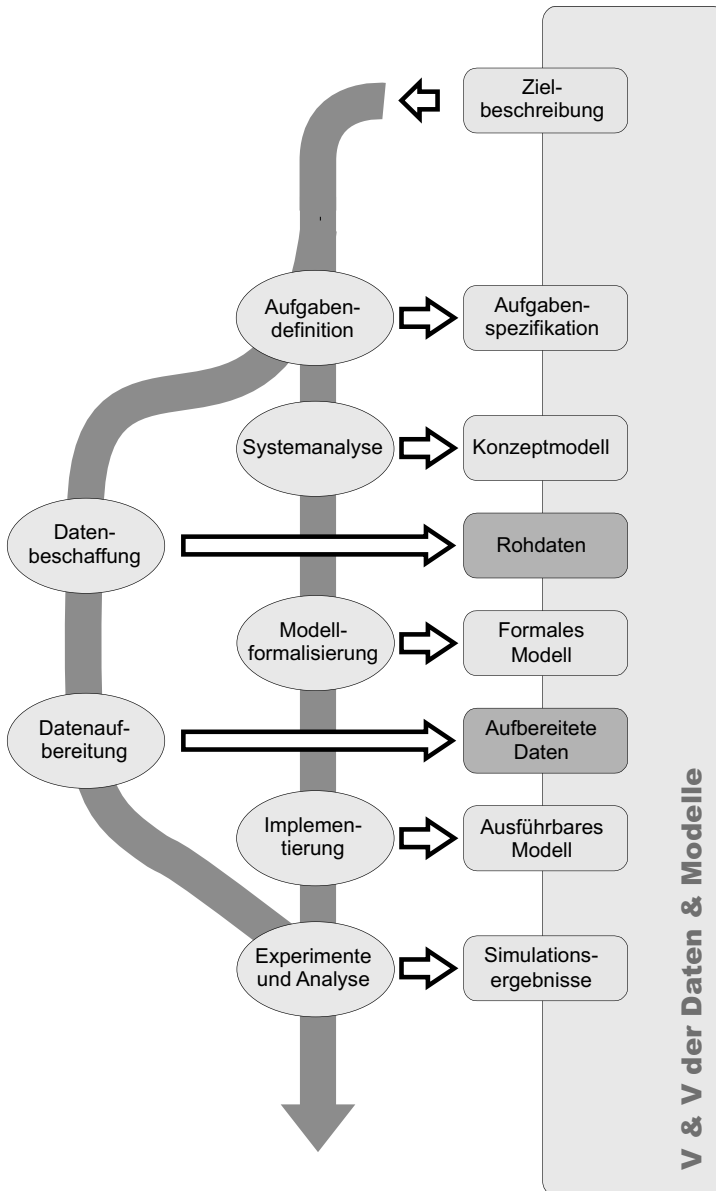


Abb. 1. Vorgehensmodell bei der Simulation mit V&V

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.

Angeichts 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.

Verifikation und Validierung für die Simulation in
Produktion und Logistik

Vorgehensmodelle und Techniken

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.

2008, X, 237 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-35281-5