Kapitel 14

Verifikation und Validierung

14.1 Ziele der V&V

Ist das Modell mit den erzielten Simulationsergebnissen plausibel? Eignet es sich tatsächlich für den ursprünglichen Nutzungszweck? Wie sieht das Leistungs- und Realzeitverhalten des Modells aus? Kann das Modell leicht modifiziert und für andere Zwecke genutzt werden? All das sind die Fragen, welche in Rahmen der Verifikation und Validierung (V&V) gestellt und beantwortet werden sollen. Denn die zentrale Herausforderung der V&V besteht in der Überprüfung der Modellglaubwürdigkeit.

14.2 Grundbegriffe zur V&V

14.2.1 Verifikation

Während des Modellbildungsprozesses wird das Modell stets aus einer bestimmten Form in die nächste transformiert. Erst werden die Anforderungen an das Modell definiert. Diese fließen im nächsten Schritt in die Modellkonzeption hinein. Das erstellte Konzept wird weiter in Form eines ausführbaren Modells umgesetzt. Der Kreis schließt sich mit der Modellnutzung, indem die gewonnenen Simulationsergebnisse für den vordefinierten Modellierungszweck verwendet werden.

Unter Verifikation versteht man die Überprüfung, inwieweit die Modellimplementierung sowohl das konzeptuelle Modell als auch die Modellspezifikation korrekt wiedergibt. Hiermit hilft die Verifikation, eine *hinreichende* Genauigkeit des Modells während dessen Transformation zu erreichen. In diesem Sinne beschäftigt sich die Verifikation mit der Frage, ob das Modell *richtig* erstellt wurde.

Idealerweise sollte die Korrektheit des Modells mit rein formalen Methoden beweisbar sein. In der Praxis ist es wegen der höheren Komplexität der Modelle oft nicht möglich.

© Der/die Autor(en) 2020

J. Hofmann, *Ein Physiologiemodell für Tactical Combat Casualty Care Training in mobilen Serious Games*,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-30202-3_14

14.2.2 Validierung

Bei der Validierung wird das Modell mit dem realen Originalsystem verglichen. Dabei wird es überprüft, ob das Modell genau genug und fehlerfrei das Verhalten des Originals wiedergibt. Weiterhin wird kontrolliert, dass das Modell dem vorher festgelegten Modellierungszweck entsprechend konzipiert wurde. So beantwortet die Validierung die Frage, ob es das *richtige* Modell für die Aufgabestellung ist.

Die Validierung soll kontinuierlich und in allen Phasen des Modellbildungsprozesses durchgeführt werden. Dazu werden ausführbare Modelle, verschiedene Dokumente sowie die während des Modellbildungsprozesses erstellte Modelldokumentation herangezogen. Außer dem Modell selbst, sollen alle Daten des Originalsystems, die in das Modell hineingeflossen sind, ebenso validiert werden.

14.2.3 Test

Tests sind die Mittel zur Verifikation und Validierung. Zum Beispiel kann mit einem Test sichergestellt werden, dass das Modell alle Funktionen beinhaltet, die für das Erreichen des Modellierungsziels erforderlich sind. Allerdings kann mit Tests die Gültigkeit des Modells nie vollständig nachgewiesen, sondern nur wahrscheinlicher gemacht werden. So weist ein einziger negativ ausgefallener Test nach, dass das Modell für den Modellierungszweck nicht angewendet werden kann. Dagegen zeigt ein positiver Test lediglich, dass es unter diesen besonderen Testbedingungen wie erwartet, d.h. wie das Realsystem, reagiert hat. Über das Modellverhalten unter anderen, auch nur leicht modifizierten Bedingungen kann kein positiv ausgefallener Test eine Aussage machen.

Test sind selbst Bestandteile der V&V, weil sie meist nicht formal aus der Modellspezifikation abgeleitet werden können. Daher soll beim Testdesign stets kritisch hinterfragt werden, ob mit einem partikulären Test die Korrektheit bestimmter vorher festgelegter Modellaspekte tatsächlich überprüft werden kann.

Es fällt schwer, Tests eindeutig entweder der Verifikation oder Validierung zuzuordnen. Bei einem negativ ausgefallenen Test können die Fehlerursachen z.B. in falschen Annahmen liegen (Validierung), oder auch aus fehlerhafter Umsetzung korrektes Modellkonzepts (Verifikation) folgen.

Um Tests durchzuführen, sind bestimmte V&V-Techniken erforderlich. Einer der klassischen Techniken besteht darin, die Simulationsergebnisse mit Ausgangsdaten eines anderen Modells zu vergleichen. In dieser Arbeit verwendete Techniken sind in Abschnitt 14.3.5 beschrieben.

14.2.4 Plausibilitätsprüfung

Die Korrektheit der Simulationsergebnisse kann nicht immer vollständig verifiziert werden. Zum Beispiel kann das zeitliche Verhalten der Vitalparameter im Physiologiemodell aufgrund der höheren Variabilität des Originalsystems¹ nicht vollständig überprüft werden. In diesem Fall kann die Plausibilitätskontrolle als eine Methode zur V&V eingesetzt werden. Bei der Plausibilitätskontrolle wird überprüft, ob die Simulationsergebnisse *im Allgemeinen plausibel und nachvollziehbar* erscheinen, oder ob sie offensichtlich als *unrichtig bzw. falsch* erkannt werden können.

Die Plausibilitätsprüfung kann mit geringem Aufwand durchgeführt werden. Einer der Hauptnachteile besteht darin, dass wenig offensichtliche Fehler durch diese Methode nicht immer identifiziert werden können.

14.3 Vorgehen zur V&V des Physiologiemodells

Für V&V des Physiologiemodells genutztes Vorgehen wird in Abbildung 14.1 schematisch dargestellt. Dabei beantwortet das Vorgehen zur V&V folgende Fragen:

- *Was* sind die Gegenstände der V&V? – Die Frage nach der Definition der Phasenprodukte im Modellbildungsprozess, welche überprüft werden sollen;
- *Was* sind die Bewertungskriterien, an welchen Erfolg bzw. Scheitern der V&V gemessen werden kann? – Die Frage nach der Definition der V&V-Kriterien;
- *Was* sind die eigentlichen V&V-Aktivitäten und *wann* sollen sie durchgeführt werden? – Die Frage nach der Definition der Schritte der V&V und ihrer Eingliederung in den Modellbildungsprozess;
- *Wie* werden die V&V-Aktivitäten durchgeführt? – Die Frage nach der Definition der V&V-Techniken, die verwendet werden sollen;
- *Wer* führt die V&V des Modells durch? – Die Frage nach der Definition der V&V-Rollen.

14.3.1 Modellentwicklungsprozess

Ein klar gegliederter Modellentwicklungsprozess mit vordefinierten Entwicklungsphasen, Phasenübergängen und Phasenprodukten bildet das strukturelle Gerüst für

¹ Hier gemeint ist der menschliche Organismus

Abb. 14.1: Vorgehen zur V&V des Physiologiemodells (modifiziert basierend auf [125, Fig.2])

V&V. Den Phasenprodukten hier werden V&V-Kriterien zugeordnet. Daraus können erforderliche V&V-Aktivitäten und V&V-Rollen abgeleitet werden.

Es gibt zahlreiche Vorgehensweisen zur Modellbildung. Zwar weisen sie unterschiedlich große Komplexität auf, bauen aber alle auf folgende Modellentwicklungsphasen auf:

- die Aufgabenanalyse;
- die Konzeption des Modells;
- die Implementierung des Modells;
- die Überprüfung des Modells und
- die Modellanwendung.

Das Physiologiemodell wurde basierend auf dem sog. evolutionären Vorgehensmodell zu Softwareentwicklung erstellt. Es setzt voraus, dass die Mindestanforderungen an das Modell in dem Produktkern als Erstes umgesetzt werden sollen. So konnte das lauffähige Physiologie-Prototypen-Modell den Fachexperten recht früh vorgestellt werden. Infolgedessen konnten die ersten Simulationsergebnisse nicht nur zur Validierung des im Prototypen bereits umgesetzten konzeptuellen Modells, sondern auch zur Entdeckung weiterer noch nicht berücksichtigter Modellanforderungen dienen. Das Physiologiemodell wurde dann inkrementell um verbliebene Anforderungen erweitert. In dieser Phase des Modellbildungsprozesses wurde das klassische Wasser-

fallmodell zur Softwareentwicklung genutzt. Resultierend kann gesagt werden, dass das Physiologiemodell in mehreren *evolutionären* Entwicklungsschritten sich entwickelte.

14.3.2 Phasenprodukte

Fünf Phasenprodukte wurden basierend auf dem angewendeten Modellbildungsprozess den V&V-Aktivitäten unterzogen:

1. die Modellanforderungen;
2. die Daten, welche für die Modellkonzeption notwendig sind;
3. das konzeptuelle Modell;
4. das ausführbare Modell;
5. die Simulationsergebnisse.

Die ersten drei Produkte lagen als Modelldokumentation vor. Es wurde schnell klar, dass ohne sie das Testen des Modells kaum möglich ist. Das ausführbare Modell wurde in Java umgesetzt. Die Simulationsergebnisse stellten den zeitlichen Verlauf ausgewählter Vitalparameter (z.B. Blutverlust während eines Zeitintervalls) sowie vordefinierte und fürs Testen interessante Ereignisse im Modell dar (z.B. der Zeitpunkt, wann das Tourniquet angelegt wurde). Man bereitete die Simulationsergebnisse für die V&V so auf, dass diese den Experten in verschiedenen Darstellungsformen präsentiert werden konnten.

Hinsichtlich der Phasenprodukte wurden verschiedene *Typen* der Validität geprüft (Außenpfeile in Abbildung 14.1):

- *Konzeptuelle Validität:* Die Korrektheit erfasster Modellanforderungen wurde überprüft. Weiter wurde analysiert, ob die internen Modellstrukturen die Struktur des Originalsystems für die Problemstellung der Simulation ausreichend wiedergeben. Hier sind die leitenden Fragen bei der Überprüfung der konzeptuellen Validität (nach [126, Tab.6.1]):
 - Welche Annahmen wurden hinsichtlich der Modellstruktur und der Modellfunktion gemacht? Ihre Begründung;
 - Ist der ausgewählte Detaillierungsgrad im Modell für die Problemstellung ausreichend?
 - Welche allgemeine Gesetze (Physik, Chemie, usw.) wurden beim Modellieren genutzt?
 - Welche Annahmen wurden beim Schätzen der Parametergrößen (Einstellung der Parameter im Modell) gemacht?

- Sind die Ausgabewerte des Modells physiologisch gesehen plausibel?
- *Verifikation*: Hier wurde die Struktur des ausführbaren Modells analysiert. Dabei wurde überprüft, ob sie der Struktur des konzeptuellen Modells genau entsprach und keine technischen Fehlern beinhaltete. Es wurden folgende Fragen beantwortet:
 - Sind alle Ein- und Ausgangsparameter des konzeptuellen Modells im ausführbaren Modell vorhanden?
 - Haben sie alle die korrekte Dimension, Auflösung, Breite?
 - Wurden die Formel im Modell korrekt abgeleitet?
- *Operationale Validität*: Hier wurde überprüft, ob sich das Verhalten des Originalsystems durch Simulationsläufe nachbilden ließ:
 - Was sind die Referenzdaten zum Testen des Modellverhaltens? Unter welchen Bedingungen wurden diese erhoben?
 - Was ist das Maß der Genauigkeit beim Testen?
 - Sind die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Problemstellung bei der Modellierung akzeptabel?

14.3.3 V&V-Rollen

Die V&V des Physiologiemodells erfolgte in zwei Modi: die V&V-Aktivitäten wurden sowohl vom Modellentwickler allein, als auch von Fachexperten in Begleitung des Modellentwicklers gemeinsam durchgeführt. Dabei stellten die Fachexperten für die Modellbildung und Simulation notwendige Informationen aus den Gebieten *Allgemeine Medizin*, *Ziviler Rettungsdienst* und *Ausbildung der Ersten Hilfe nach TCCC Algorithmus* bereit. Es entstanden Kooperationen mit zwei Organisationen:

- mit dem Bundeswehr Krankenhaus in Ulm: Hier wurden Ärzte, Sanitäter sowie Medizinstudenten, die in der Zeit der V&V ihr Praktikum im Krankenhaus absolvierten, in die V&V des Modells hinzugezogen. Viele der Fachexperten waren in der Ausbildung der Bundeswehrsoldaten nach TCCC involviert und konnten daher wertvolle Informationen diesbezüglich liefern;
- mit der DRK Landesschule in Baden-Württemberg: Die Ausbilder hier informierten die Modellentwickler über den Ablauf des Rettungsdiensts im zivilen Bereich und validierten das Physiologiemodell in dessen unterschiedlichen Entwicklungsphasen.

Rückblickend kann bei den V&V-Rollen zwischen der *Modellentwickler*-Rolle (auch Simulationsexperte genannt) und der Rolle des *Fachexperten* unterschieden werden.

14.3.4 V&V-Kriterien

Die Akzeptanzkriterien dokumentieren, was ein Modell erfüllen muss, um das V&V-Verfahren zu bestehen. Die V&V-Kriterien lassen sich hinsichtlich der zu überprüfenden Aspekte und der Phasenprodukte des Modellbildungsprozesses festlegen. Tabelle 14.1 listet die Kriterien auf, die bei der V&V des Physiologiemodell berücksichtigt wurden.

14.3.5 V&V-Techniken

Durch den Einsatz einer V&V-Technik kann die Glaubwürdigkeit des Modells erhöht werden. Dennoch kann keine der Techniken die Fehlerfreiheit des Modells gewährleisten.

Es gibt über 70 definierte V&V-Techniken (vgl. [128]) und kein allgemein anwendbares Vorgehen, welches die Auswahl einer geeigneten V&V-Technik unter Berücksichtigung partikulärer Rahmenbedingungen einer Simulationsstudie regelt. Daher müssen Simulationsfachleute subjektiv entscheiden, welche V&V-Technik und in welcher Projektphase zum Einsatz kommen soll. Grundsätzlich sollen V&V-Techniken in allen Phasen des Modellbildungsprozesses verwendet werden. Unterschiedliche V&V-Techniken können außerdem miteinander kombiniert werden, um ihre Effektivität zu erhöhen.

Im Folgenden sind solche V&V-Techniken beschrieben, die bei der V&V des Physiologiemodells eingesetzt wurden.

Schreibtischtest Beim Schreibtischtest (Engl: *Desk Checking*, *Self-inspection*) geht es um das Überprüfen der eigenen Arbeit auf Vollständigkeit, Korrektheit und Konsistenz. Hier dienen die Modellanforderungen in Abschnitt 2 sowie die Beschreibung des konzeptuellen Modells in Teil II als die V&V-Grundlage. Das Problem dieser Technik besteht darin, dass eigene Fehler oft schwer zu erkennen sind. Um das Problem zu umgehen, wurden die Schreibtischtests mit einer anderen V&V-Technik *Validierung im Dialog* kombiniert.

Tabelle 14.1: Kriterien bei der V&V des Physiologiemodells [127, Tab.1]

Kriterien	Untersuchungsgegenstand
Vollständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – strukturelle Überprüfung in Bezug auf fehlende Anforderungen und Informationen – Bestimmung des Grades der Übereinstimmung zwischen Anforderungen und Modell
Konsistenz	<ul style="list-style-type: none"> – Schlüssigkeit der semantischen Zusammenhänge – Schlüssigkeit der Struktur – Schlüssigkeit der gemachten Annahmen – Durchgängigkeit der Terminologie
Genauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Fehlerfreie, sorgfältige Modellierung – Wahl des angemessenen Detaillierungsgrades – Richtige Granularität der Daten – Richtige Wahl der Zufallsverteilungen
Aktualität	<ul style="list-style-type: none"> – Inhaltliche und zeitliche Gültigkeit der Informationen/Daten hinsichtlich ihrer Verwendung – Gültigkeit des Modells für die Aufgabenstellung
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> – Passgenauigkeit / Tauglichkeit / Nutzbarkeit des Modells für den Verwendungszweck – Angemessenheit in Bezug auf die Aufgabenstellung – Leistungsfähigkeit des Modells – Nutzen für den Anwender
Plausibilität	<ul style="list-style-type: none"> – Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge – Schlüssigkeit der Ergebnisse
Verständlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Nachvollziehbarkeit für den Anwender – Transparenz in der Modellierung – Eindeutigkeit in der Formulierung – Lesbarkeit
Machbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Technische Umsetzbarkeit der Anforderungen – Erreichbarkeit der geforderten Projektziele – Umsetzbarkeit der zeitlichen Projektplanung
Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Möglichkeit des Zugriffs auf die notwendigen Daten und Dokumente – Glaubwürdigkeit der Informations- und Datenquellen – Aufwand der Beschaffung

Dimensionstest Der Dimensionstest (Engl.: *Dimensional Consistency Test*) eignet sich dazu, Fehler bei der Ableitung der Formeln aufzudecken. Beim Testen werden die Dimensionen der Parameter auf beiden Seiten einer Formel nachgerechnet. Dabei können Inkonsistenzen innerhalb der Formel oder auch in der Zuweisung zu einem weiteren Parameter entdeckt werden. Anhang D beinhaltet Tabellen für Basiseinheiten der Vitalparameter, welche bei den Dimensionstests verwendet wurden.

Sensitivitätsanalyse Bei der Sensitivitätsanalyse (Engl.: *Sensitivity Analysis*) werden Auswirkungen der Eingabeparameter auf die Ausgabeparameter im Modell untersucht. Dabei verändert man die Eingangsgrößen des Modells und beobachtet die Schwankungen in Simulationsergebnissen. Ihre Richtung und das Ausmaß müssen mit Beobachtungen im realen System übereinstimmen. Die Technik hilft, die sog. *sensitiven Parameter* des Modells aufzuspüren, bei welchen bereits kleine Veränderungen große Schwankungen ausgegebener Werte verursachen können.

Test der internen Validität Der Test der internen Validität (Engl.: *Internal Validity Test*) hilft dabei, statistische Unsicherheiten im Modell aufzuspüren. Hier werden mehrere Simulationsläufe bei unveränderten Eingabeparametern und unterschiedlichen Startwerten der Zufallszahlengeneratoren durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden mit dem Verhalten des realen Systems verglichen. Eine signifikante Abweichung der Werte voneinander kann auf eine fehlerhafte Modellierung deuten.

Validierung im Dialog Bei der Validierung im Dialog (Engl.: *Face Validity*) werden Fachexperten, die das Wissen über das Realsystem besitzen, in den V&V-Prozess einbezogen. Man diskutiert mit ihnen über das Produkt des Modellbildungsprozesses, das zu validieren ist. Dies kann z.B. das ausführbare Modell, oder auch ein Teil des konzeptuellen Modells sein. Am Diskussionsende sollen Fachexperten das zu validierende Produkt entsprechend ihrer Erfahrung im Gebiet als gültig oder ungültig einschätzen.

Die Validierung im Dialog kann sehr schnell und kostengünstig verschiedenste Fehler im Modell aufdecken, etwa wenn den Fachexperten Unstimmigkeiten im Modellverhalten auffallen. Durch die Tatsache, dass die Simulationsleute den Fachexperten Teile des Modells während der Diskussion erklären müssen, können diese gemeinsam erneut kritisch überdacht werden. So wird die Validierung im Dialog als eine der V&V-Techniken noch wirksamer. Der Nachteil der Technik liegt in ihrer Subjektivität, da sie von der Fachexpertise und Zusammenarbeit zwischen Simulations- und Fachexperten sehr abhängt.

Die Validierung im Dialog wurde nicht allein, sondern in der Kombination mit V&V-Techniken *Animation* und *Monitoring* zur V&V des Physiologiemodells eingesetzt. Dabei wurden alle Phasenprodukte des Modellbildungsprozesses gemeinsam mit Medizinerinnen der V&V unterzogen.

Animation Mittels Animation (Engl.: *Animation*) werden zeitliche Abläufe im Modell dem Beobachter zwei- bzw. dreidimensional graphisch dargestellt. Dabei kann

festgestellt werden, ob die Prozesse im Beobachtungszeitraum plausibel ablaufen und ob es Unterschiede zum realen System gibt. Die Stärke der Animation liegt in der Validierung des Verhaltens ausgewählter Modellabschnitte über *kurze* Zeiträume. Mittels dieser Technik können aber keine Rückschlüsse über das Modellverhalten außerhalb des Beobachtungszeitraums gemacht werden. Hiermit werden selten auftretende Fehler mit großer Wahrscheinlichkeit nicht identifiziert.

Monitoring Mit Monitoring (Engl.: *Operational Graphics*) werden Variablenwerte während der Simulation ausgegeben, sodass ihre Korrektheit und Konsistenz überprüft werden kann. Dabei können die Werte aus zwei Perspektiven betrachtet werden:

- die *aktuellen* Werte präsentieren den gegenwärtigen Zustand der Parameter während des Simulationslaufs, und
- der Zeitverlauf der Werte, wo der Wert eines Parameters in einem Zeitintervall beobachtet wird.

Beide Sichten sollen graphisch entsprechend aufbereitet werden, was die Fehleraufdeckung erleichtern soll. Hier kann mit unterschiedlichen Darstellungsformen der Parameter, wie etwa mit farbigen Kreisdiagrammen, Balkengraphiken, Funktionskurven, Tabellen, usw. experimentiert werden. Die Vor- und Nachteile des Monitoring sind denen der Animationstechnik identisch.

14.3.6 V&V-Ablauf

Im Folgenden wird der tatsächliche Ablauf mit Fachexperten gemeinsam durchgeführter V&V-Aktivitäten beschrieben (gerade und gebogene durchgezogene Pfeile in Abbildung 14.1).

Bei der V&V beobachteten Mediziner das Verhalten des Modells anhand der Wertveränderungen dessen Vitalparameter. Abschließend sollten sie das Modellverhalten entweder als *plausibel* oder als *fehlerhaft* beurteilen. Die Fachexperten wurden die ganze Zeit von den Simulationsleuten unterstützt. Die letzteren halfen ihnen bei der Nutzung der Testumgebung und erklärten die Zusammenhänge der Vitalparameter im Modell (*Validierung im Dialog* V&V-Technik). Außerdem wurden die Mediziner in die Begrifflichkeiten des Modells eingewiesen, damit sie die Simulation besser verstehen können. Z.B. musste ihnen erklärt werden, dass das Modell zwischen Vitalparametern und Vitalzeichen strikt unterscheidet, obwohl in der Medizin beide Begriffe als Synonyme verwendet werden. Weiter war es wichtig zu erwähnen, dass der Status der Vitalzeichen im Modell ausschließlich durch einen Wert präsentierbar

ist und dass dieser Wert aus einem bzw. mehreren Werten anderer Vitalparameter entsprechend dem Algorithmus berechnet wird. So konnten die Mediziner verstehen, dass wenn der Vitalparameter für die Hautfarbe einen Wert unter 0,7 hat, es bedeutet, dass der Verletzte „blass“ ist, und dass der Wert 0,7 eine Annahme repräsentiert, und von Modellnutzern nach ihrem Wunsch einzustellen ist.

Die Mediziner ließen das Physiologiemo­dell den Verlauf einer von ihnen ausgewählten Verletzung zu simulieren. Im Laufe der Simulation konnten sie den Verletzten nach ihrem Wunsch behandeln, müssten es aber nicht zwingend machen. Die Simulationsergebnisse standen dann zur Diskussion mit den Simulationsexperten bereit.

Um die Zusammenarbeit mit Fachexperten effizienter zu gestalten, wurde ein sog. Validierungsprotokoll entwickelt (Anhang E). Es beinhaltet die Fragen an Fachexperten, die dem ganzen V&V-Prozess eine klare Struktur verleihen und den Experten fokussiert durch den V&V-Prozess führen. Das Validierungsprotokoll ist in vier Teile gegliedert:

- Der erste Teil soll die Aufmerksamkeit der Mediziner auf eine bestimmte Verletzung fokussieren. Bevor die Simulation überhaupt gestartet wird, werden sie gebeten, den Verlauf der Verletzung im eigenen Kopf zu „simulieren“. Dabei werden die Experten nach für diese Verletzung typischen Vitalzeichen sowie deren zeitlichen Entwicklung im Falle, wenn keine Behandlung erfolgte, befragt (z.B. Was passiert bei einem Spannungspneumothorax?);
- Im zweiten Teil wird ein Szenario mit der gleichen Verletzung vom Modell simuliert. Das Szenario startet mit einem Verletzungsereignis (z.B. Beschuss → Thoraxverletzung durch einer Schusswunde → Entwicklung des Spannungspneumothorax). Die Simulation läuft und wird auf Wunsch der Fachexperten beendet. Während der Simulation werden keine Rettungsmaßnahmen ausgeführt. Die Fachexperten beobachten die Vitalparameter und werden nach deren Plausibilität und Vollständigkeit befragt (z.B. Steigen die Atemfrequenz und -tiefe zu schnell? Beim Spannungspneumothorax erwartet man ein fehlendes Atemgeräusch auf der betroffenen Seite. Wo und wie ist es im Modell abgebildet?);
- Der Ablauf des dritten Teils unterscheidet sich vom zweiten nur in einem Punkt: Die Fachexperten sollen nun sowohl angemessene als auch aus medizinischer Sicht für diese Verletzung unangebrachte Behandlungen am Patienten durchführen (richtig → mit Chest Seal die Wunde abdichten und auf der betroffenen Seite entlasten; eine mögliche Variation der fehlerhaften Behandlung → mit Chest Seal die Wunde abdichten und die Entlastungspunktion nicht ausführen). Wie im zweiten Teil werden die Vitalparameter von Fachexperten beobachtet und nach der Plausibilität und Vollständigkeit überprüft.

Wertveränderungen einiger Vitalparameter wurden in einer 3D-Umgebung animiert dargestellt (*Animation* V&V-Technik) Vor allem solche Vitalparameter, die

Menschen im realen Leben visuell wahrnehmen, konnten von Experten mit Hilfe der 3D Animation besser beobachtet werden. So zeigt Abbildung 14.2a die Animationen für verschiedene Ausprägungen des Parameters für den Bewusstseinszustand des Verletzten. Hier wird getestet, ob die entsprechende Darstellung zum Zustand passt, d.h. ob ein „aufgeregter“ Patient von den Fachexperten als solcher erkannt werden kann. In dieser Weise werden alle animierbaren Vitalzeichen überprüft. Im nächsten Schritt kann den Verlauf mehrerer Vitalparameter während der Simulation getestet werden (Abbildung 14.2). Hier werden die Parameter für den Bewusstseinszustand, für die Atmungstiefe und -frequenz, für die Hautfarbe und die Körperhaltung gleichzeitig animiert. Sind dadurch entstandene Bilder immer noch stimmig? Warum atmet der Verletzte „sehr langsam“, obwohl sein aktueller Bewusstseinszustand als „extrem aufgeregt“ ist? Wertveränderungen mancher Vitalparameter wurden zu Testzwecken auch in einer 2D-Umgebung animiert. Wenn für die Animation im 3D Demonstrator der Fokus auf realitätsnahe Darstellung der Parameter lag, sollte die 2D Animation das Modellverhalten für die Tester möglichst transparent machen. Dazu vergleicht man Abbildungen 14.4 und 14.3 miteinander. Beide zeigen eine Beinamputation aus verschiedenen Perspektiven. In 2D wird der Fokus beim Testen auf die Geschwindigkeit, mit welcher der Patient sein Blut verliert, gelegt.

(a) Verschiedene Bewusstseinszustände eines Verletzten

(b) Der Verletzte ist am Leben

(c) Der Verletzte ist verstorben (beachte die Körperhaltung und das Gesicht)

Abb. 14.2: 3D Animation des Verletzten

So soll die Blutlache bei einer starken Blutung schneller wachsen als bei einer schwachen. Ab dem Zeitpunkt an dem das Bein korrekt abgebunden wird, verändert sich die Größe der Blutlache nicht mehr. Weiter wird eine starke arterielle Blutung in 2D durch blinkende Blutropfen dargestellt (hellrote Tropfen auf der Blutlache in Abbildung 14.4). Der Fachexperte kann es überprüfen, ob die Stärke der Blutung zur Verletzung (Verletzungstyp, -Stelle usw.) passt und ob das Abbinden korrekt funktioniert (z.B. nach dem Anlegen und Zuziehen des Tourniquets verschwinden blinkende Blutropfen, die Blutlache vergrößert sich aber weiter → ein Fehler).

(a) Mit Kleidung

(b) Ohne Kleidung

(c) Bandagiert,
mit Kleidung (d) Bandagiert,
ohne Kleidung

Abb. 14.3: 3D Animation der Amputation

Abb. 14.4: 2D Animation eines Verletzten mit Beinamputation

Die Wertveränderungen weiterer Vitalparameter konnten von den Experten in Form einer Graphik oder als der aktuelle Zustand der Parameter (eine Tabelle) betrachtet werden (*Monitoring V&V-Technik*). Abbildung 14.5 zeigt dafür entwickelte Fenster des 2D Demonstrators.

(a) Hauptfenster zur Monitoring der Vitalparameter

Bleeding Trauma Parameters : S6, Amputation lower leg (bottom) (Run on 2. Dezember 2015 13:31:05 MEZ)

Time	AMP (at 1) [ART]
00:00:00	0.0
00:00:15	63.6
00:00:30	134.6
00:00:45	205.7
00:01:00	277.0
00:01:15	348.2
00:01:30	419.5
00:01:45	490.8
00:02:00	561.9
00:02:15	633.0
00:02:30	704.1
00:02:45	775.2
00:03:00	846.0

(b) Fenster zur Monitoring der Vitalparameter bei der Blutungskontrolle

(c) Darstellung der Werte ausgewählter Vitalparameter in tabellarischer Form

Cardiovascular System Parameters

(d) Fenster zur Monitoring ausgewählter Vitalparameter des Herz-Kreislaufsystems

Abb. 14.5: Monitoring der Vitalparameter in 2D

14.4 Grenzen von V&V des Physiologiemodells

Die Verifikation und Validierung des Physiologiemodells stößt an bekannte Grenzen, welche für V&V von Modellen und Simulationsergebnissen im Allgemeinen gelten:

- Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt in erster Linie von der Qualität des Modells, der Qualität der Daten, welche für die Kalibrierung der Eingabeparameter sowie während der Modellierung verwendet wurden, sowie von der Art der Modellnutzung ab. Ändert sich einer dieser Faktoren, kann die Qualität der Simulationsergebnisse durch ursprüngliche V&V nicht mehr gewährleistet werden. In dem Fall muss die V&V mit Berücksichtigung der Veränderungen im Modell erneut durchgeführt werden.

Zur Illustration dieser Problematik überlegt man sich eine neue Anforderung an das Modell, wie etwa den Verlauf eines *geriatrischen* Traumas mit dem Physiologiemodell simulieren zu können. Das aktuelle Modell ist für die Simulation (patho-)physiologischer Prozesse in einem jüngeren männlichen Körper erschaffen worden. Im Kern werden diese Prozesse auch bei älteren Menschen ähnlich verlaufen. Dennoch gibt die Geriatrie viele Spezifika vor, welche die Physiologie im partikulären stark beeinflussen können: zum Beispiel die Belastbarkeit des Herzmuskels sinkt in hohem Alter spürbar, oder es treten chronische Vorerkrankungen auf. Ohne die Anpassung des Modells sowie der Modellierungsdaten an die neue Anforderung, werden die Simulationsergebnisse sehr wahrscheinlich nicht mehr valide sein. In diesem Fall muss eine neue Entwicklungsschleife des Modellbildungsprozesses mit allen dazugehörigen V&V-Aktivitäten und nach der Rücksprache mit Fachexperten ausgeführt werden.

- Auch nach der erfolgreichen V&V kann das Modell immer noch Fehler beinhalten. Denn die Korrektheit und Vollständigkeit des Modells kann nur auf der Basis formaler Methoden endgültig nachgewiesen werden (z.B. Testen basierend auf Logikkalkül). In der Praxis geschieht dies selten und meist für sehr einfache Modelle. In allen anderen Fällen wird mit der V&V lediglich versucht, Unsicherheiten hinsichtlich erhaltener Simulationsergebnisse auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Das Letztere trifft auf die V&V des Physiologiemodells vollkommen zu.
- Bei der V&V bemüht man sich stets um Objektivität. Dennoch muss klar sein, dass V&V meist eine *subjektive* Methode ist. Lediglich statistische V&V-Techniken werden in der Fachliteratur zur V&V als *objektiv* bezeichnet, weil sie auf mathematische Verfahren zurückgreifen. Alle anderen Techniken sind z.B. in Kategorien *subjektiv* und *wenig subjektiv* unterteilt. Auch weitere Aspekte der V&V weisen eine subjektive Natur aus: Man denke an die Ableitung der Akzeptanz-

kriterien für die V&V eines partikulären Modells oder an die Ausführung der V&V-Aktivitäten durch einen Fachexperten.

Für die V&V des Physiologiemodells wurden außer *objektiven* Techniken (wie etwa Test der internen Validität, Sensitivitätsanalyse) auch *subjektive* Techniken (wie etwa Animation, Monitoring, Validierung im Dialog) sowie deren sinnvolle Kombination eingesetzt. Letztere wurde von Simulationsexperten entwickelt und war daher wiederum *subjektiv*. Ein weiterer Faktor, der die Subjektivität der V&V spürbar verstärkte, ist die objektive Variabilität menschlicher Physiologie. Sie wird von Mediziner*innen durch den Spruch: „Es gibt nichts, was nicht gibt“, punktgenau beschrieben. Infolgedessen waren die Meinungsunterschiede zwischen medizinischen Fachexperten bei der V&V des Physiologiemodells keine Seltenheit. Die Validierungsergebnisse hingen in solchen Fällen von der Erfahrung der Test durchführenden Personen ab.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.