

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik

Bachelor Projektarbeit

Gruppierung von Verifikations- und Validie-  
rungstechniken bei der Modellentwicklung in  
der Simulation von Supply Chains

Katharina Langenbach

Studiengang	Maschinenbau
Matrikelnummer	196084
Thema ausgegeben am	08.08.2019
Arbeit eingereicht am	15.09.2020
Erstprüfer	Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Anne Scheidler
Zweitprüfer	M. Sc. Joachim Hunker

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen im Kontext der Modellbildung in der Simulation von Supply Chains .....	3
2.1 Grundlagen der Supply Chain .....	3
2.2 Grundlagen der Simulation .....	4
2.3 Modellbildung in der Simulation von Supply Chains.....	10
3. Verifikations- und Validierungstechniken unter Berücksichtigung der Grundlagen zur Modellbildung.....	12
3.1 Verifikations- und Validierungstechniken .....	12
3.2 Vorstellung ausgewählter Verifikations- und Validierungstechniken .....	13
3.3 Vorstellung von Gruppierungsansätzen von Verifikations- und Validierungstechniken aus der Literatur .....	16
4. Gruppierung von Verifikations- und Validierungstechniken in Bezug auf Simulation von Supply Chains .....	19
4.1 Erläuterung der Auswahlmethode.....	19
4.2 Ableitung von Gruppierungskriterien .....	20
4.3 Gruppierung von ausgewählten Verifikations- und Validierungstechniken .....	36
4.4 Fazit bezüglich der Gruppierung von V&V-Techniken.....	44
5. Zusammenfassung und Ausblick .....	47
Literaturverzeichnis .....	49
Abbildungsverzeichnis .....	53
Tabellenverzeichnis .....	54
Abkürzungsverzeichnis .....	55
Eidesstattliche Erklärung .....	56

# 1. Einleitung

Steigende Produktkomplexität, große Variantenvielfalt und hohe Flexibilität in einer Supply Chain (SC) erfordern kurze Entwicklungs- und Planungszyklen (Kuhn und Rabe 1998, Kaczmarek und Stüllenberg 2002, Terzi und Cavalieri 2004). Bei der Beherrschung der sich daraus ergebenden kurz- bis langfristigen Problemstellungen gewinnen unter anderem Simulationen weiter an Bedeutung, denn diese können neben anderem zur Entscheidungsunterstützung, Analyse oder Prognose dienen (Banks 1998, Terzi und Cavalieri 2004, Kleijnen 2005, Arnold et al. 2008, Law 2015, Stadtler et al. 2015).

Ein Kernelement von Simulationen bilden Modelle (VDI 3633). Um aussagekräftige, belastbare und glaubwürdige Ergebnisse zu erhalten, ist eine Verifikation und Validierung (V&V) dieser Modelle notwendig (Rabe et al. 2008). Dabei ist die Modellentwicklung als eigenständiger Prozess zu verstehen (Maria 1997, Sargent 2013). In einem solchen Prozess werden einzelne Entwicklungsphasen durchlaufen, bis die an das zu entwickelnde Modell gestellten Anforderungen, wie zum Beispiel die Granularität, erfüllt sind (Sargent 2013). Die jeweiligen Entwicklungsphasen stellen wiederum unterschiedliche Anforderungen an V&V-Techniken (Brade 2000). Dementsprechend ist die Wahl passender Techniken von entscheidender Bedeutung (Wang 2013). Die Auswahl der Techniken hat nicht nur Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der simulierten Anwendung, wie zum Beispiel die Betrachtung des Kosten-Nutzen-Aufwands für die Simulation, sondern auch auf deren Vertrauenswürdigkeit (Law 2008).

Die Wahl der passenden V&V-Technik ist eine komplexe Aufgabe sowohl für Entwickler als auch Anwender der Simulation (Law 2008). Durch eine adäquate Gruppierung von V&V-Techniken kann die Auswahl vereinfacht und unterstützt werden. Bisherige Ansätze in der etablierten Literatur stellen nur grobe Einteilungen von V&V-Techniken unabhängig von der Problemdomäne dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, Gruppierungsansätze für V&V-Techniken im Kontext der Modellentwicklung in der Simulation von SCs zu entwickeln und auf ausgewählte Techniken anzuwenden. Dazu werden als Zwischenziele die Grundlagen der Modellierung in der Simulation von SCs erläutert sowie gängige V&V-Techniken identifiziert. Weitere Ziele sind die Beschreibung, Unterscheidung und Auswahl verschiedener V&V-Techniken aus dem Umfeld der Simulation von SCs. Des Weiteren wird eine Auswahlmethode für die

V&V-Techniken in Anlehnung an bereits verwendete Methoden entwickelt. Zudem werden ausgewählte V&V-Techniken in Bezug auf Simulationen von SCs beispielhaft unter Anwendung der entwickelten Auswahlmethodik gruppiert.

Die Arbeit gliedert sich hierbei in drei Hauptteile: (1) die theoretischen Grundlagen, (2) Vorstellung von V&V-Techniken und Gruppierungsansätzen in der Literatur sowie (3) der eigenen Entwicklung von Kategorisierungsmöglichkeiten. Zum Erreichen der Ziele der Arbeit werden Kriterien abgeleitet und diese auf ausgewählte Techniken angewendet, sowie deren Anwendbarkeit und Aussagekraft kritisch im Fazit hinterfragt. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich mit in der Literatur vorgestellten Gruppierungsansätzen. Damit dies gelingt, werden gängige V&V-Techniken vorgestellt, erläutert und analysiert, um nachfolgend eine Gruppierung der V&V-Techniken basierend auf abgeleiteten Kriterien vornehmen zu können. Dazu ist es erforderlich die Rolle der V&V in der Modellentwicklung und der Simulation von SCs zu erarbeiten. Hierzu werden theoretische Grundlagen der Simulation erläutert, nachdem eine Begriffsabgrenzung im Bereich der SC erfolgt ist. Außerdem werden unterschiedliche Arten der Modellbildung in der Simulation von SCs beschrieben, um das Anwendungsgebiet der V&V-Techniken enger einzugrenzen.

## 2. Grundlagen im Kontext der Modellbildung in der Simulation von Supply Chains

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe und Konzepte erläutert. Hierzu wird zunächst die Anwendungsdomäne der Simulation, die SC, definiert. Dabei werden unterschiedliche Definitionen vorgestellt und miteinander verglichen, um einen Überblick über die zu modellierenden Anforderungen eines SC-Systems zu erhalten. Weiter werden Grundlagen der Simulation erläutert, um den Prozess der Modellierung und deren Zusammenhang mit der V&V herauszustellen. Zudem werden mögliche Arten der Modellbildung in der Simulation von SCs vorgestellt, um eine Verbindung zwischen den zwei zuvor beschriebenen Themengebieten herzustellen.

### 2.1 Grundlagen der Supply Chain

Das APICS Dictionary (Blackstone 2010, 148) definiert eine SC folgendermaßen: „The global network used to deliver products and services from raw materials to end customers through an engineered flow of information, physical distribution, and cash.“ Demzufolge werden in einer SC nicht nur die Informations-, Waren- und Geldflüsse vom Rohmaterial bis zur Herstellung eines Produktes zusammengefasst, sondern auch darüber hinaus bis zum Endverbraucher. Durch eine SC wird somit ein Netzwerk zwischen unterschiedlichen Herstellern und Dienstleistern aufgespannt. Chopra und Meindl (2004, 4) definieren hierzu eine SC folgendermaßen: „A supply chain consists of all parties involved, directly or indirectly, in fulfilling a customer request.“ Aus dieser Definition geht hervor, dass eine SC erst durch die Nachfrage des Verbrauchers entsteht. Mit der Einbeziehung von auch indirekt beteiligten Parteien gehen Chopra und Meindl (2004) weiter als in der Definition von Mentzer et al. (2001), da dort nur direkt involvierte Entitäten zur SC gezählt werden. Die Definition nach Mentzer et al., 4 (2001, 4) lautet: „... a supply chain is defined as a set of three or more entities (organizations or individuals) directly involved in the upstream and downstream flows of products, services, finances, and/or information from a source to a customer.“ Diese Definition erweitert die SC um den Aspekt der möglichen Flussrichtungen. So werden auch Prozesse entgegen der Wertsteigerungsrichtung betrachtet. Je nach Definition sind unterschiedliche Mindestanforderung an die Anzahl

und Art der involvierten Elemente notwendig, um eine SC aufzuspannen. So können Elemente unterschiedliche Unternehmen (Mentzer et al. 2001, Stadtler et al. 2015), Einzelpersonen (Mentzer et al. 2001) oder auch Wertsteigerungsstufen (Günther und Tempelmeier 2003) sein. Als Minimalelementanzahl findet man unter anderem zwei (Stadtler et al. 2015) oder drei (Mentzer et al. 2001). Den unterschiedlichen Definitionen bezüglich einer SC lässt sich entnehmen, dass die Entscheidungen eines einzelnen Unternehmens bzw. eines einzelnen Elements in der SC direkten oder indirekten Einfluss auf andere Entitäten hat. Aus diesem Grund müssen Entscheidungen nicht nur unter Berücksichtigung von internen, sondern auch von externen Auswirkungen getroffen werden. Die Komplexität solcher Entscheidungen wird durch die teils heterogenen Interessenslagen der unterschiedlichen involvierten Parteien erhöht (Werner 2008), sodass ein SC-Management notwendig wird. Als Hilfsmittel zur Abwägung komplexer Entscheidungen können Simulationen dienen (Kleijnen 2005, Law 2015).

In der deutschsprachigen Literatur finden sich unterschiedliche Übersetzungen für SC. Ein Beispiel dafür ist der Begriff Logistikketten (Arnold et al. 2008). Arnold et al. (2008, 160) beschreiben Logistikketten folgendermaßen: „In betrieblichen Logistikketten spiegeln sich die Zusammenhänge des Material- und Güterflusses im Beschaffungs-, Produktions- und Vertriebsbereich von Unternehmen wider“. Dabei fällt auf, dass nur Teilaspekte der zuvor beschriebenen Eigenschaften einer SC beschrieben werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Definition einer SC nach Chopra und Meindl (2004) zugrunde gelegt, da diese alle direkt und indirekt beteiligten Parteien einschließt und somit eine SC allumfassend abbildet. Zudem sollten immer die unterschiedlichen abzubildenden Flüsse wie Informations-, Waren- und Geldflüsse berücksichtigt werden.

## 2.2 Grundlagen der Simulation

Unter Simulation versteht man nach der VDI-Richtlinie Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen (VDI 3633) das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Somit wird für die Simulation ein Modell entwickelt, das die Wirklichkeit abstrakt abbildet, um mit dessen Hilfe Rückschlüsse auf die Wirklichkeit zu ziehen. Durch eine Simulation können zum Beispiel Fra-

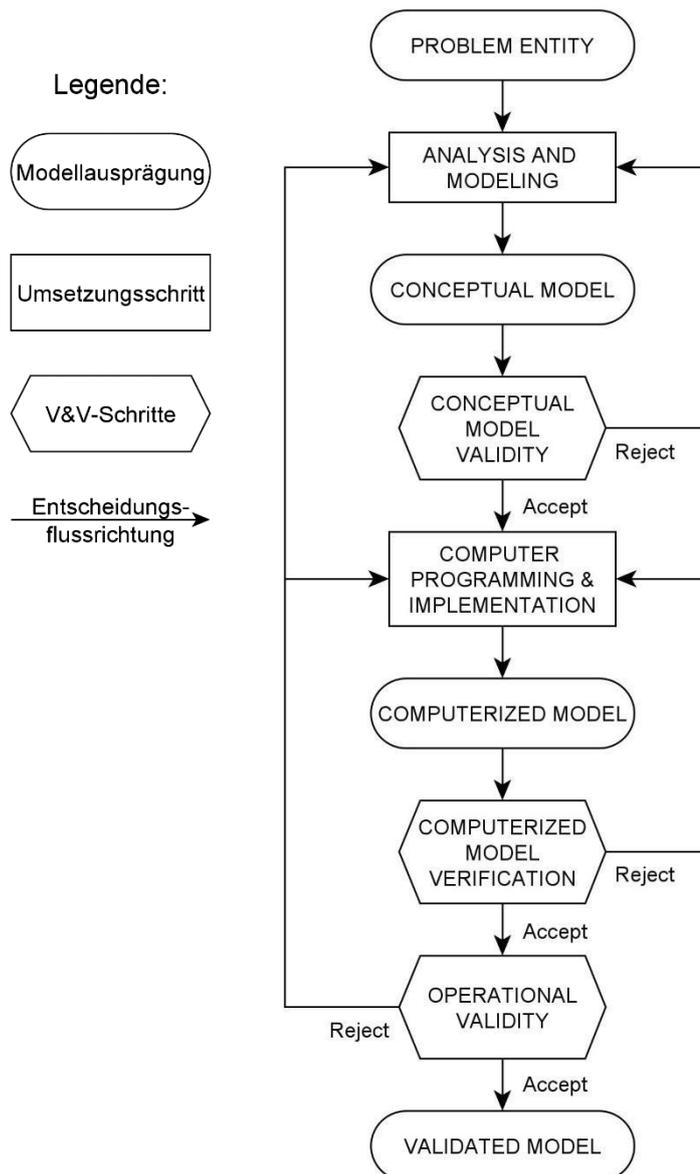


Abbildung 1: Modellentwicklungsprozess nach Sargent 2013

gen bezüglich der Umsetzbarkeit eines Prozesses oder der finanziellen Sinnhaftigkeit untersucht werden (Blackstone 2010). Unter dem hierfür notwendigem Modell versteht man eine „Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ (VDI 3633). Dabei wird unter einem System „Eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen [verstanden], die miteinander in Beziehung stehen“ (VDI 3633). Ein (real) existierendes System, wie zum Beispiel eine SC, kann durch ein Computerprogramm abgebildet werden. Das Computerprogramm bildet in diesem Fall dann das Modell. Dabei ist die Entwicklung eines Modells ein eigenständiger Prozess (Maria 1997, Sargent 2013). Sargent (2013) stellt heraus, dass es sich bei Simulationsmodellen um Strukturmodelle

handelt, die logische und kausale Beziehungen des Systems abbilden. Dadurch grenzt er Strukturmodelle von empirischen Modellen ab, die rein basierend auf Daten gebildet werden, wie zum Beispiel Regressionsmodelle, und somit nicht auf reinem Systemverständnis beruhen (Sargent 2013). Modelle sollten stets für eine bestimmte Aufgabenstellung erstellt werden (Law 2008, Sargent et al. 2016). Je nach Anwendungsbereich müssen andere Charakteristika modelliert und verknüpft werden (Blackstone 2010). So müssen beispielsweise bei Finite-Elemente-Simulationen bestimmte Kristallstrukturen nachgebildet werden, wohingegen bei der Simulation von SCs unterschiedliche Maschinen oder Produktionsstandorte modelliert werden. Ein mögliches Vorgehen zur Modellbildung ist in Abbildung 1 in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Dabei werden in der Darstellung drei unterschiedliche Elemente verwendet. Die unterschiedlichen Ausprägungen des Modells werden durch Ellipsen symbolisiert. Umsetzungsschritte werden durch Rechtecke gekennzeichnet. V&V-Schritte werden durch Sechsecke abgebildet. Die Entwicklung des Modells erfolgt nach Maßgabe der Pfeile durch die Abfolge der einzelnen Elemente. Es ist zwischen Pfeilen ausgehend von Modell- sowie Umsetzungselementen und Pfeilen ausgehend von V&V-Elementen zu unterscheiden. Hierbei folgt das nächste Ablaufelement zwangsläufig auf Modell- und Umsetzungselemente. Bei V&V-Elementen muss hingegen auf die angegebene Weise überprüft werden, ob die jeweiligen V&V-Anforderungen ausreichend erfüllt wurden. Basierend auf den Ergebnissen dieser Auswertung wird der Prozess weiter fortgeführt. Dabei wird deutlich, dass während einer Modellierung unterschiedliche Phasen durchlaufen werden. Die Modellelemente bilden das Grundgerüst des Vorgehens. Nach einer Analyse der Problemstellung wird ein konzeptionelles und anschließend ein computergestütztes Modell erstellt. Ein konzeptionelles Modell ist nach Robinson (2004, 65) „... a non-software-specific description of the simulation model that is to be developed, describing the objectives, inputs, outputs, content, assumptions and simplifications of the model“. Die dadurch ermittelten Zusammenhänge werden dann durch Programmierung in ein computergestütztes Modell übertragen (Rabe et al. 2008). Zum Schluss entsteht ein validiertes und betriebsfähiges Modell, das somit für Simulationen genutzt werden kann. Bei der Entwicklung eines (validierten) Modells handelt es sich um einen iterativen Prozess. Der iterative Charakter des Vorgehensprozesses wird insbesondere durch die V&V-Elemente erzeugt. Die V&V-Elemente entscheiden darüber, ob der Entwicklungsprozess in der nächsten Ebene fortgeführt wird oder ein vorheriger Schritt erneut durchgeführt werden muss, um eine korrekte Umsetzung der Problemstellung in ein validiertes und betriebsfähiges Modell zu gewährleisten.

Unter Verifikation versteht man dabei den Prozess der Bestätigung, dass die Genauigkeit der Abbildung des Systems durch das Modells erhalten bleibt, wenn das Modell von einer in die andere Form überführt wird (Allen et al. 2005). Somit beschäftigt sich Verifikation mit der Frage, ob ein Modell richtig gebildet wurde (Rabe et al. 2008). Unter Validierung versteht man die Untersuchung, ob ein Modell ein reales bzw. zu untersuchendes System hinreichend gut approximiert (Allen et al. 2005). Dies kann durch die Frage, ob das richtige Modell gebildet wurde, zusammengefasst werden (Rabe et al. 2008).

V&V ist ein wichtiger Prozess, der nicht nur einmalig angewendet werden sollte, sondern kontinuierlich während des gesamten Simulationsprojektes (Wenzel et al. 2008, Brade 2000, Sargent und Balci 2017). Unter dem gesamten Simulationsprojekt versteht man neben der Modellerstellung unter anderem auch das Durchführen von Simulationsexperimenten. Ein Simulationsexperiment ist die „Gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation“ (VDI 3633, 3). Ein Simulationslauf ist dabei als Durchlaufen des Modells mit spezifischen Werten über einen bestimmten Simulationszeitraum zu verstehen, wobei für die Fragestellung relevante Modellvariablen erfasst und gegebenenfalls ausgewertet werden (VDI 3633).

Die zuvor beschriebene kontinuierliche V&V während des gesamten Simulationsprojektes spiegelt sich auch im Vorgehensmodell von Brade (2000) wider (vgl. Abbildung 2). Das Schaubild illustriert den steigenden Aufwand von V&V im Verlauf der Modellentwicklung. Hierbei werden unterschiedliche Modell- und Simulationsentwicklungsphasen unterschieden sowie die Zwischenergebnisse der jeweiligen Phasen. Aus der Graphik zur Darstellung der V&V-Phasen und Subphasen nach Brade (2000) (vgl. Abbildung 2) geht hervor, dass für unterschiedliche Phasen in der Modellierung und Simulation unterschiedliche V&V-Techniken benötigt werden. Die gewählten Techniken müssen zu den jeweiligen Anforderungen der Entwicklungsphase passen. Durch die kontinuierliche V&V kann ein möglich auftretender Fehler besser und frühzeitiger detektiert werden (Balci 1998a). Wenn ein Test fehlschlägt, also die Anwendung einer V&V-Technik (VDI 3633) ein negatives Ergebnis liefert, muss der Fehler in einer vorherigen oder aktuellen Phase liegen. Durch die stetige V&V kann ein solcher Fehler frühzeitig erkannt werden und zieht sich nicht durch die komplette Modellierung und Simulation hindurch. Dies spart Zeit und Geld und erhöht die Vertrauenswürdigkeit der Simulation (Brade 2000).

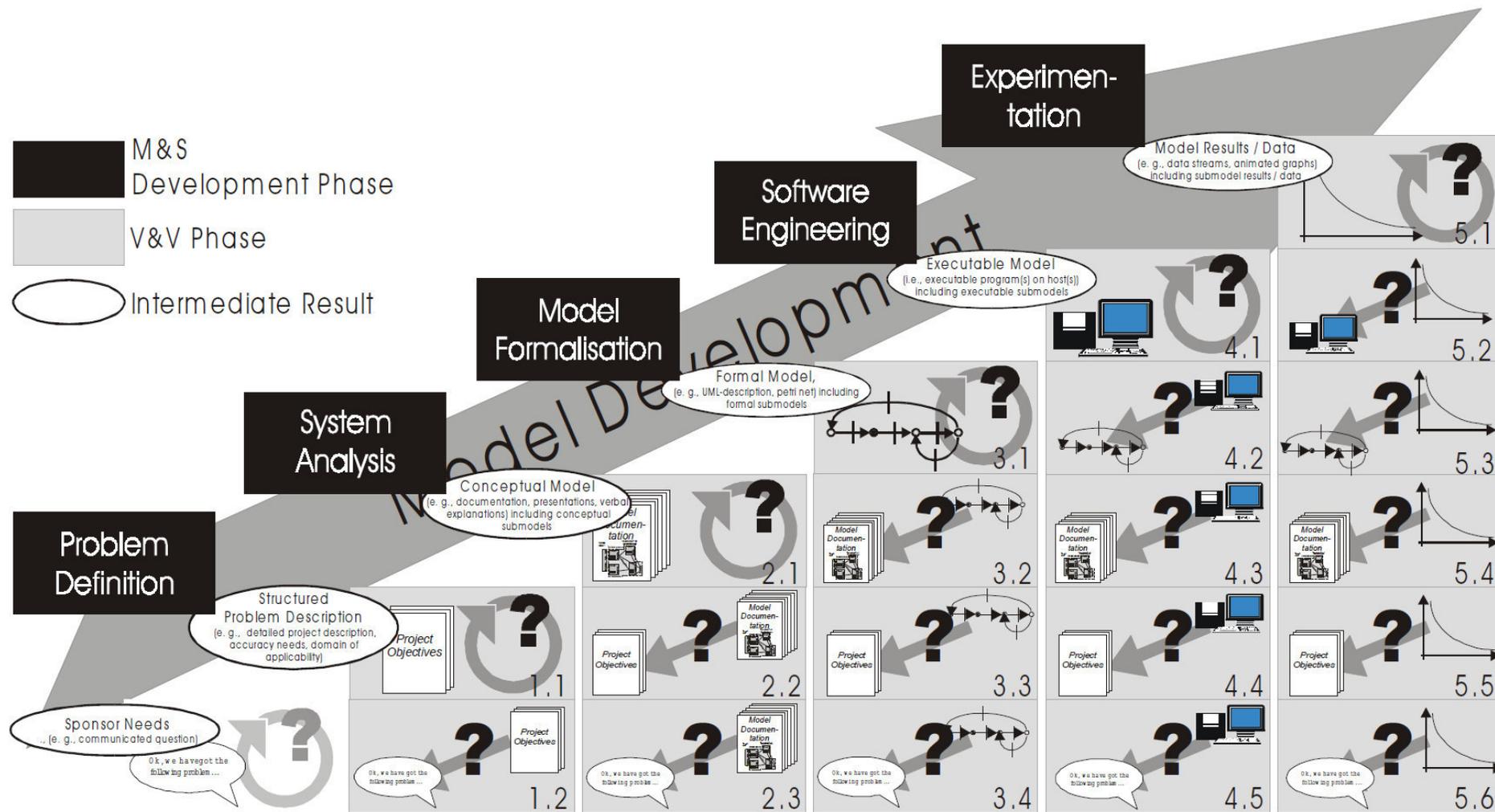


Abbildung 2: V&V Phasen und Subphasen (Brade 2000)

Je weiter der Entwicklungsprozess fortschreitet, desto komplexer gestaltet sich die V&V. Dies wird durch die steigende Anzahl an Subphasen in Abbildung 2 deutlich. Über die gesamte Modellierung werden V&V-Techniken angewendet. Dabei werden zwei Kategorien unterschieden. Zum einen werden die aktuellen Ergebnisse einer Entwicklungsphase gegen die vorangegangenen Ergebnisse, zum anderen intrinsisch abgeglichen.

Bei den zwei vorgestellten Vorgehensmodellen lassen sich Ähnlichkeiten zwischen dem Modellentwicklungsprozess nach Sargent (2013) (vgl. Abbildung 1) und den Entwicklungsphasen nach Brade (2000) (vgl. Abbildung 2) feststellen. Beide vorgestellten Vorgehensweisen gehen von einem iterativen Prozess aus. Bei beiden Darstellungen startet der Prozess mit dem zu untersuchenden Problem, der Problemdefinition (vgl. Brade 2000) bzw. Problementität (vgl. Sargent 2013). Anschließend folgt die Analyse des zugrundeliegenden Problems, aus der das konzeptionelle Modell folgt. Nachfolgend weichen die beiden Prozessdarstellungen voneinander ab. Bei Sargent (2013) folgt die Validierung des konzeptionellen Modells und die Programmierung des computergesteuerten Modells. Bei Brade (2000) wird hingegen eine Formalisierung des Modells vorgenommen, woraus das formale Modell folgt. Erst dann wird mittels Softwareentwicklung die Programmierung vorgenommen. Das daraus resultierende Modell ist bereits das ausführbare bzw. betriebsfähige Modell. Auch bei Sargent (2013) folgt nach dem programmierten Modell nach der V&V das ausführbare Modell, das sogenannte validierte Modell. Brade (2000) geht bei seiner Betrachtung noch einen Schritt weiter, da auch noch das Experimentieren und die Modell-Resultate von der V&V begleitet werden.

Dabei wird in Abbildung 1 nach Sargent (2013) expliziter herausgestellt, dass die Ergebnisse der V&V über den weiteren Verlauf der Entwicklung entscheiden. Bei Brade (2000) wird jedoch betont, dass die V&V bei fortschreitendem Entwicklungsverlauf an Komplexität und Aufwand zunimmt. Bei Sargent (2013) werden alle V&V-Abläufe in einem Block zusammengefasst und lediglich zwischen konzeptioneller Model-Validität, computergesteuerten Model-Verifikation und operationeller Validität differenziert. Brade (2000) arbeitet hingegen mit unterschiedlichen Symbolen für verschiedene V&V-Ziele. Er unterscheidet dabei zwischen dem Abgleich einzelner Entwicklungsschritte gegeneinander und einem intrinsischen Abgleich.

Rabe et al. (2008) listen exemplarisch Fragen auf, die für jede V&V-Subphase beantwortet werden sollten. Beispielsweise ist beim konzeptionellen Modell intrinsisch die Frage zu beantworten „Sind die Schnittstellen der Teilmodelle mit denen der übergeordneten

Modelle konsistent?“ (Rabe et al. 2008, 225). Der Umfang dieses Fragenkatalogs spiegelt die umfassende Bedeutung der V&V im Modellentwicklungsprozess wider. Zudem werden die sich wandelnden Ansprüche an V&V-Techniken im Verlauf der Modellierung deutlich.

## 2.3 Modellbildung in der Simulation von Supply Chains

Unterschiedliche Sachverhalte, Zusammenhänge und Auswertungsziele lassen sich unterschiedlich gut mit verschiedenen Modelltypen abbilden. Aus diesem Grund werden im Folgenden kurz unterschiedliche Modellarten angesprochen und im Hinblick auf ihre Eignung zur Modellbildung erläutert.

Modelle lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien einordnen. Zunächst kann zwischen statischen und dynamischen Modellen unterschieden werden (Law 2015). Dabei hat eine zeitliche Komponente keinen Einfluss auf ein statisches Modell, wohingegen ein dynamisches Modell zeitabhängig ist (Law 2015). Bei der Simulation von SCs spielt der zeitliche Verlauf eine entscheidende Rolle. Dementsprechend handelt es sich bei Modellen zur Simulation von SCs um dynamische Modelle. Weiter kann zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterschieden werden (Law 2015). Unter einem deterministischen Modell versteht man ein Modell, das keinen probabilistischen Effekten unterworfen ist, wie zum Beispiel dem Zufall (Law 2015). Dem gegenüber steht das stochastische Modell. Diese Modellart berücksichtigt auch zufällige Einflüsse (Law 2015). Ein solches Modell ist besser für die Abbildung einer SC geeignet, da auch unvorhersehbare, zufällige Einflüsse, wie zum Beispiel die Nachfrage oder die Preisentwicklung, und deren Auswirkungen durch eine Simulation untersucht werden sollen (Law 2015). Zuletzt kann noch zwischen kontinuierlichen, diskreten und aus diskreten und kontinuierlichen Merkmalen kombinierten Modellen (Banks 1998) unterschieden werden. Bei diskreten Modellen ändern sich die Modellvariablen zu bestimmten Zeitpunkten, den event times (Banks 1998). Bei kontinuierlichen Modellen sind Variablen kontinuierliche Funktionen der Zeit (Banks 1998). Kontinuierliche Modelle benötigen also Gleichungen in Abhängigkeit von einer bekannten Variablen zum Beispiel der vorgegebenen Zeit. Eine Kombination aus diskreten und kontinuierlichen Eigenschaften von Variablen ist in einem Modell möglich (Lee et al. 2002). Ob ein System kontinuierlich oder diskret modelliert wird, hängt vor allem mit dem Untersuchungszweck der Simulation zusammen (Law 2015). In der Simulation von SC werden vor allem ereignisdiskrete Modelle verwendet

(Kuhn und Rabe 1998, Lee et al. 2002) und somit auch ereignisdiskrete Simulation (Discrete-Event Simulation, DES). Darunter versteht man eine Simulation, in der sich die Variablen des Systems bzw. der dadurch abgebildete Zustand des Systems bei bestimmten Ereignissen ändern kann (Law 2015).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Simulation von SCs vorwiegend dynamische, stochastische und diskrete Modelle verwendet werden, sodass eine DES durchgeführt werden kann. Kontinuierliche sowie zeitgesteuerte Simulationsansätze spielen in der Simulation von Logistikprozessen eine untergeordnete Rolle (Arnold et al. 2008).

### 3. Verifikations- und Validierungstechniken unter Berücksichtigung der Grundlagen zur Modellbildung

Im folgenden Kapitel werden Aspekte der V&V genauer erläutert. Darüber hinaus werden unterschiedliche V&V-Techniken vorgestellt und dargelegt. Zudem werden aus der Literatur bekannt Gruppierungsansätze für V&V-Techniken näher beschrieben.

#### 3.1 Verifikations- und Validierungstechniken

Das Grundkonzept der V&V stammt aus der Softwareentwicklung (Banks 1998). Dabei steht die Qualitätskontrolle des erstellten Programmcodes im Vordergrund (Kumar und Syed 2011, Wallace und Fujii 1989). Es werden unter anderem Qualitätsmerkmale wie Vertrauenswürdigkeit, Nutzbarkeit, Sicherheit, Effizienz und Kompatibilität untersucht (Kumar und Syed 2011). Um dies zu ermöglichen, reicht es nicht aus, eine einzelne V&V-Technik anzuwenden, vielmehr ist ein auf das Projekt abgestimmtes Set an Techniken anzuwenden (U. S. National Bureau of Standards 1983).

Die Anwendung der Techniken zur V&V erfolgt über die gesamte Entwicklung des Programms (Wallace und Fujii 1989). Diese Charakteristik der V&V in der Softwareentwicklung lässt sich auch auf die V&V in der Modellierung übertragen (Rabe et al. 2008). Beispielsweise bestätigt ein technischer Bericht aus dem Jahr 1981 von Air Force's Rome (N.Y.) Air Development Center (Radatz 1981), dass durch V&V effektiv Fehler in Programmierungen gefunden und behoben werden können, sodass eine größere Vertrauenswürdigkeit und Qualität des entwickelten Programms entsteht.

V&V-Techniken bieten die Möglichkeit unterschiedliche Aspekte der V&V zu überprüfen. Dafür können V&V-Techniken aus der Softwareentwicklung genutzt werden (Balci 1997). Diese werden allerdings durch einige auf Modellierung zugeschnittene Aspekte ergänzt. Eine Auflistung vieler gängiger Techniken findet sich bei Balci (1998b). Auch Rabe et al. listen eine Reihe praktikabler Techniken auf, die insbesondere für Simulationen in der Logistik geeignet sind (Rabe et al. 2008). Diese Zusammenstellung stellt eine

Untermenge der von Balci vorgestellten Techniken dar. Dabei werden allerdings nur solche Techniken betrachtet, die Merkmale für die Simulation in der Logistik aufweisen (Rabe et al. 2008).

### 3.2 Vorstellung ausgewählter Verifikations- und Validierungstechniken

Im folgenden Abschnitt werden beispielhaft einzelne gängige V&V-Techniken vorgestellt und kurz erläutert.

Das **Audit** ist eine häufig verwendete Managementtechnik (Rabe et al. 2008). Bei einem Audit wird überprüft, inwieweit eine Simulation Pläne, Prozeduren, Standards und Richtlinien erfüllt, sodass eine bessere Nachvollziehbarkeit der Entwicklung des Projektes erreicht wird (Balci 1998b). Dadurch ist es möglich, die bei regelmäßigem Durchführen eines Audits entdeckten Fehler zur Ursache zurückzuverfolgen (Balci 1998b, Hollocker 1987). Audits werden hierbei von sogenannten Auditoren durchgeführt (EN ISO 19011). Dabei gehört die Durchführung der Audits zum Aufgabenbereich des Entwicklerteams und dient unter anderem der Information des Managements (Perry 2006).

Wie der Name erklärt, werden bei einem **Ursache-Wirkungsgraph** (Cause-Effect Graph) Ursachen (Input) und die daraus resultierenden Wirkungen (Output) aufgetragen, der die logischen Zusammenhänge der Größen darstellt (Rabe et al. 2008). Dabei können die beiden Größen Ursache und Wirkung immer nur die Werte wahr und falsch annehmen, sie sind also binär (Rabe et al. 2008). Der Zusammenhang zwischen möglichen Ursache-Wirkungs-Kombinationen wird zunächst am realen System ermittelt (Balci 1998b). Der Umfang der zu untersuchenden Effekte ist stark vom Wissen und der Erfahrung des Erstellenden mit dem realen System abhängig (Rabe et al. 2008). Sind möglichst viele Ursache-Wirkungspaare gefunden, werden diese auch für das Modell untersucht, das dieselben Ergebnisse liefern sollte. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Ursache-Wirkungsgraph für ein Gesamtmodell häufig unübersichtlich wird, sodass eine Anwendung besser auf Teilsegmente erfolgt (Whitner und Balci 1989). Aus dem Ursache-Wirkungsgraphen lassen sich Entscheidungstabellen generieren und aus diesen lassen sich wiederum Testfälle ableiten (Rabe et al. 2008).

Der **Schreibtischtest** (Desk Checking) dient der Überprüfung der eigenen Arbeit (Rabe et al. 2008). Dabei werden Aspekte wie Richtigkeit, Vollständigkeit, Konsistenz und

Exaktheit überprüft (Balci 1998b). Weitere Elemente des Schreibtischtests sollten unter anderem Syntax-Überprüfung, Konventionsverletzungsprüfung, ein detaillierter Vergleich mit den Spezifikationen, Durchgehen des Programmiercodes (so weit schon vorhanden), und eine Flussdiagramm-Überprüfung sein (Balci 1998b). Allerdings ist eine kritische Untersuchung der eigenen Arbeit oft schwierig, da eigene Fehler häufig übersehen werden. Dementsprechend sollte der Schreibtischtest immer mit anderen V&V-Techniken kombiniert werden (Rabe et al. 2008).

Bei der **Validierung im Dialog** (Face Validation) diskutieren Fachexperten für das reale System und Modellentwickler die Ergebnisse der jeweiligen Entwicklungsphase, um zu ermitteln, ob diese als erfolgreich und gültig angesehen werden kann (Rabe et al. 2008). Balci (1998b) erweitert die beteiligte Gruppe, sodass das Projektteam, potenzielle Modellnutzer und Experten für das (reale) System involviert sind. Die Diversität der teilnehmenden Personen, beispielsweise ihren Wissenshintergrund und Blickwinkel betreffend, bietet die Möglichkeit Unstimmigkeiten in der Modellierung zu entdecken (Rabe et al. 2008). Allerdings ist gleichzeitig darauf zu achten, dass die in den Unterlagen verwendete Terminologie für alle verständlich ist (Carson 2002). Die hierfür notwendige Aufbereitung und Erläuterung des Vorgehens durch die Modellentwickler beinhaltet einen großen Teil der Validierung, da in diesem Prozess bereits Strukturen hinterfragt werden (Rabe et al. 2008).

Bei der Verwendung der Technik **Invalid Input Testing** wird ein Modell mit ungültigen Input-Daten ausgeführt (Balci 1998b). Die Auswertung der daraus resultierenden Ergebnisse, gibt Aufschluss darüber, wie das Modell mit falschen Eingaben umgeht. Reagiert das Modell nicht wie erwartet, kann dies Aufschluss über Modellrepräsentationsfehler liefern (Balci 1998b).

Bei der Technik **Validierung mit Hilfe von Vorhersagen** (Predictive Validation) werden mit Hilfe des Modells Vorhersagen bezüglich des Verhaltens des Systems getroffen. Anschließend werden diese Vorhersagen mit dem wirklichen Verhalten des Systems abgeglichen (Sargent 2000). Dazu können alte System Daten als Modell-Input-Daten verwendet werden, für die die zugehörigen Ausgangsdaten des Systems bekannt sind (Balci 1998b).

Bei der **Begutachtung** (Review) überprüfen Auftraggeber- und Auftragnehmerseite, ob die Entwicklung des Modells und der Simulationsstudie in die geforderte Richtung verläuft (Rabe et al. 2008). Bei einer Begutachtung wird besonderer Wert auf die Gesamtentwicklung des Modells und dessen Qualität gelegt und nur ein geringerer Schwerpunkt auf detaillierte Umsetzung (Balci 1998b). Dabei wird unter anderem kontrolliert, ob Entwicklungsstandards, Richtlinien und Spezifikationen eingehalten werden (Balci 1998b). Eine Voraussetzung zur Anwendung dieser Technik ist ein ausreichender Wissenstand der Beteiligten, damit eine qualifizierte Bewertung und Einordnung der bisherigen Ergebnisse erfolgen kann (Rabe et al. 2008). Hilfreich kann in diesem Zusammenhang der Schreibtischtest als Vorbereitung auf die Begutachtung sein (Rabe et al. 2008). Eine Bewertung der Ergebnisse kann anhand eines vorher definierten Bewertungskatalogs erfolgen (Balci 1998b).

Die **Sensitivitätsanalyse** (Sensitivity Analysis) untersucht die Auswirkung von Änderungen einzelner Parameter auf die Ausgabeparameter eines Modells. Die Ergebnisse der Parametervariationen sollten qualitativ mit den Erkenntnissen aus den Beobachtungen des realen Systems übereinstimmen (Rabe et al. 2008). Unerwartete Effekte können ein Hinweis auf Invalidität sein (Balci 1998b). Allerdings müssen bei Parametervariationen auch immer Synergie- und andere Wechselwirkungseffekte berücksichtigt werden (Law 2019). Durch die Sensitivitätsanalyse lassen sich sogenannte „sensitive Parameter“ ermitteln (Rabe et al. 2008). Auch nur eine kleine Veränderung solcher Parameter hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisparameter (Rabe et al. 2008).

Bei der Anwendung von **statistischen Techniken** zur V&V werden insbesondere die Output-Daten der Simulation mit den Output-Daten des real existierenden Systems verglichen (Balci 1998b). Dabei bildet der Name „statistische Technik“ einen Sammelbegriff für Techniken wie beispielsweise Faktor-, Regressions- und Varianz-Analyse (Balci 1998b). Bei der Anwendung von statistischen Techniken können zwei Haupteinsatzzwecke identifiziert werden. Zum einen die Überprüfung der „Gültigkeit von im Modell verwendeten Verteilungen für Eingabegrößen“ und „der Bewertung, mit welcher Sicherheit die Ausgabegrößen eines ausführbaren Modells das Verhalten des realen Systems beschreiben“ (Rabe et al. 2008, 103). Dabei stellt Balci (1998b) heraus, dass das betrachtete System für viele gängige statistische Techniken komplett beobachtbar sein muss.

Beim **Turing Test** wird von Experten versucht, Ergebnisse des realen Systems von den Ergebnissen des Modells zu unterscheiden, die auf Basis der gleichen Input-Daten erzeugt

wurden (Rabe et al. 2008). Experten sind dabei Fachleute für das reale System (Balci 1998b). Ein Modell besteht den Test, falls der Experte nicht eindeutig zwischen Modell-ergebnissen und den Ergebnissen des realen Systems unterschieden kann (Balci 1998b). Schruben (1980) liefert eine Einordnung, ab welcher Trefferquote keine eindeutige Unterscheidung mehr gegeben ist. Damit der Test durchgeführt werden kann, müssen die Ergebnisse des Modells und des realen Systems angepasst werden. Dadurch soll beispielsweise vermieden werden, dass allein durch die Darstellung oder den Umfang der Daten ersichtlich ist, woher die Ergebnisse stammen (Rabe et al. 2008).

### 3.3 Vorstellung von Gruppierungsansätzen von Verifikations- und Validierungstechniken aus der Literatur

In der Literatur werden unterschiedliche Gruppierungsansätze für V&V-Techniken vorgestellt. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Ansätze erläutert.

Zunächst wird eine Unterteilung nach Balci vorgestellt. Hierbei wird sich auf den Beitrag „Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models“ zur Winter Simulation Conference 1997 bezogen sowie auf den Beitrag Balcis (1998b) in „Verification, Validation, and Testing“ in „Handbook of Simulation“. Balci schlägt eine Unterteilung in die Kategorien Informal (informelle), Static (statisch), Dynamic (dynamisch) und Formal (formal) vor. Er bezieht sich auf die V&V von konventionellen Simulationsmodellen, also nicht auf objektorientierte Simulationsmodelle. Unterschiede zwischen den einzelnen Kategorien liegen vor allem in ihrem Abstraktionsgrad. Während informelle Techniken tendenziell subjektiver sind, beruhen formelle Techniken auf einem mathematischen Beweis der Korrektheit und sind somit objektiv. Informelle Techniken gehören zu den am häufigsten genutzten Techniken. Dabei bezieht sich die Bezeichnung informell darauf, dass die Bewertung der Ausgaben der Techniken auf persönlichen Einschätzungen beruht, wobei strukturierte Vorgehensweisen und Leitfäden zu befolgen sind. Zu den informellen Techniken zählen laut Balci beispielsweise das Audit, der Schreibtischtest, Begutachtungen und Validierung im Dialog. Der Ursache-Wirkungsgraph gehört laut Balci zu den statischen Techniken. Statische Techniken werden auf das statische Modelldesign und den Programmcode angewendet. Bei statischen Techniken muss das Modell dementsprechend nicht real ausgeführt werden. Die Durchführung erfolgt theoretisch. Weiter

stellt Balci heraus, dass Techniken dieser Kategorie sehr beliebt sind und häufig genutzt werden. Als eine dritte Gruppe von Techniken stellt Balci die dynamischen V&V-Techniken vor. Im Gegensatz zu den statischen Techniken ist hier eine Ausführung des Modells notwendig. Dabei ist bei vielen Techniken eine sogenannte „model instrumentation“ notwendig. Darunter versteht man das Einbringen von zusätzlichem Programmcode in das ausführbare Modell. Die Durchführung von V&V mittels dynamischer V&V-Techniken lässt sich in drei Hauptschritte unterteilen: das Einbringen des zusätzlichen Codes, das Ausführen des Modells einschließlich des Sammelns von Informationen, sowie die Auswertung der gesammelten Informationen. Zu den dynamischen Techniken zählen unter anderem das Invalid Input Testing und die Sensitivitätsanalyse. Als letzte Einteilung nennt Balci die formalen Techniken. Diese beruhen auf einem mathematischen Beweis der Richtigkeit. Damit gehören diese Techniken zu den effektivsten V&V-Techniken, da die Korrektheit der Anwendung bewiesen wird und das Ergebnis somit vollkommen vertrauenswürdig ist. Allerdings ist die Anwendung solcher Techniken für in der Simulation verwendete Modelle aufgrund ihrer Komplexität kaum möglich. Es ist jedoch möglich auf Basis der formalen Techniken neue V&V-Techniken zu entwickeln.

Eine ähnliche Einordnung wird auch von Rabe et al. (2008) vorgestellt. Der Grad der Subjektivität einer Technik wird zwischen sehr hoch bis weniger hoch bzw. niedrig bewertet. Dabei werden von Rabe et al. den ausgewählten Techniken ein Bereich auf dieser Skala zugeordnet. Rabe et al. (2008) teilen V&V-Techniken weiter nach ihren Anwendungsmöglichkeiten während des Modelentwicklungprozesses ein. Im Folgenden wird dieses Vorgehen basierend auf dem Buch „Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik“ (2008) näher erläutert. Rabe et al. ordnen die Techniken verschiedenen Phasenergebnissen des Modellierungsprozesses zu. Dabei werden folgende Phasenergebnisse verwendet: Zielbeschreibung, Aufgabenspezifikation, Konzeptmodell, formales Modell, ausführbares Modell, Simulationsergebnisse, Rohdaten und aufbereitete Daten. Hierbei lassen sich Ähnlichkeiten zu dem Modell nach Brade (2000) feststellen (vgl. Abschnitt 2.2). Bei Rabe et al. wird deutlich, dass einige Techniken wie beispielsweise die Begutachtung im gesamten Verlauf der Simulationsstudie verwendet werden können, wohingegen Techniken wie der Turing-Test nur auf einzelne Phasenergebnisse anwendbar sind. Rabe et al. stellen im Zusammenhang mit den Phasenergebnissen heraus, dass sich die genannten Ergebnisse immer aus mehreren Teilergebnissen, die jeweils einzeln verifiziert und validiert werden müssen, zusammensetzen.

Ähnlich wie Rabe et al. kategorisiert auch Balci in seinem Beitrag zur Winter Simulation Conference 1998a „Verification, Validation, and Accreditation“ V&V-Techniken nach ihren Anwendungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Stufen des Modellierungs- und Simulationslebenszyklus. Auf diesen Beitrag wird sich im Folgenden bezogen. Dabei stellt Balci heraus, dass eine solche Einteilung nur einen groben Überblick gibt, da auch V&V-Techniken in den Zwischenschritten der Modellierung und Simulation angewendet werden müssen. Für die Auswahl einer geeigneten Technik für eine bestimmte Stufe schlägt Balci vier Gebiete vor, die beachtet werden sollten: der Modelltyp, der Simulationstyp, die Problemdomäne und Modellierungs- und Simulationsziele. In seinem Paper ordnet Balci 77 Techniken unterschiedlichen Stufen zu. Dabei unterscheidet er zwischen zwei Modellierungs- und Simulations-Lebenszyklen, zum einem wird das vom Department of Defense vorgeschlagene Vorgehen von 1996 betrachtet und zum anderen der von Balci entwickelte Lebenszyklus der Modellierung und Simulation (Balci 1998b).

Wang (2013) legt ein besonderes Augenmerk auf die Kosten und Anwendbarkeit von V&V-Techniken. Dabei werden die zwei Hauptkategorien Kosten und Anwendbarkeit nochmals in Unterbewertungskategorien unterteilt, sogenannte Attribute. Dazu zählen in der Kategorie Anwendbarkeit die V&V-Aktivität, das zu untersuchende Objekt, Defizit-typen, Entwicklungsparadigma, Modellierungsformalismus, Simulationstyp, Simulations-sprache, Beobachtbarkeit des Systems, Grad der benötigten Modelausführbarkeit, Modalität und Abhängigkeiten. Im Bereich der Kosten gibt es folgende Attribute: Daten-qualitätslevel, Formalitätslevel, Verständlichkeit, Human Resources, Typ der Anwen-dung, Teilnehmer, Wissensstand und benötigte Erfahrung. Dabei wird deutlich, dass die bereits vorgestellten Kategorisierungsansätze in Form von Bewertung der Subjektivität bzw. Objektivität und Anwendbarkeit der Techniken im Verlauf der Modellierung und Simulation aufgegriffen werden. Der Grad der Subjektivität fällt unter das Anwendbar-keitsattribut Modalität. Die unterschiedlichen Aspekte der Anwendbarkeit von V&V-Techniken im Verlauf der Modellierung und Simulation werden durch unterschiedliche Bereiche abgedeckt. Wang legt darüber hinaus einen Schwerpunkt auf die Kostenbetrach-tung, wodurch die Wirtschaftlichkeit der Simulationsanwendungen betont wird. In Bezug auf die Kosten betont Wang den Einfluss der involvierten Personen, da zum einen die notwendige Zeit, die Anzahl der Beteiligten und deren Wissensstand zu berücksichtigen ist.

## 4. Gruppierung von Verifikations- und Validierungstechniken in Bezug auf Simulation von Supply Chains

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Auswahl, der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Techniken, begründet, um anschließend aus diesen Techniken Gruppierungskriterien ableiten zu können. Hierfür werden die einzelnen Techniken hinsichtlich ihrer Charakteristika und Anforderungen analysiert. Aufbauend auf dieser Analyse werden Gruppierungskriterien abgeleitet. Anschließend werden diese Gruppierungskriterien beispielhaft auf die vorgestellten Techniken angewandt. Abschließend werden die Entwicklung und Anwendbarkeit der Gruppierungskriterien kritisch hinterfragt, sodass ein Fazit gezogen werden kann.

### 4.1 Erläuterung der Auswahlmethode

Um eine möglichst große Bandbreite an V&V-Techniken abzubilden, wurden in einem Vorauswahlprozess möglichst viele V&V-Techniken durch eine Literaturrecherche ermittelt. In der Literatur wird vor allem auf die Zusammenstellung von Techniken in Arbeiten von Balci hingewiesen (vgl. Kapitel 3). Auch Rabe et al. und Law (vgl. Kapitel 3) listen zahlreiche V&V-Techniken auf und erläutern diese. Um aus dieser Menge an Techniken einzelne auszuwählen, wurden hauptsächlich zwei Kriterien verwendet, (1) die Relevanz in der täglichen Arbeit und (2) die bereits erfolgte Einsortierung in bestehende Gruppierungen.

Die Relevanz der ausgewählten V&V-Techniken wird aus der Bewertung und Häufigkeit der Erwähnungen in Publikationen ermittelt. Als Basis dient die Auswahl an V&V-Techniken, die von Balci zusammengestellt wurden (siehe Abschnitt 3.3), da darin eine Vielzahl von praktizierten Techniken enthalten sind. Um aus dieser Hauptmenge an Techniken einzelne Techniken auszuwählen, wurden weitere Paper und die darin beschriebenen V&V-Techniken mit Balcis Auswahl verglichen. So konnte die Auswahl an Techniken weiter eingeschränkt werden.

Als zweites Kriterium wird die bereits in der Literatur erfolgte Einordnung in ein bestehendes Gruppierungsschema für V&V-Techniken verwendet (vgl. Gruppierungsansätze

in Abschnitt 3.3). Dies ermöglicht einen späteren Vergleich der in dieser Arbeit entwickelten Gruppierungskriterien mit den bereits bekannten Gruppierungsmöglichkeiten. So wird gewährleistet, dass Techniken mit unterschiedlichen Charakteristika untersucht werden, und somit ein breites Spektrum unterschiedlicher Techniken in Betracht gezogen wird.

Zudem wird die Anwendbarkeit der V&V-Techniken in der Simulation von SCs beachtet. Dabei wurde insbesondere die Sammlung von Techniken in der Zusammenstellung von Rabe et al. berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.3). Die Autoren beschreiben speziell Techniken, die für die Bewertungen in der Anwendungsdomäne V&V in der Simulation von SCs nutzbar und sinnvoll sind (vgl. Abschnitt 3.3).

## 4.2 Ableitung von Gruppierungskriterien

Um Gruppierungskriterien ableiten zu können, werden zunächst die beispielhaft ausgewählten Techniken analysiert. Durch die Analyse werden Charakteristika entdeckt. Hierzu wird der Prozess der Verwendung von V&V-Techniken in drei Bereiche unterteilt: (1) die Vorbereitung und der Input, (2) der Anwendungsprozess und (3) der Output und die Auswertung. Unter dem ersten Bereich werden bspw. die handelnden Personen und deren Wissensstand verstanden, die notwendigen Randbedingungen wie benötigte Daten und benötigter Entwicklungsstand des Modells. Der zweite Bereich umfasst unter anderem den Zeitaufwand für die Anwendung der jeweiligen Technik, die Art der notwendigen Interaktionen zwischen den Beteiligten und Automatisierungsmöglichkeiten. Der letzte Bereich betrachtet den Output und seine Interpretierbarkeit sowie notwendige Dokumentation der Technik. Zudem wird berücksichtigt, ob ein Fehler entdeckt wird und ob dieser auch lokalisiert werden kann. Dabei können die einzelnen Bereiche der Verwendung von V&V-Techniken nicht immer klar voneinander abgegrenzt werden, da sie einander beeinflussen.

Nach der Analyse der Techniken werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und geordnet. Dabei wird das Augenmerk auf wiederkehrende Voraussetzungen bzw. Anforderungen an Techniken gelegt. Zudem werden die Forderungen der Auftraggeber bzw. Anwender der Techniken erarbeitet. Aus der Kombination der benötigten Voraussetzungen für Techniken und der Ziele der Auftraggeber wird ein Entscheidungsmuster erstellt.

Im Folgenden wird die Analyse der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Techniken durchgeführt.

**Audit:** Für ein Audit sind das Modell bearbeitende Team sowie ein Auditor notwendig. Der Auditor ist speziell geschult, sodass diese Position nicht von jeder Person eingenommen werden kann. Da in einem Audit überprüft wird, inwieweit die Modellierung und Simulation Vorgaben einhält, müssen die Beteiligten auch über Wissen bezüglich Richtlinien und Anforderungen an das zu erstellende Modell verfügen, da ansonsten keine Bewertung dieser möglich ist. Dabei kann das Modell in jeder Entwicklungsphase betrachtet werden. Der benötigte Zeitaufwand richtet sich nach dem Umfang des Modells und der Anzahl der einzuhaltenden Richtlinien. Zudem muss ein Treffen für alle Beteiligten geplant und organisiert werden. Somit kann diese Technik nicht spontan angewendet werden. Durch regelmäßige Auditierung kann der Planungsaufwand verringert werden. Das Audit besitzt grundsätzlich einen subjektiven Charakter, da die Bewertung des Modells auf persönlichen Einschätzungen beruht. Durch den leitenden Auditor und die unterschiedlichen Blickwinkel der einzelnen involvierten Personen wird die Subjektivität jedoch verringert. Aufgrund der notwendigen Kommunikation zwischen den beteiligten Personen ist eine Automatisierung dieser V&V-Technik nicht möglich. Aufgrund des kommunikativen Wesens des Audits ist eine ausreichende Dokumentation von Bedeutung, beispielsweise in Form von Protokollen bei Treffen, da so unter anderem die Nachvollziehbarkeit der Bewertungen gewährleistet werden kann. Zudem werden durch die Dokumentation die verwendeten Daten festgehalten. Beim Audit werden eher strukturelle Fehler erkannt und weniger programmiertechnische. Strukturelle Fehler können durch Auditierung lokalisiert oder zumindest näher eingegrenzt werden. Die Lokalisierung von Umsetzungsfehlern bzw. Fehlern im Programmcode ist jedoch nur schwer bis gar nicht möglich.

**Ursache-Wirkungsgraph:** Die V&V mittels Ursache-Wirkungsgraphen basiert hauptsächlich auf dem Vergleich zwischen dem realen Verhalten des zu modellierenden Systems mit dem modellierten Verhalten. Daraus lässt sich schließen, dass diese Technik nur auf Systeme angewendet werden kann, die entweder schon existieren bzw. in einer vergleichbaren Ausführung existieren, da ansonsten keine Daten erhoben werden können. Zudem ist der Wissenstand und die Erfahrung des Durchführenden der V&V bezüglich des realen Systemverhaltens von großer Bedeutung, da dieser die zugrundeliegenden Ursachen-Wirkungspaare ermittelt. Weiter muss auch ein ausreichendes Verständnis für das

Verhalten des Modells vorhanden sein, um die gleichen Ursachen als Input für das Modell einzugeben und die sich daraus ergebenden Wirkungen abzulesen. Dabei kann eine Arbeitsteilung von einem Experten für das reale System und einem Experten für das zu entwickelnde Modell sinnvoll sein. Der Entwicklungsstand der Modellierung spielt eine untergeordnete Rolle, da der Ursache-Wirkungsgraph ab dem konzeptionellen Modell verwendet werden kann.

Der Zeitaufwand für diese V&V-Technik hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Der Aufwand für die Erstellung von Ursache-Wirkungsgraphen für das reale System ist zum einen abhängig von der Erfahrung des Durchführenden bei der Erstellung von aussagekräftigen Ursache-Wirkungs-Szenarien. Zum anderen spielt die Art des Systems (Wie schnell arbeitet es? Wie schnell sind die Wirkungen sichtbar) bzw. auf welche Daten bezüglich des Systemverhaltens bei bestimmten Inputwerten zurückgegriffen werden kann eine Rolle. Auf Seiten der Modellierung ist der Entwicklungsstand zu berücksichtigen. Je weiter entwickelt das Modell ist, desto automatisierter können die einzelnen Szenarien durchgespielt werden und nur die Eingabe der Input-Daten und die Auswertung der Ergebnisse müssen händisch erfolgen. Dies führt bei dieser Technik zu einer höheren Objektivität, da weniger persönliche Einschätzungen in die Bewertung einfließen. Befindet sich das Modell allerdings noch in einer Phase, in der kein Programmcode ausgeführt werden kann, müssen die Wirkungen der Ursachen von Experten für das Modell beurteilt werden. Dies bedeutet einen zusätzlichen Zeitaufwand, da in der dafür benötigten Zeitspanne keine anderen Aufgaben erledigt werden können. Zusätzlich werden die Einschätzungen deutlich subjektiver. Die V&V mittels Ursache-Wirkungsgraphen kann von einer einzelnen Person durchgeführt werden, falls diese ausreichend Expertise sowohl bezüglich des realen als auch des modellierten Systems aufweist. Dadurch gäbe es keinen zusätzlichen Aufwand für die Kooperation zwischen unterschiedlichen involvierten Parteien. Eine Aufgabenteilung kann allerdings sinnvoll sein, da so die Fachbereiche einfacher abgedeckt werden können. Die Auswertung der Ursache-Wirkungsgraphen erfolgt über den Vergleich der Soll-Ergebnisse (Ursache-Wirkungsgraph des realen Systems) und der Ist-Ergebnisse (Ursache-Wirkungsgraph des Modells). Da die Ein- und Ausgaben binär sind, besteht wenig Interpretationsspielraum, ob Szenarien übereinstimmen. Durch das Erzeugen der Graphen wird bereits ein Großteil der Dokumentation erzeugt. Allerdings sind die Gründe für die Auswahl der Ursachen-Wirkungspaare zu dokumentieren. Durch den binären Datentyp sowohl des In- als auch Outputs können allerdings Faktorfehler nicht entdeckt werden. Damit bieten die Ursachen-Wirkungsgraphen eine gute

Überprüfungsmöglichkeit für kausale Zusammenhänge innerhalb der Modellierung, allerdings nur eine beschränkte Aussage über die Skalierung der Ergebnisse. Zudem können Fehler nicht lokalisiert werden. Um diese Aspekte abzudecken, sind weitere V&V-Techniken notwendig.

**Schreibtischtest:** Für einen Schreibtischtest ist der jeweilige Entwickler bzw. Ausführende der Arbeit zuständig. Dabei werden die bisherigen Arbeitsfortschritte untersucht. Die Art der zu untersuchenden Fortschritte kann je nach Entwicklungsphase, in der sich das Modell gerade befindet, sehr unterschiedlich ausfallen. Die Input-Daten und deren Typ können daher variieren. Aus diesem Grund kann der Schreibtischtest auf unterschiedliche Input-Datentypen angewendet werden. Dabei müssen die Daten bzw. zu untersuchenden Unterlagen menschenlesbar sein. Dadurch, dass die jeweils involvierten Personen den Schreibtischtest ausführen, werden die Daten direkt von für diesen Bereich kundigen Menschen bewertet. Somit muss kein zusätzliches Personal zur Verfügung gestellt werden.

Der Zeitaufwand kann stark variieren, je nach Menge des zu bewertenden Materials. Wird der Schreibtischtest regelmäßig durchgeführt, ist der Zeitaufwand jedoch gering. Es besteht kein zusätzlicher Planungsaufwand, da der Schreibtischtest nur von der jeweiligen Person im eigenen Büro durchgeführt werden kann, sodass keine zusätzlichen Termine für Gruppen organisiert werden müssen. Der Schreibtischtest wird von einer einzelnen Person auf Grundlage ihres jeweiligen Wissenstandes durchgeführt. Daher handelt es sich um eine subjektive V&V-Technik.

Der Output des Schreibtischtests ist wie der Input variabel. Deshalb ist eine ausreichende Dokumentation der Vorgehensweise und Bewertung des Schreibtischtests essenziell. Auf diese Weise kann Nachvollziehbarkeit und ausreichende Sorgfalt gewährleistet werden. Die Qualität des Schreibtischtests ist stark abhängig von der ausführenden Person, insbesondere von der Fähigkeit die eigene Arbeit objektiv zu bewerten. Bei dieser V&V-Technik können Fehler übersehen werden, da der gedankliche Fehler durch die Denkweise der gleichen Person gefunden werden soll. Dennoch können Fehler durch einen gründlichen und regelmäßigen Schreibtischtest frühzeitig detektiert werden. Insbesondere strukturelle und konzeptionelle Fehler können so erkannt werden. Durch den subjektiven Charakter der V&V-Technik ist jedoch eine zusätzliche Kombination mit anderen Techniken sinnvoll, um die Schwächen des Schreibtischtests zu kompensieren.

**Validierung im Dialog:** Die V&V-Technik Validierung im Dialog stellt eine Erweiterung des Schreibtischtestes dar. Dabei werden die bisherigen Ergebnisse allerdings nicht von einer einzelnen Person, sondern von einem Team bewertet. Für ein solches Team sind sowohl Experten für das reale, zu modellierende System, sowie Modellentwickler und potenzielle Modellnutzer notwendig. Dementsprechend sind Personen mit unterschiedlichem Wissenstand und -hintergrund erforderlich, um unterschiedliche Blickwinkel auf die Modellentwicklung zu ermöglichen. Dabei kann die Zusammensetzung des Teams im Verlauf der Modellierung auf Seiten der Modellentwickler variieren, da unterschiedliche Mitarbeiter für unterschiedliche Phasen zuständig sind. Wie beim Schreibtischtest wechselt die Art der Input-Daten je nach Modellierungsphase. Dies bedeutet wiederum, dass diese V&V-Technik auf vielfältige Input-Datenarten angewendet werden kann. Da die unterschiedlichen beteiligten Parteien zu einem Termin zusammenkommen müssen, besteht dadurch ein planerischer Mehraufwand. Ein Treffen muss rechtzeitig vereinbart werden. Die Durchführung der Validierung im Dialog erfordert zum einen die Vorbereitung der einzelnen Personen im Voraus, um eine gründliche V&V und einen reibungslosen Ablauf der Besprechung zu gewährleisten. Zum anderen ist die Aufbereitung der zu bewertenden Inhalte in einer für alle Beteiligten verständlichen Terminologie notwendig. So kann Missverständnissen in der Kommunikation vorgebeugt werden. Allerdings stellt dies auch einen zusätzlichen Arbeitsschritt dar.

Die eigentliche Validierung findet in einer kommunikativen Form statt. Dabei können Fehler in zwei Phasen entdeckt werden. Zum einen können diese schon vor der eigentlichen Validierung entdeckt werden, während der Vorbereitung auf die Validierung. In diesem Prozess müssen das bisherige Vorgehen und die bisherigen Ergebnisse strukturiert durchgearbeitet und für andere Teilnehmer aufbereitet werden. Zum anderen können beim Dialog über das Modell Fehler detektiert werden. Dabei kommt es auf die Zusammenarbeit und Vorbereitung der einzelnen Beteiligten an. Dies ist ein Zeichen für die Subjektivität der Technik. Durch die Beteiligung von mehrerer Personen/-gruppen wird der Subjektivität jedoch entgegengewirkt, da Einschätzungen von anderen Personen hinterfragt werden können. Dennoch muss beachtet werden, dass die Einschätzung einer Person großen Einfluss auf die Gesamteinschätzung des Validierungsergebnisse mit dieser Technik hat, deshalb sollte diese Technik nur ein Teil des V&V-Prozesses sein. Mit einer ausreichenden Dokumentation zur Nachvollziehbarkeit und einer regelmäßigen Durchführung der Validierung im Dialog kann das Vertrauen in die Technik jedoch verbessert

werden. Durch wiederkehrende Strukturen wird der Planungsaufwand verringert, die einzelnen Personengruppen müssen ihre Arbeit regelmäßig kritisch hinterfragen und durch den stetigen Austausch über die Entwicklung der Modellentwicklung wird einer Fehlentwicklung entgegen der Wünsche des Kunden entgegengewirkt.

**Invalid-Input-Testing:** Für das Invalid-Input-Testing werden ungültige Datensets notwendig. Diese sollten unter anderem auch mögliche logische Falscheingaben des Nutzers berücksichtigen. Das Modell muss schon so weit entwickelt sein, dass Input-Daten verarbeitet werden können. Dementsprechend sollte die Technik von einer Person durchgeführt werden, die gute Kenntnisse über gültige Datensets hat, um daraus aussagekräftige ungültige Datensets ableiten zu können. Zudem muss die Person, die die Ergebnisse auswertet, das zu modellierende System so gut kennen, um abschätzen zu können, wie sich das System bei fehlerhafter Dateneingabe verhalten müsste. Diese zwei Aufgabenbereiche können prinzipiell von einer Person bearbeitet werden, werden aber der Einfachheit halber häufig von zwei unterschiedlichen Personen erledigt. Die Technik erfordert wenig bis keine Kommunikation zwischen den beteiligten Personen. Dementsprechend sind nur die Input-Daten an das Modell zu übergeben und die Ergebnisse zu bewerten. Dies nimmt je nach Erfahrungsstand des Auswerters eine geringe Zeitspanne in Anspruch. Zudem ist das Invalid-Input-Testing in Teilen automatisierbar. Wenn Input-Daten-Sets vordefiniert sind, können die unterschiedlichen Modelldurchläufe automatisch durchgeführt werden. Die Auswertung muss jedoch manuell durchgeführt werden. Bei den Output-Daten kann zwischen erwartetem und unerwartetem Verhalten unterschieden werden. Bei unerwartetem Verhalten können Fehler im Modell entdeckt werden. Da die Fehler durch gewählte ungültige Input-Daten hervorgerufen werden, kann die Ursache der Fehler gut eingegrenzt werden. Da die Wahl der Input-Daten sehr wichtig ist, ist auch die Dokumentation, in der die Auswahl begründet werden sollte, für die Nachvollziehbarkeit von großer Bedeutung.

**Validierung mit Hilfe von Vorhersagen:** Die Validierung mit Hilfe von Vorhersagen ähnelt der Auswertung von Ursache-Wirkungsgraphen. Die Input-Daten sind prinzipiell willkürlich, es werden allerdings häufig alte Daten des zu modellierenden Systems benutzt. Dies ist nur möglich, wenn ein solches System schon existiert, lange genug besteht und entsprechende Daten aufgezeichnet werden. Liegen entsprechende Daten nicht vor, müssen Vergleichsdaten erzeugt werden können. Somit muss das zu modellierende System bereits bestehen. Zudem ist es notwendig, dass das Modell schon so weit entwickelt

ist, dass Input-Daten verarbeitet werden können. Es wird eine Person benötigt, die in das Modell die Input-Daten einpflegen kann. Falls keine alten Daten für das reale System vorhanden sind, wird zudem eine Person benötigt, die das reale System bedienen bzw. das System mit den gewählten Input-Daten betreiben kann.

Der Zeitaufwand für die Validierung mit Hilfe von Vorhersagen ist gering, wenn schon alte Vergleichsdaten bekannt sind. In einem solchen Fall ist nur die Simulationszeit und die Zeit für den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Altdaten zu veranschlagen. Müssen die entsprechenden Daten des realen Systems erst noch erzeugt werden, kann das zu einem erheblichen Mehraufwand führen. In einem solchen Fall sind die zu vergleichenden Testfälle sorgfältig auszuwählen. Zur Durchführung der Validierung mit Hilfe von Vorhersagen ist ein Treffen auch für den Fall, dass mehrere Personen beteiligt sind, nicht unbedingt notwendig, da eine klare Abgrenzung der Aufgabenbereiche vorhanden ist. Die Auswertung der Technik erfolgt durch den Vergleich des Simulationsoutputs und der realen Ergebnisse. Dabei handelt es sich um Zahlen, wodurch es schwer zu Fehlinterpretationen kommen kann. Dies in Kombination mit der geringen Auswirkung menschlicher Interaktionen verdeutlicht den eher objektiven Charakter der Technik. Weiter lässt sich die Validierung mit Hilfe von Vorhersagen zum Teil automatisieren, indem der Vergleich zwischen Simulationsdaten und realen Daten automatisch und nicht manuell erfolgt. Die Output-Datenqualität hängt unter anderem von der Granularität des bereits entwickelten Modells ab. Die Vergleichbarkeit der Output-Daten des Modells und des realen Systems sind entscheidend für die Vertrauenswürdigkeit der Technik. Je weiter entwickelt das Modell ist, desto besser ist der Vergleich mit den Realdaten möglich. Aus diesem Grund ist bei einem frühen Entwicklungsstand des Modells die Validierung durch Vorhersage nicht ausreichend. Zudem kann die Technik Fehler zwar aufzeigen, diese allerdings nicht präzise detektieren, da nur Input- und Output-Daten betrachtet werden und der Prozess dazwischen als Blackbox anzusehen ist. Wird ein Fehler entdeckt, sind weitere Techniken anzuwenden, um den Fehler genau zu lokalisieren und das Modell zu verifizieren. Die Auswahl der Input-Daten ist der größte subjektive Einfluss auf die Technik. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, die Wahl der Input-Werte in der Dokumentation zu erklären, um die Nachvollziehbarkeit und somit die Vertrauenswürdigkeit der Technik zu gewährleisten.

**Begutachtung:** Die Begutachtung wird zur generellen Bewertung und Einschätzung von Modellen genutzt. Dabei wird weniger auf technische Details eingegangen als vielmehr

auf die allgemeine Umsetzung. Dementsprechend ist das gesamte Modell als Input zu betrachten. Dabei kann das Modell in jeder Entwicklungsphase untersucht werden. Insbesondere Ablaufpläne und Umsetzungskonzepte werden betrachtet, sowie Ergebnisse von vorherigen V&V-Techniken. Dies erfordert umfassende Kenntnisse über den Entwicklungsstand, die Funktionsweise und die bisherige V&V des Modells auf der Auftragnehmerseite. Weiter ist die Auftraggeberseite involviert. Auf dieser Seite sind Kenntnisse über die genaue Absicht der Nutzung des Modells, die einzuhaltenden Richtlinien und Qualitätsstandards zu definieren. Auf beiden Seiten sind somit Vorbereitungen zur angemessenen Durchführung einer Begutachtung notwendig. Dies hat Einfluss auf den Gesamtzeitaufwand, der für diese Technik veranschlagt werden muss. Darüber hinaus muss ein Treffen zwischen Auftragnehmern und Auftraggebern geplant werden. Somit ist keine spontane Durchführung der Begutachtung möglich. Die Technik basiert auf der Kommunikation und persönlichen Einschätzung einzelner Personen. Dementsprechend ist die Einschätzung des Modells subjektiv. Da allerdings unter anderem Richtlinien als Bewertungsgrundlage verwendet werden, wird die Subjektivität leicht abgemildert. Der kommunikative Charakter dieser Technik und die Ebene, auf der das Modell bewertet wird, hat zur Folge, dass die Begutachtung nicht automatisiert werden kann. Der Output ist ein Protokoll mit einer Bewertung des aktuellen Standes des Modells. Diese Bewertung ist Teil der Dokumentation und stellt die Nachvollziehbarkeit der Begutachtung sicher. Durch die Begutachtung können konzeptionelle Unstimmigkeiten zwischen dem entwickelten und dem gewünschten Modell entdeckt werden. Da die genaue Umsetzung des Modells nicht diskutiert wird, können Fehler nicht genau detektiert werden. Die Begutachtung bietet eine gute Einschätzung, inwieweit das Modell in die richtige Richtung entwickelt wird. Für die Einschätzung der genauen Umsetzung müssen allerdings zusätzliche Techniken verwendet werden.

**Sensitivitätsanalyse:** Die Sensitivitätsanalyse kann nur angewendet werden, wenn bereits ein Modell vorliegt, das Input-Daten verarbeiten kann. Zudem muss das Modell zu einem bereits existierenden Modell gehören, da ansonsten ein Vergleich der Output-Daten des Modells mit realen Daten nicht möglich ist. Die benötigten Input-Daten sind prinzipiell willkürlich. Sie sollten allerdings in Anlehnung an reale Input-Parameter gewählt werden. Um eine aussagekräftige Auswertung zu ermöglichen, ist eine genaue Planung von Parametervariationen notwendig, um etwaige Effekte zwischen Änderungen, wie zum Beispiel Synergie-Effekte, abzubilden. Somit ist Wissen über statistische Versuchsplanung notwendig. Für die Anwendung dieser Technik ist weiter Wissen über den realen

Variabelwertebereich erforderlich und über die effiziente Planung von Parametervariationen, die sowohl eine ausreichende Bandbreite an Variationen abdeckt, aber auch keinen zu hohen Arbeitsaufwand erzeugt. Die Teilwissensgebiete können gut von unterschiedlichen Personen bearbeitet werden, da die Gebiete klar voneinander abgetrennt sind. Die Anzahl der Versuche steht im direkten Zusammenhang mit dem benötigten Zeitaufwand und der Vertrauenswürdigkeit der Auswertungsergebnisse. Die Planung der Versuche ist entscheidend für die Bewertung der Vertrauenswürdigkeit der Technik. Liegen erprobte Schemata vor, die die statistische Planung von Experimenten erleichtern, kann der Planungsaufwand deutlich reduziert werden. Ist dies nicht der Fall muss die Vorgehensweise klar strukturiert sein und ausreichend dokumentiert werden. Ein weiterer Aspekt des Zeitaufwandes ist die Datenerhebung am realen System. Liegen keine Daten mit den gewünschten genauen Spezifikationen vor, müssen diese erst erhoben werden. Je nach Art des Systems kann dies einige Zeit in Anspruch nehmen. Die Technik kann durch eine einzelne Person aber auch durch mehrere Personen durchgeführt werden, die getrennt nacheinander ihre Aufgabenbereiche abarbeiten können. Dadurch wird eine Terminierung von Treffen vermieden und die Technik kann spontaner durchgeführt werden. Die Sensitivitätsanalyse kann in großen Teilen automatisiert werden. Nach der Versuchsplanung können die Versuchsparameter automatisch eingelesen werden und bei Vorliegen realer Daten mit diesen verglichen werden. Eine abschließende Bewertung muss allerdings manuell erfolgen. Die Auswertung kann allerdings durch automatisch erstellte Graphiken unterstützt werden. Auf diese Weise kann auch ein Teil der Dokumentation automatisch erzeugt werden. Die Sensitivitätsanalyse bietet die Möglichkeit sogenannte sensitive Parameter zu identifizieren. Die Abweichung von Modell-Effekten und realen Effekten kann ein Indiz für Invalidität sein. Die genaue Lokalisierung der Fehler ist jedoch nicht möglich. Die Parameterkombinationen, bei denen unerwartete Effekte auftreten, können allerdings Hinweise auf Problematiken geben. Die Technik dient primär der Validierung, sodass weitere Techniken zur Verifikation angewendet werden müssen.

**Statistische Techniken:** Die statistischen Techniken bilden eine Gruppe aus mehreren objektiven Techniken. Dabei werden als Input-Daten der Techniken insbesondere die Output-Daten der Simulation verwendet sowie entsprechende Output-Daten des realen Systems. Dies bedeutet, dass mit dem Modell bereits Simulationen durchgeführt werden können müssen. Zudem muss das nachgebildete System bereits existieren und für viele gängige Techniken vollständig beobachtbar sein. Weiter müssen die erhobenen Daten numerisch oder binär sein, um statistische Techniken darauf anwenden zu können. Die

durchführenden Personen der statistischen Technik müssen bei der Auswertung mit statistischer Mathematik vertraut sein. Zudem muss Wissen über statistische Testreihen vorhanden sein, damit eine ausreichende Streuweite durch Versuche abgedeckt wird. Statistische Techniken können von einer einzelnen Person durchgeführt werden. Liegen bereits Daten des realen Systems vor, müssen nur noch entsprechende Simulationsdurchläufe vorgenommen werden, um Daten des Modells zu sammeln. Je nach Versuchsplan müssen eventuell noch zusätzliche Daten am realen System erhoben werden. Nach dem Erstellen des Versuchsplans können die meisten statistischen Techniken annähernd vollständig automatisiert werden. Dies liegt daran, dass grundsätzlich Verteilungen von Daten untersucht werden. Somit ist das Erstellen von Bewertungskriterien unabhängig von subjektiven Einschätzungen und kann klar beschrieben werden. Auch bei der Bewertung der Ergebnisse der statistischen Techniken bleibt nur wenig Interpretationsspielraum für die Auswertenden, sodass die Ergebnisse im Vergleich zu anderen eher subjektiven Techniken vertrauenswürdig sind. Jedoch können statistische Techniken meist nicht ohne weiteres auf beliebige Modelle angewendet werden, da eine bestimmte Datenstruktur vorhanden sein muss. Fehler im Modell, die entweder die Ergebnisse bei vorgegebener Verteilung von Input-Daten oder das Abbilden des realen Verhaltens des Systems betreffen, können gut detektiert werden. Die Lokalisierung solcher Fehler ist jedoch auf Basis dieser Techniken eher schwierig. Um eventuelle Fehler zu detektieren, sollten noch weitere V&V-Techniken angewandt werden. Da die Anwendung und Auswertung meist durch Statistikprogramme vorgenommen werden, erfolgt ein Großteil der Erstellung der Dokumentation durch die Programme. Die anschließende Beurteilung der Ergebnisse sollte allerdings der Dokumentation noch hinzugefügt werden.

**Turing Test:** Beim Turing Test werden mehrere Experten für das reale System benötigt, die die Ergebnisse bewerten. Darüber hinaus sind Experten für das Modell notwendig, die im Vorhinein die zu bewertenden Daten aufbereiten. Diese müssen sicherstellen, dass nicht allein durch die Darstellung ersichtlich ist, welche Daten zum Modell und welche zum realen System gehören. Beim Turing Test werden Output-Daten verglichen, die durch die gleichen Input-Daten erzeugt wurden. Dementsprechend muss das Modell schon so weit entwickelt worden sein, dass es Input-Daten verarbeiten kann. Zudem muss das modellierte System bereits real bestehen und beobachtbar sein. Um den Zeitaufwand zu verringern, können Alt-Daten des realen Systems verwendet werden und mit den entsprechenden Input-Daten im Modell nachgebildet werden. Ansonsten muss Zeit zum Erheben der Daten berücksichtigt werden. Je nachdem wie ähnlich die Ausgaben der Daten

sind, muss noch Zeit für die Aufbereitung der Ergebnisse eingeplant werden. Anschließend werden diese Ergebnisse von den System-Experten bewertet. In der Zeit dieser Bewertung kann am Modell weitergearbeitet werden. Es werden dadurch keine Ressourcen gebunden. Die Experten sollen unabhängig voneinander die aufbereiteten Daten bewerten. Dadurch ist keine Kommunikation bzw. kein Treffen zwischen ihnen notwendig. Die Technik ist nicht automatisierbar, da sie auf der Expertise der Fachleute beruht. Diese Expertise schränkt die Subjektivität der Technik ein. Die Vertrauenswürdigkeit der Technik ist von der Anzahl der involvierten Experten abhängig. Der Output des Turing Tests ist die Einschätzung der Experten, welche Daten zum Modell und welche Daten zum realen System gehören. Bei der Interpretation, ab wann kein klarer Unterschied zwischen Simulationsdaten und realen Daten mehr ersichtlich ist, gibt es Spielraum. Dennoch ist diese Technik ein guter Indikator, wie gut ein Modell das reale System sowohl qualitativ als auch quantitativ abbildet. Um auch Extremfälle abzudecken, sollte diese Technik mit mehreren Inputkonfigurationen angewendet werden. Da nur die Input- und Output-Daten betrachtet werden und der Prozess dazwischen als Blackbox betrachtet wird, bietet der Turing Test keine Möglichkeit Fehler zu lokalisieren. Die Dokumentation wird zum Großteil durch die Bewertung der Daten durch die System-Experten erzeugt und bedingt dementsprechend keinen wesentlichen Mehraufwand.

Bei der Auswahl einer V&V-Technik sind vor allem die Voraussetzungen der Techniken in Kombination mit den vorhandenen Ressourcen von Bedeutung. Dabei wird im Folgenden zwischen diskreten (es liegt ein bestimmter Zustand vor und es können keine Zwischenausprägungen vorliegen) und kontinuierlichen Anforderungen (können leicht bis schwer erfüllt werden) unterschieden.

Das Vorhandensein eines bereits real existierenden Systems, das in einem Modell nachgebildet werden soll, zählt zu den diskreten Anforderungen. Mehrere Techniken erfordern bspw. zum Vergleich der Output-Daten des realen und des modellierten Systems, bereits ein real existierendes System. Ist dieses nicht vorhanden, können solche Techniken nicht durchgeführt werden. Existiert das durch das Modell nachzubildende System bereits, ergibt sich der Aspekt der Datensammlung. Der Zeitaufwand zur Durchführung mancher Techniken kann stark reduziert werden, wenn bereits Altdaten zum Abgleich vorhanden sind. Das Vorhandensein von Altdaten zählt zu den kontinuierlichen Anforderungen, da Daten im vollen benötigten Umfang vorliegen können oder auch nur bruchstückhaft. Lie-

gen Daten nur bruchstückhaft vor, muss die Möglichkeit zur Datensammlung berücksichtigt werden. Darunter fällt die prinzipielle Beobachtbarkeit des realen Systems sowie der Aufwand, um bestimmte Daten aufzuzeichnen und aufzubereiten.

Eine weitere diskrete Anforderung stellt der notwendige Entwicklungsstand des Modells dar. Dabei stellt insbesondere die Fähigkeit Input-Daten verarbeiten zu können eine relevante Entwicklungsstufe dar. Als weitere wichtige Entwicklungsphasen lassen sich das konzeptionelle Modell, das (bereits in Teilen) programmierte Modell und das ausführbare Modell betrachten. Dabei wird unter „bereits in Teilen programmiert“ ein Programmcode verstanden, in den Input-Daten eingepflegt werden können. Dabei kann es noch notwendig sein, dass Daten zwischen unterschiedlichen Programmfragmenten manuell übertragen werden müssen. Weiter stellen V&V-Techniken Anforderungen an das ausführende Personal. Insbesondere sind dabei Wissenstand und Qualifikationen von Bedeutung. Einzelne Techniken erfordern genaueres Wissen über das Verhalten des realen Systems, statistische Versuchsplanung oder Wissen über bestimmte Richtlinien. Derartiges Wissen kann, falls noch nicht vorhanden bspw. durch Fortbildungen erworben werden. Sind jedoch tiefgreifende Kenntnisse auf einem Gebiet notwendig, empfiehlt es sich für eine solche V&V-Technik einen Experten hinzuzuziehen, der das Modellierungsteam unterstützt. Teilweise ist dies sogar unumgänglich, um die Objektivität einer Technik zu verbessern. Bei der Anforderung an den Wissenstand der V&V-Durchführenden handelt es sich somit um eine kontinuierliche Anforderung, da Wissen in unterschiedlichen Stufen vorliegen kann.

Sind mehrere Personen in den V&V-Prozess involviert, muss die Art der Zusammenarbeit betrachtet werden. Müssen Treffen geplant werden, vergrößert dies den Zeitaufwand. Ein Austausch mehrerer Personen kann allerdings auch die Objektivität einer Technik erhöhen, sodass ein Treffen nicht unbedingt negativ zu bewerten ist. Außerdem kann so sichergestellt werden, dass die Expertise für die Technik vorhanden ist.

Ein weiteres Kriterium, nach dem Techniken ausgewählt und sortiert werden können, ist der auch schon in der Literatur vielfach beschriebene Ansatz, die Techniken nach Subjektivität bzw. Objektivität zu ordnen (vgl. Abschnitt 3.3). Durch die Verwendung von objektiveren V&V-Techniken kann die Vertrauenswürdigkeit der Modelle schneller und effektiver gesteigert werden als durch Techniken mit subjektivem Charakter. Objektivere Techniken stellen meist höhere Anforderungen an das Modell, sodass sie nicht immer

einsetzbar sind. Können diese nicht erfüllt werden, müssen subjektive Techniken eingesetzt werden. Beim Einsatz subjektiver Techniken ist es notwendig einzelne V&V-Techniken miteinander zu kombinieren, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Subjektive Techniken führen somit zu einem Mehraufwand in Bezug auf V&V. Dieser Aspekt trägt mit dazu bei, dass der Objektivität von Techniken eine große Bedeutung zukommt.

Aus ökonomischer Sicht kommt dem Aufwand eine Technik durchzuführen eine große Bedeutung zu, da der Aufwand in direkter Verbindung mit den aufzuwendenden Kosten steht. Diese Kosten setzen sich aus zwei Hauptbestandteilen zusammen, dem Zeit- und den Personalaufwand. Die Bewertung dieser Aspekte fällt im Allgemeinen allerdings schwer, da bspw. der Zeitaufwand für V&V-Techniken insbesondere von der Komplexität des zu modellierenden Modells abhängig ist. Deswegen wird bei diesem Kriterium immer ein Bereich der Ausprägung angegeben. Weitere Aspekte der V&V-Techniken wie unter anderem die Dokumentationsnotwendigkeit oder die Automatisierbarkeit beeinflussen unterschiedliche Teilbereiche der Kostengenerierung. Sind Techniken gut automatisierbar, kann so Zeit eingespart werden. Selbst wenn eine Technik eine lange Durchführungszeit aufweist, kann diese Zeit auch für andere Arbeiten genutzt werden. Zudem ist die Fehleranfälligkeit bei automatisierten Techniken geringer. Solche Techniken sind in den meisten Fällen zudem objektiver als rein kommunikative Techniken. Besteht ein hoher Dokumentationsaufwand, beansprucht dies wiederum Zeit. Eine gute Dokumentation erhöht allerdings auch die Nachvollziehbarkeit des Vorgehens und somit die Vertrauenswürdigkeit. Dementsprechend fließen auch derartige Aspekte in die Bewertung der kontinuierlichen Techniken mit ein.

Da die entwickelten Gruppierungskriterien vor allem als Hilfestellung zur Wahl einer geeigneten Technik dienen sollen, ist eine übersichtliche Darstellung des Entscheidungsprozesses notwendig. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Kriterien zusammengefasst, sowohl tabellarisch als auch in Form von Graphen.

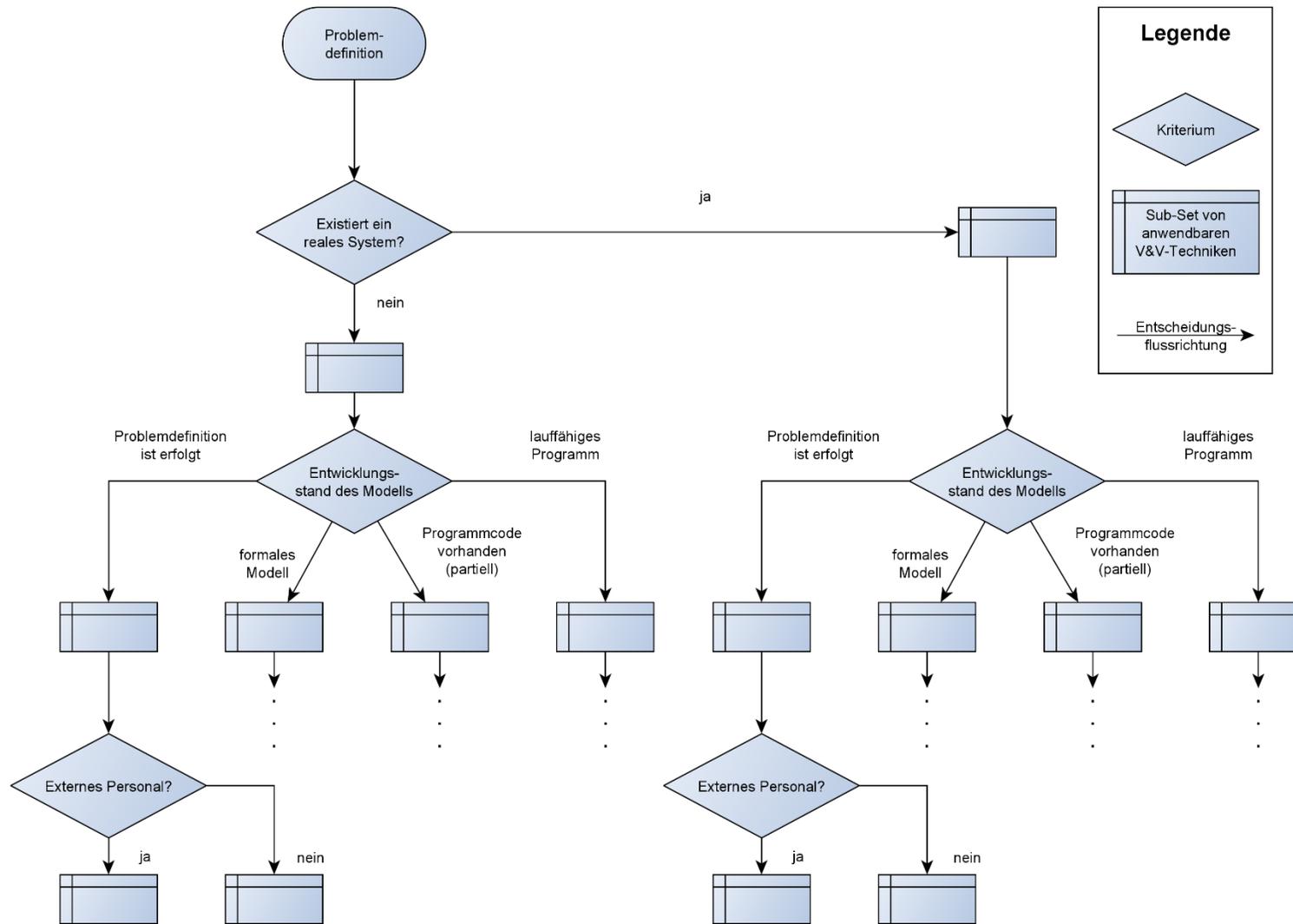


Abbildung 3: Flussdiagramm zur Auswertung diskreter Kriterien

Es ergeben sich folgende Gruppierungskriterien, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind:

*Tabelle 1: Gruppierungskriterien für V&V-Techniken*

<b>Kriterium</b>	<b>Art der zugrundeliegenden Anforderung</b>
Existenz eines realen Systems	Diskret
Entwicklungsstand des Modells	Diskret
Externes Personal	Diskret
Beobachtbarkeit des (realen) Systems	Kontinuierlich
Existenz von Altdaten	Kontinuierlich
Subjektivität/ Objektivität	Kontinuierlich
Wissensstand	Kontinuierlich
Zeitaufwand/ Personalaufwand	Kontinuierlich
Automatisierbarkeit	Kontinuierlich

Diskrete Kriterien führen zum generellen Ausschluss von V&V-Techniken zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt. Dieses Verhalten lässt sich gut in einem Flussdiagramm darstellen, das eine Hilfe zur Wahl einer passenden V&V-Technik bieten kann. Dabei werden zunächst diskrete Kriterien abgefragt. Es werden die bestehenden Gegebenheiten betrachtet und, ob externes Personal mit einbezogen werden kann bzw. soll. Zunächst wird betrachtet, ob ein real existierendes System modelliert wird. Anschließend wird der bisherige Entwicklungsstand des Modells bewertet. Das Flussdiagramm wird damit abgeschlossen, dass die Frage nach externem Personal gestellt wird. Externes Personal bedeutet zumeist mehr Objektivität, es bedeutet allerdings auch einen größeren Aufwand bei der Organisation der Umsetzung von Techniken und Erhöhung der Kosten. Ein beispielhaftes Flussdiagramm ist in Abbildung 3 dargestellt. Wird dieses Flussdiagramm durchlaufen, erhält man eine Submenge an möglichen anzuwendenden V&V-Techniken. Um anschließend die Menge an Techniken weiter eingrenzen zu können, wird zusätzlich je ein Netzdiagramm (beispielhafte Darstellung siehe Abbildung 4) mit den kontinuierlichen Kriterien für jede verbliebene Technik erstellt. Dabei werden die kontinuierlichen Kriterien auf einer Skala von null bis zehn bewertet. Die aufgetragenen Werte entsprechen den benötigten Anforderungen für die jeweilige V&V-Technik. Das Subjektivitäts-/Objektivitätskriterium beschreibt die Eigenschaft der untersuchten V&V-Technik. Eine Bewertung von null entspricht dabei vollkommener Subjektivität und von zehn vollkommener Objektivität. Der Aufwand ist neben der Komplexität des zu untersuchenden Systems insbesondere von der V&V-Technik abhängig. Manche Techniken können sowohl

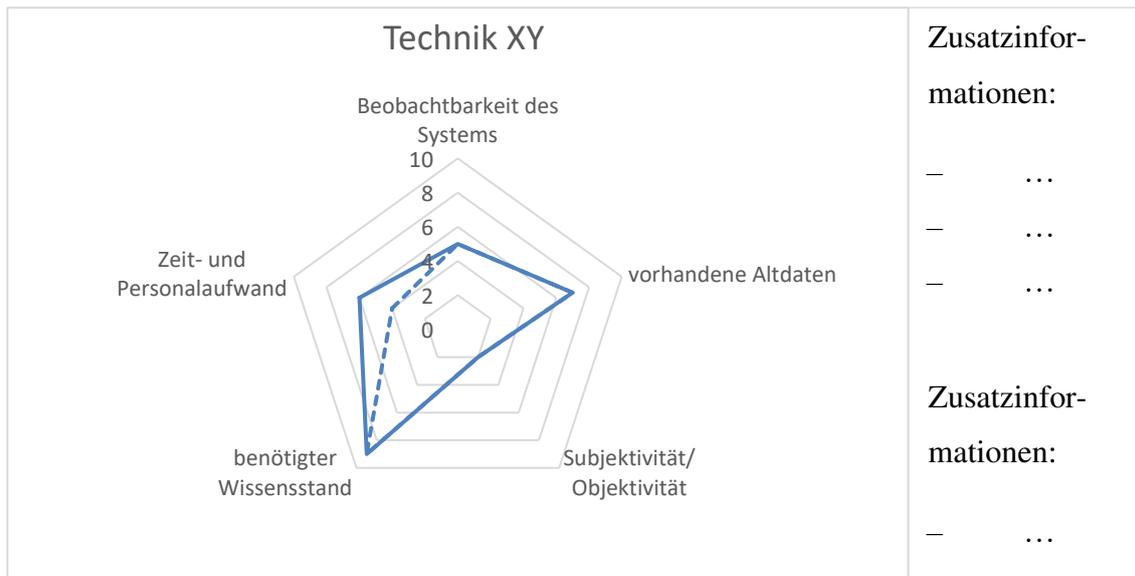


Abbildung 4: Netzdiagramm zur Bewertung der kontinuierlichen Kriterien

von einer einzelnen Person als auch von mehreren durchgeführt werden. Mehrere Personen können die Technik teils schneller durchführen. Für diesen Zeitraum sind in einem solchen Fall allerdings auch mehr Ressourcen gebunden. Da der Aufwand insbesondere durch die Möglichkeit zur Automatisierung mancher Techniken stark verringert werden kann, wird für dieses Kriterium ein Bereich angegeben. Der Aufwand beschreibt somit eine Eigenschaft der V&V-Technik. Um den Einfluss der Automatisierbarkeit dabei klar herauszustellen, wird eine Bewertung der Möglichkeit zur Automatisierung gesondert vermerkt. Bei den beiden zuvor beschriebenen Kriterien entscheidet der Auswählende, welche Eigenschaften er bei einer Technik favorisiert. Bei den anderen Kriterien handelt es sich um Anforderungen an das Modell bzw. an die Rahmenbedingungen bei der Durchführung der Technik. Der benötigte Wissensstand bezieht sich auf das notwendige Wissen des Entwicklungsteams zur Durchführung einer Technik. Dabei kann es sich um das Wissen eines Einzelnen handeln, aber auch um das Wissen des gesamten Teams. Das Kriterium der vorhandenen Altdaten ist ein schwächeres Kriterium und führt nicht zwingend zum Ausschluss einer V&V-Technik, da fehlende Daten unter Erhöhung des Zeitaufwandes erhoben werden können. Das Vorhandensein von Altdaten ist insbesondere nur dann ein Kriterium, wenn ein reales System existiert. Ansonsten ist dieses Kriterium von geringerer Bedeutung. Je nachdem, ob ein reales System existiert oder nicht, ist die Beobachtbarkeit des Modells oder des realen Systems von Relevanz. Bspw. spielt die Be-

obachtbarkeit des realen Systems bei statistischen Techniken eine große Rolle (vgl. Abschnitt 3.2). Das Kriterium der Beobachtbarkeit beschreibt das Mindestmaß an Überwachbarkeit des Systems, um eine V&V-Technik durchführen zu können.

Basierend auf den aktuellen Anforderungen sowohl an die Technik als auch an die Rahmenbedingungen kann dann eine passende Technik ausgewählt werden. Ein Netzdiagramm reduziert die Informationen über eine Technik auf eine einfache visuelle Darstellung. Um weitere Informationen bereitzustellen, wird zusätzlich zu jeder Technik eine Zusammenstellung von besonderen Merkmalen, Anforderungen bzw. Anmerkungen beigefügt.

### 4.3 Gruppierung von ausgewählten Verifikations- und Validierungstechniken

Im folgenden Abschnitt werden die in Abschnitt 4.2 entwickelten Gruppierungskriterien exemplarisch auf die in Abschnitt 3.2 erläuterten V&V-Techniken angewandt. Dabei werden die Techniken zunächst in das in Abschnitt 4.2 beschriebene Flussdiagramm eingeordnet (siehe Abbildung 5). Zudem werden Netzdiagramme für die einzelnen Techniken und zusätzliche Info-Boxen erstellt. Die Einordnung in das Flussdiagramm (siehe Abbildung 5) erfolgt nach der Bewertung der V&V-Techniken basierend auf Tabelle 2.

*Tabelle 2: Bewertung von V&V-Techniken anhand diskreter Kriterien*

<b>V&amp;V-Technik</b>	<b>Existenz eines realen Systems</b>	<b>Entwicklungsstand des Modells</b>	<b>Externes Personal</b>
Audit	Nicht notwendig	Immer anwendbar	Auditor
Ursache-Wirkungsgraph	Notwendig	Ab formalem Modell	(System-Experte)
Schreibtischtest	Nicht notwendig	Immer anwendbar	Nein
Validierung im Dialog	Nicht notwendig	Immer anwendbar	System-Experte
Invalid-Input-Testing	Notwendig	Ab Programmcode vorhanden	(System-Experte)
Validierung mit Hilfe von Vorhersagen	Notwendig	Ab Programmcode vorhanden	(System-Experte)
Begutachtung	Nicht notwendig	Immer anwendbar	Auftraggeber
Sensitivitätsanalyse	Notwendig	Ab Programmcode vorhanden	(System-Experte)
Statistische Technik	Notwendig	Ab Programmcode vorhanden	(System-Experte)
Turing Test	Notwendig	Ab Programmcode vorhanden	System-Experte

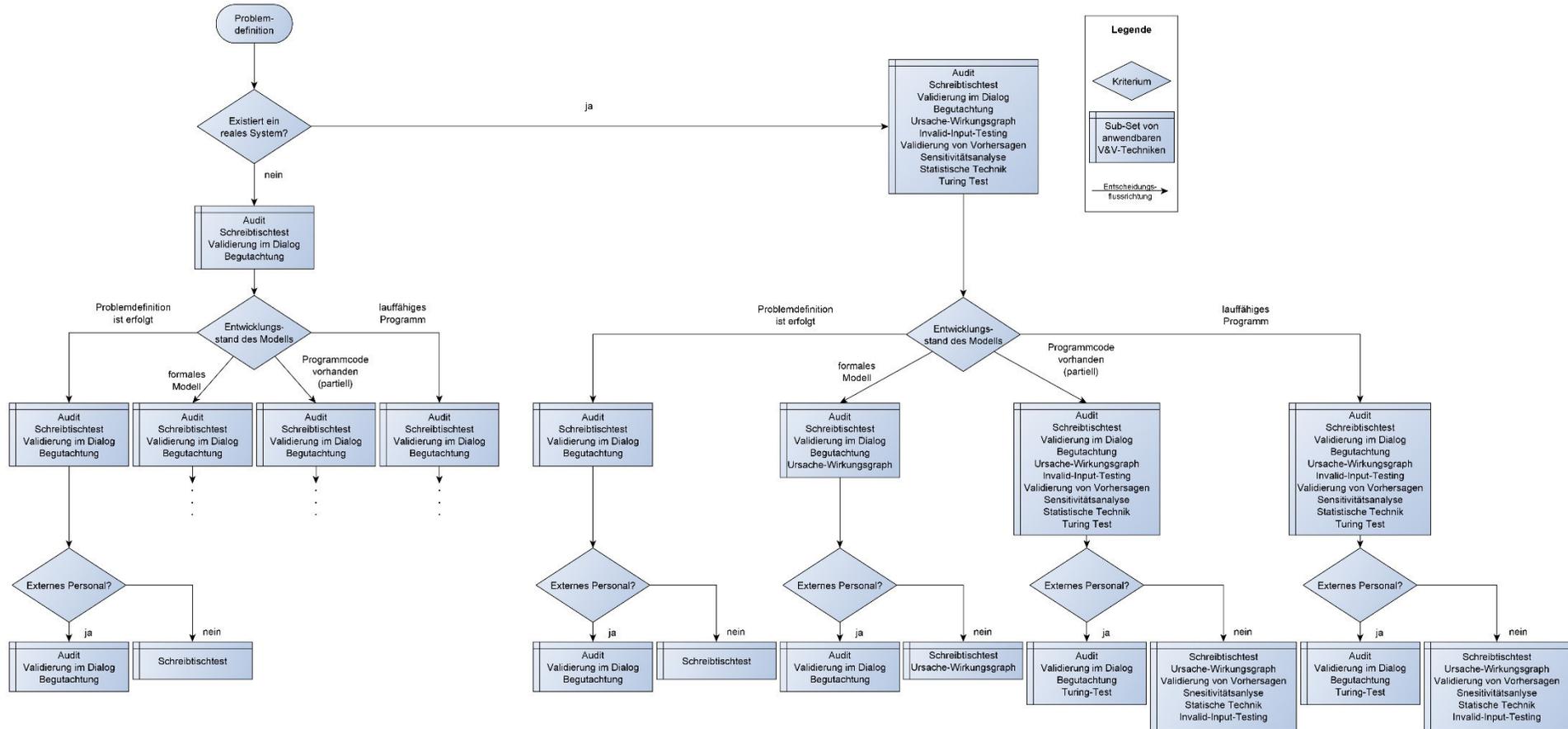


Abbildung 5: Anwendung des Flussdiagramms

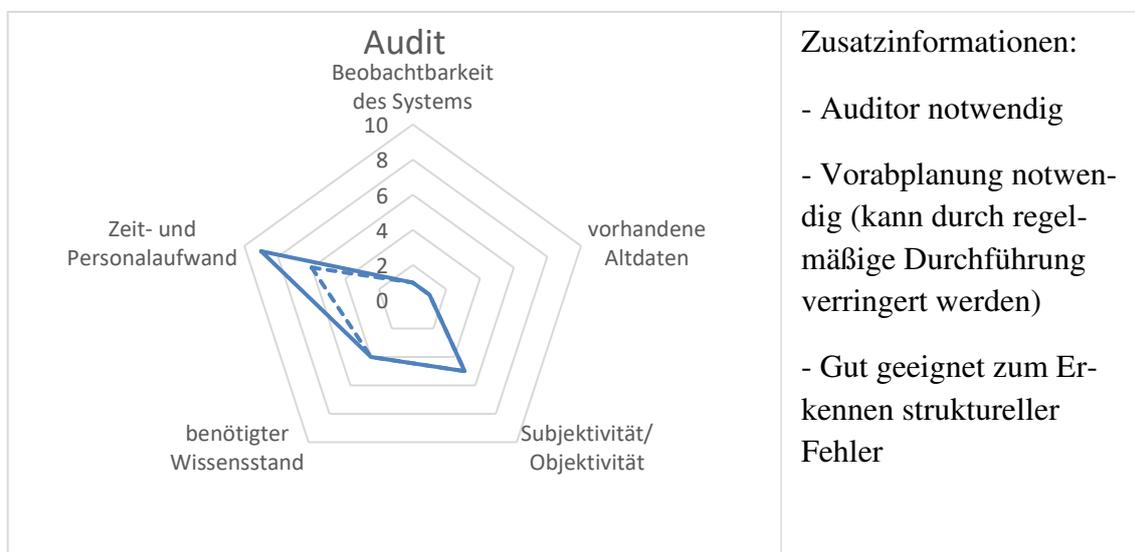
Bei der Bewertung der Kategorie „externes Personal“ bedeuten die Ausdrücke in Klammern, dass die Personen nur unter bestimmten Umständen notwendig sind. Dies ist insbesondere der Fall, wenn nicht ausreichend Altdaten vorhanden sind, sodass noch weitere Daten des realen Systems erhoben werden müssen. Im Flussdiagramm wird zunächst davon ausgegangen, dass ausreichend Daten bereits vorliegen.

Im Weiteren werden die sich aus dem Flussdiagramm ergebenden Sub-Sets an V&V-Techniken durch Netzdiagramme weiter beschrieben. Bei den sich ergebenden Sub-Sets für V&V-Techniken, bei denen kein reales System existieren muss, handelt es sich bei den beispielhaft gewählten Techniken um die gleichen Sets. Aus diesem Grund werden diese Sets nur einmal im Flussdiagramm aufgeführt.

Im Folgenden werden die einzelnen V&V-Techniken der jeweiligen Sets mit Hilfe von Netzdiagrammen eingeordnet. Da sich teils übereinstimmende Sets im Flussdiagramm ergeben haben, werden diese nur einmal aufgeführt.

In Abbildung 6 sind die Techniken der folgenden Technik-Sets dargestellt:

- Set 1, 3, 5, 7: Techniken, die angewendet werden können, falls kein reales System existiert, ein beliebiger Entwicklungsstand des Modells vorliegt und externes Personal involviert wird
- Set 9: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, die Problemdefinition für das Modell vorliegt und externes Personal involviert wird
- Set 11: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, ein formales Modell vorliegt und externes Personal involviert wird



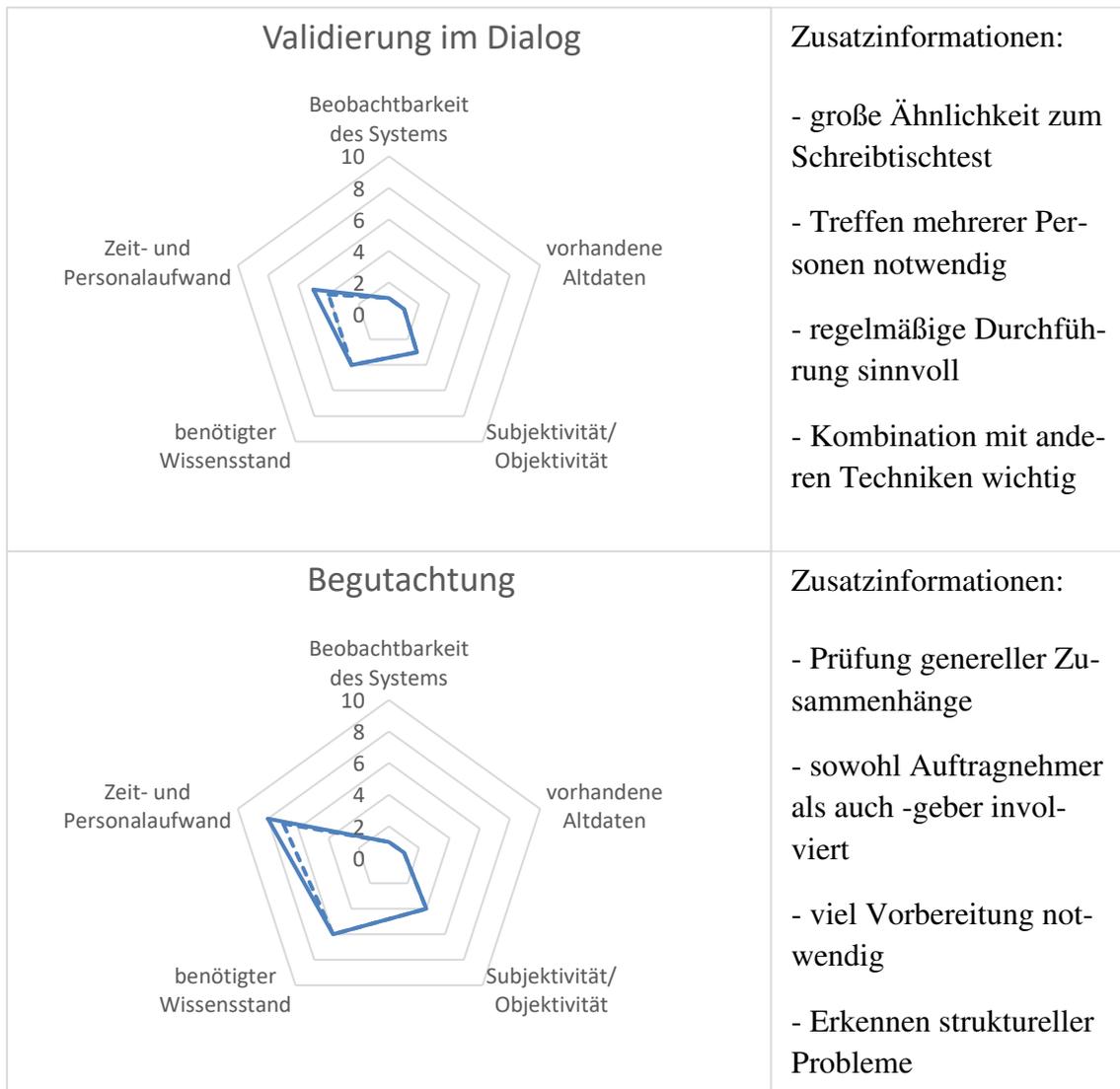


Abbildung 6: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 1, 3, 5, 7, 9 und 11

In Abbildung 7 sind die Techniken der folgenden Technik-Sets dargestellt:

- Set 2, 4, 6, 8: Techniken, die angewendet werden können, falls kein reales System existiert, ein beliebiger Entwicklungsstand des Modells vorliegt und kein externes Personal involviert wird
- Set 10: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, die Problemdefinition für das Modell vorliegt und kein externes Personal involviert wird

In Abbildung 8 sind die Techniken der folgenden Technik-Sets dargestellt:

- Set 12: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, ein formales Modell vorliegt und kein externes Personal involviert wird

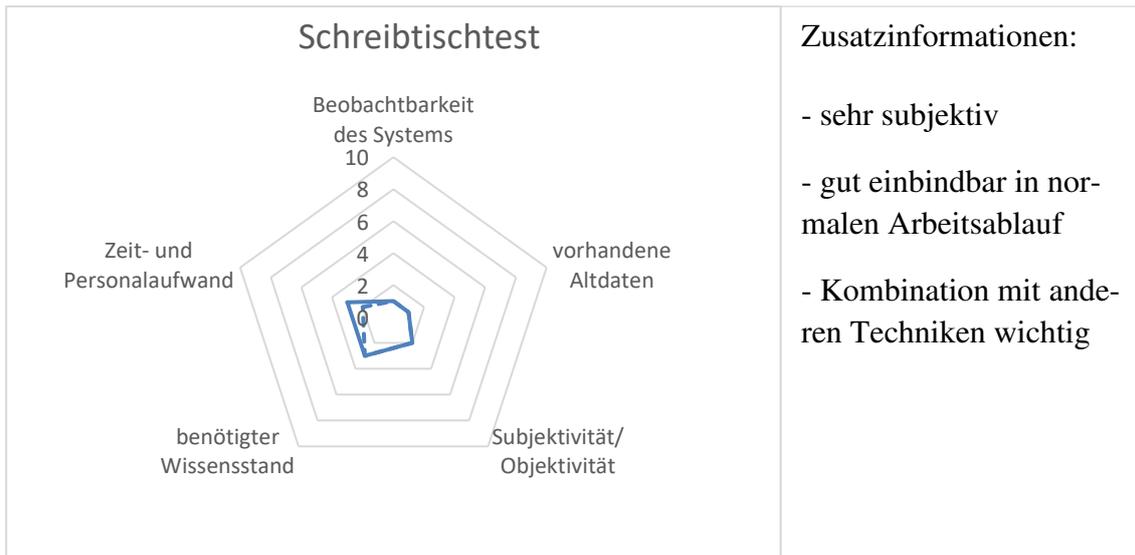


Abbildung 7: Netzdiagramm zu V&V-Technik-Sets 2, 4, 6, 8 und 10

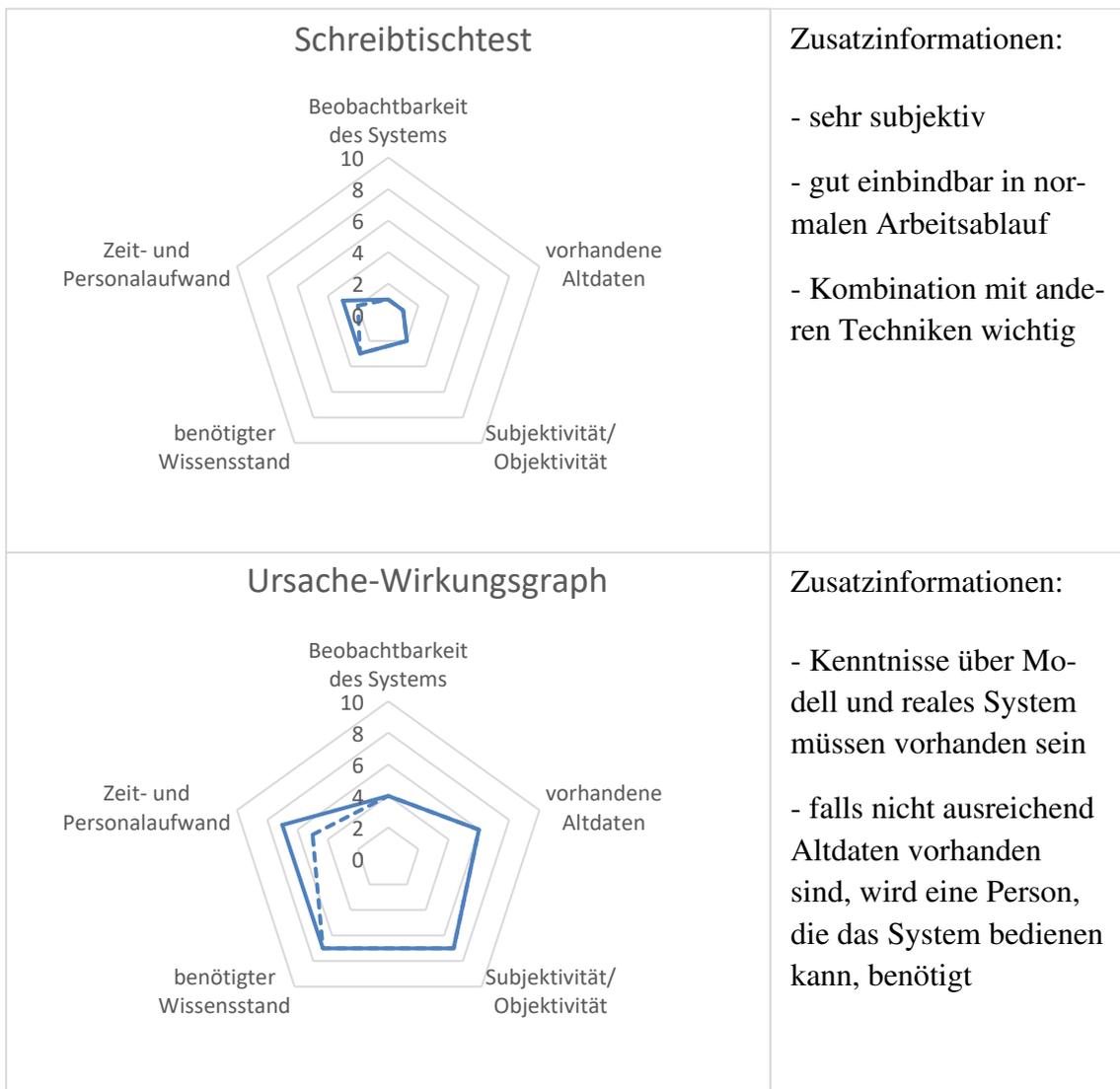


Abbildung 8: Netzdiagramme zum V&V-Technik-Set 12

In Abbildung 9 sind die Techniken der folgenden Technik-Sets dargestellt:

- Set 13: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, Programmcode vorhanden ist und externes Personal involviert wird
- Set 15: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, ein lauffähiges Programm vorliegt und externes Personal involviert wird

In Abbildung 10 sind die Techniken der folgenden Technik-Sets dargestellt:

- Set 14: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, Programmcode vorhanden ist und kein externes Personal involviert wird
- Set 16: Techniken, die angewendet werden können, falls ein reales System existiert, ein lauffähiges Programm vorliegt und kein externes Personal involviert wird

<p style="text-align: center;"><b>Audit</b></p>	<p><b>Zusatzinformationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auditor notwendig</li> <li>- Vorabplanung notwendig (kann durch regelmäßige Durchführung verringert werden)</li> <li>- Gut zum Erkennen struktureller Fehler geeignet</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Validierung im Dialog</b></p>	<p><b>Zusatzinformationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- große Ähnlichkeit zum Schreibtischtest</li> <li>- Treffen mehrerer Personen notwendig</li> <li>- regelmäßige Durchführung sinnvoll</li> <li>- Kombination mit anderen Techniken wichtig</li> </ul>

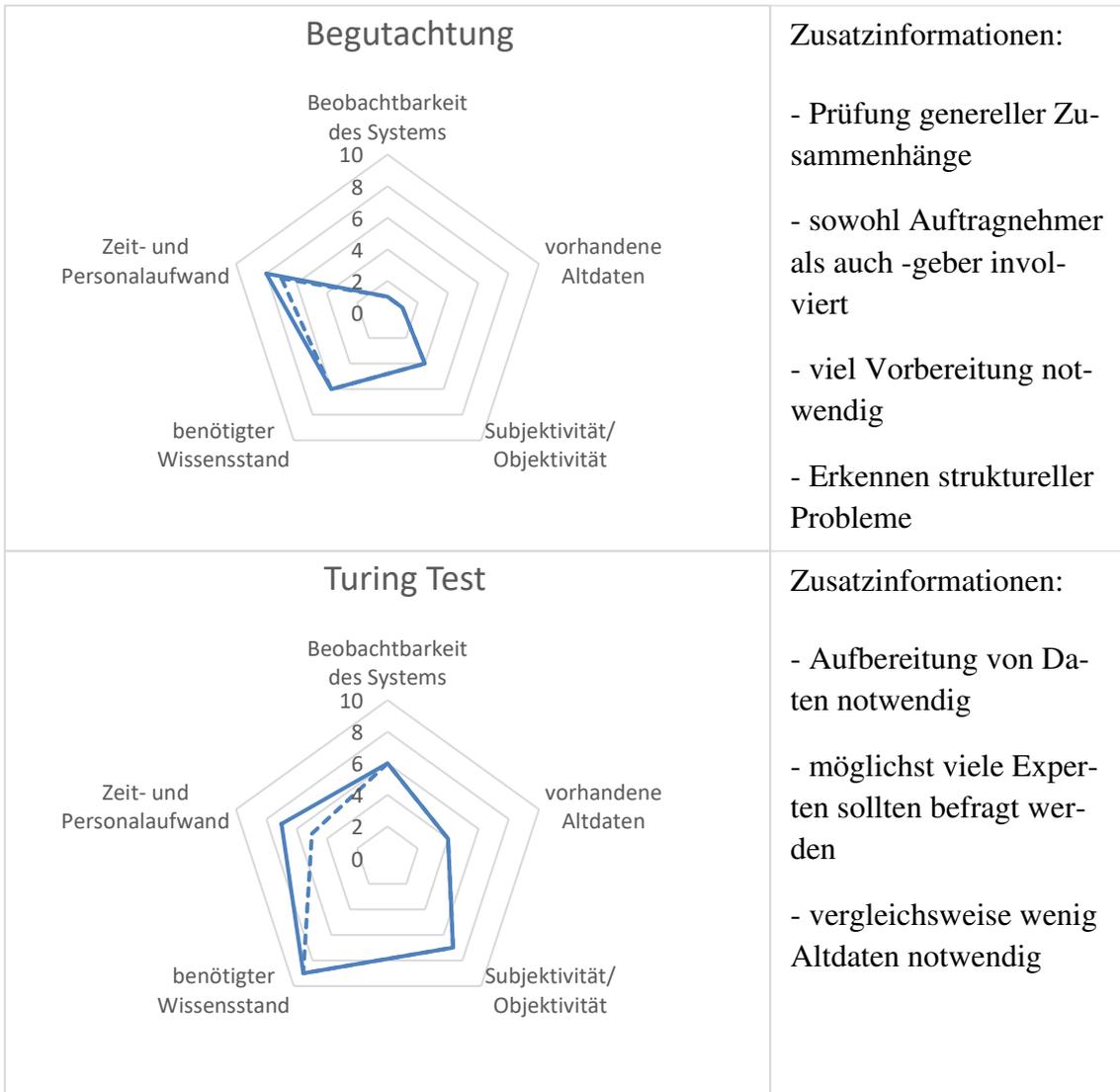
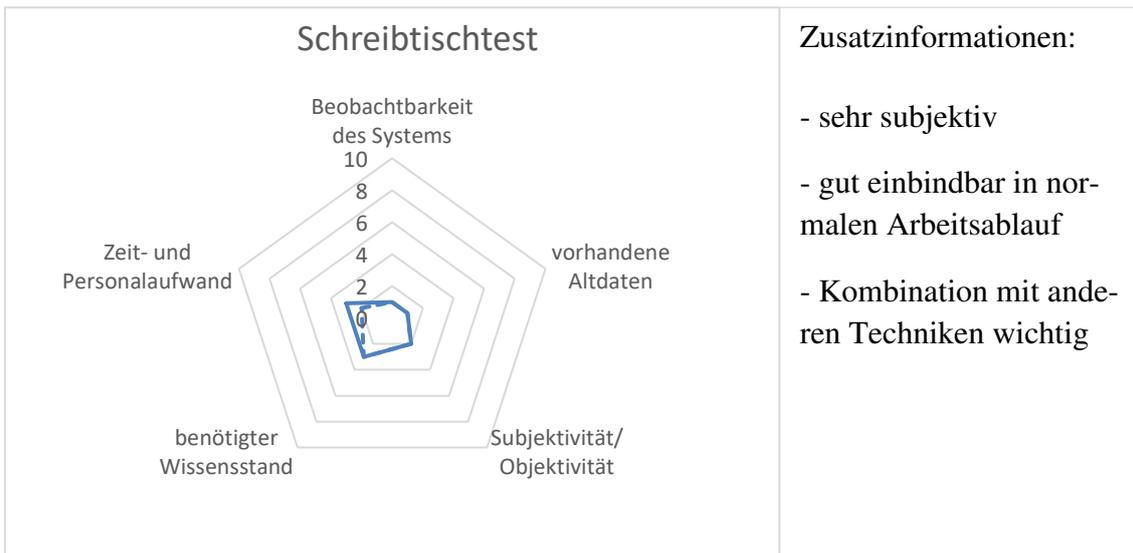


Abbildung 9: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 13 und 15



<h3 style="text-align: center;">Validierung von Vorhersagen</h3>	<p>Zusatzinformationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fast jede Art von Altdaten kann verwendet werden</li> <li>- Automatisierung zum Teil möglich</li> <li>- je weiter das Modell entwickelt ist, desto besser ist diese Technik geeignet</li> </ul>
<h3 style="text-align: center;">Ursache-Wirkungsgraph</h3>	<p>Zusatzinformationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kenntnisse über Modell und reales System müssen vorhanden sein</li> <li>- falls nicht ausreichend Altdaten vorhanden sind, wird eine Person, die das System bedienen kann, benötigt</li> </ul>
<h3 style="text-align: center;">Sensitivitätsanalyse</h3>	<p>Zusatzinformationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Automatisierung in Teilen möglich</li> <li>- Wissen über statistische Versuchsplanung nötig</li> <li>- falls nicht ausreichend Altdaten vorhanden sind, wird eine Person, die das System bedienen kann, benötigt</li> </ul>

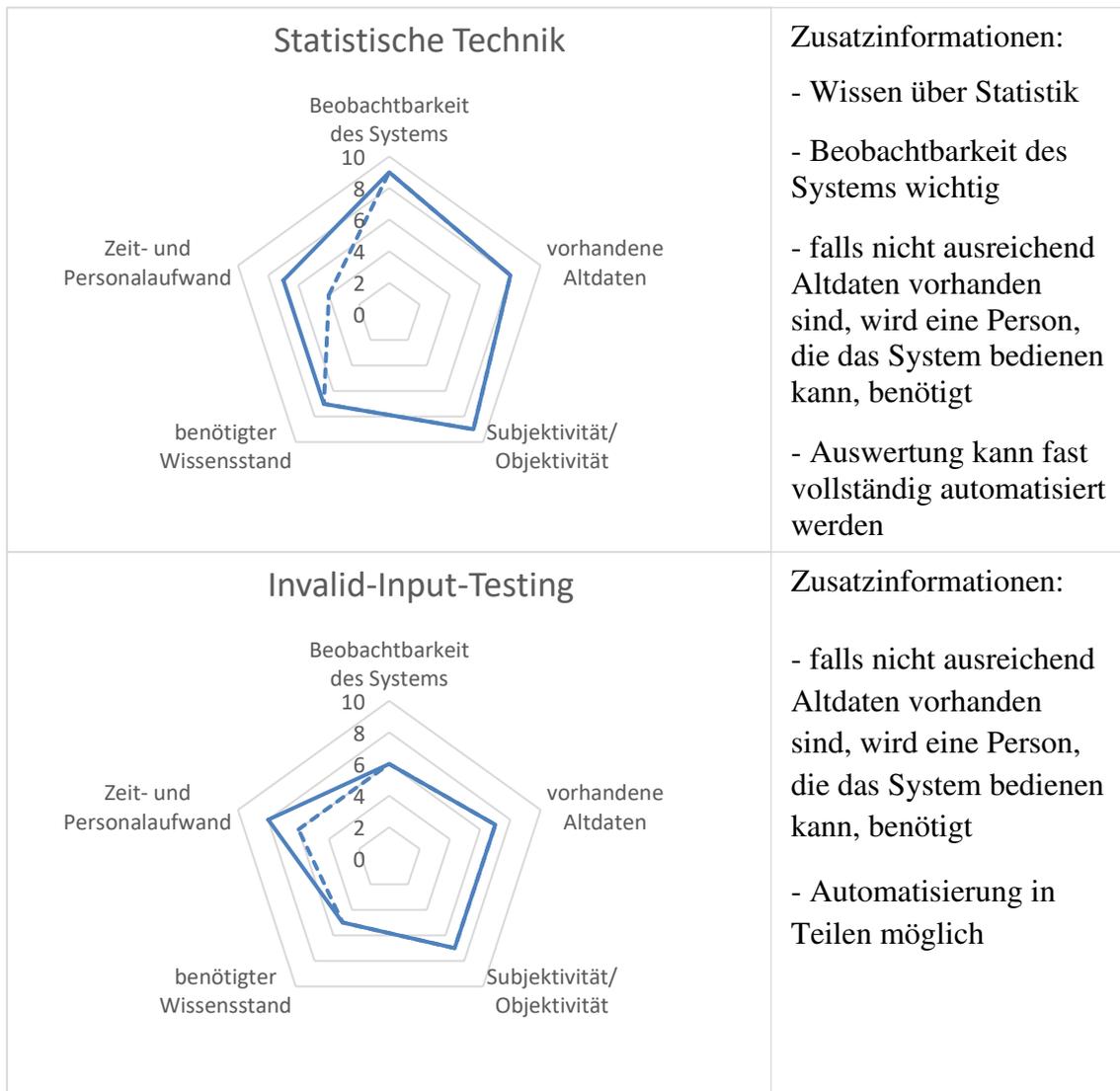


Abbildung 10: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 14 und 16

#### 4.4 Fazit bezüglich der Gruppierung von V&V-Techniken

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Bewertung und Einschätzung der entwickelten Gruppierungskriterien. Dabei wird insbesondere die Anwendung der entwickelten Kriterien in Abschnitt 4.3 erläutert und bewertet.

Die Gruppierung der Techniken basierend auf den in Abschnitt 4.2 entwickelten Kriterien bietet eine einfach nachvollziehbare Entscheidungsstruktur. Durch die Bewertung mithilfe von diskreten Kriterien können bereits nicht anwendbare Techniken ausgeschlossen werden. Bei der Anwendung der diskreten Kriterien fällt allerdings auf, dass keine wei-

tere Differenzierung der Technik-Sets mit der Einteilung „es ist kein reales System vorhanden“ erfolgt. Dies könnte auf die kleine Stichprobengröße an V&V-Techniken zurückzuführen sein. Auch wenn bei der Auswahl von beispielhaften Techniken auf ein breites Spektrum von Charakteristika geachtet wurde (vgl. Abschnitt 4.1), wird dieser Aspekt durch die Beschränkung auf zehn V&V-Techniken limitiert. Dass die Unterteilung nach unterschiedlichen Entwicklungsständen des Modells sinnvoll ist, wird durch die Unterteilung im Zweig „es existiert ein reales System“ verdeutlicht. Allerdings fällt auch hier auf, dass kein Unterschied zwischen den Sets „ein reales System existiert, Programmcode vorhanden“ und „ein reales System existiert, ein lauffähiges Programm liegt vor“ vorliegt.

Die weitere Bewertung der Techniken erfolgt durch die Erstellung von Netzdiagrammen. Die Beurteilungen der unterschiedlichen Kriterien erfolgt basierend auf Literaturrecherche und persönlichen Einschätzungen nach vorangegangener Analyse (vgl. Abschnitt 4.2). Dennoch sind die Bewertungen der Kriterien sehr subjektiv. Die Netzdiagramme ermöglichen eine gute und schnelle visuelle Vergleichsmöglichkeit der Eigenschaften der unterschiedlichen Techniken. Dabei ist aber zu beachten, dass die Kriterien teils die Eigenschaften der Technik widerspiegeln und teils die Anforderungen an die Rahmenbedingungen zur Durchführung der Technik darstellen. Diese Unterscheidung wird jedoch nicht im Netzdiagramm dargestellt.

Die entwickelte Einteilung differenziert wie auch bereits vorgestellte Gruppierungsansätze (vgl. Abschnitt 3.3) nach dem Entwicklungsstand des Modells. Dabei ist die bisher getroffene Einteilung der entwickelten Gruppierungskriterien allerdings recht grob (vgl. Abschnitt 4.4). Weiter wird auch der Kosteneffekt wie bei dem vorgestellten Gruppierungsansatz nach Wang (vgl. Abschnitt 3.3) berücksichtigt, allerdings nur implizit durch unterschiedliche Kriterien wie beispielsweise Zeit- und Personalaufwand. Im Gegensatz zu anderen vorgestellten Gruppierungsansätzen wird ein Hauptaugenmerk auf die Anforderungen und Eigenschaften der Kriterien gelegt und diese dann mit den Möglichkeiten, die das bis zum betrachteten Zeitpunkt entwickelte Modell bietet, abgeglichen. Dies bietet die Möglichkeit, dass die unterschiedlichen Eigenschaften der V&V-Techniken optimal genutzt werden können.

Insgesamt bietet das entwickelte Konzept – zunächst Unterteilung nach diskreten Kriterien und anschließende Darstellung von Eigenschaften von anwendbaren V&V-Techniken – eine nachvollziehbare Entscheidungshilfe zur Wahl einer V&V-Technik zu einem beliebigen Zeitpunkt der Entwicklung eines Modells.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Thematik der V&V nimmt mit zunehmendem Einsatz von Simulationen an Bedeutung zu. Dies ist auch der Fall im Bereich der Simulation von SCs. Die Wahl passender V&V-Techniken in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen des Simulationsmodells ist somit von Bedeutung. Dieser Vorgang wird in dieser Arbeit näher betrachtet.

Zunächst wurden die Grundlagen der Modellierung betrachtet. Dabei erfolgte eine Definition der Anwendungsdomäne der in dieser Arbeit betrachteten V&V-Techniken (vgl. Abschnitt 2.1). Die im Anschluss erfolgte Erarbeitung von Grundlagen der Simulation diente einer näheren Charakterisierung der allgemeinen Anwendungsdomäne von V&V-Techniken. Dabei wurden unter anderem die Modellentwicklungsprozesse nach Sargent und Brade berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2), die klar die Notwendigkeit und Wichtigkeit der V&V herausstellen. Um die Simulation von SCs näher einzuordnen, erfolgte in Abschnitt 2.3 eine Einordnung von unterschiedlichen Modellierungsmöglichkeiten. Zudem wurde die DES als mögliche Simulationsform für SCs identifiziert. Da der Hauptaspekt der Arbeit die Gruppierung von V&V-Techniken betrifft, wurden in Kapitel 3 explizit diese untersucht. Dabei wurde in Abschnitt 3.1 die Verbindung der V&V zur Softwareentwicklung hergestellt. Die anschließende Vorstellung von beispielhaft ausgewählten V&V-Techniken in Abschnitt 3.2 bildet die Grundlage für die spätere Analyse der Techniken (vgl. Abschnitt 4.2). Diese Techniken wurden basierend auf den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Gruppierungsansätzen in der Literatur ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.1). Basierend auf der Analyse der V&V-Techniken wurden diskrete und kontinuierliche Gruppierungskriterien entwickelt. Um die Anwendbarkeit in kleinem Maßstab zu überprüfen, wurden die entwickelten Kriterien angewendet (vgl. Abschnitt 4.3). Die Einschätzung der Anwendbarkeit der Gruppierungskriterien erfolgte in Abschnitt 4.4.

Auf Grundlage des Fazits in Abschnitt 4.4 ergeben sich viele Ansatzpunkte für weitere Anwendungen. Die geringe Anzahl an ausgewählten V&V-Techniken birgt die Gefahr von falschen Schlussfolgerungen bezüglich möglicher Kriterien. Eine größere Menge an V&V-Techniken und eine genauere Analyse dieser kann zu einer Erweiterung bzw. Verfeinerung der Gruppierungskriterien führen. Wie im Fazit festgestellt, ist die Einschätzung der V&V-Techniken sehr subjektiv. Aus diesem Grund wäre eine Einschätzung eines Experten für V&V, der bereits eine Vielzahl von Techniken durchgeführt hat, wün-

---

schenswert. So ist bspw. die Einschätzung von Zeit- und Personalaufwand ohne praktische Erfahrung schwierig. Da der Aufwand und die Anforderungen an V&V-Techniken auch von dem zu modellierenden System abhängig sind, wäre die Anwendung von Fallbeispielen sinnvoll. Auf diese Weise können die Praktikabilität der Gruppierungskriterien überprüft sowie Schwächen und Stärken aufgezeigt werden.

## Literaturverzeichnis

- Allen, N. A./Shaffer, C. A./Watson, L. T. (2005). Building Modeling Tools That Support Verification, Validation, and Testing for the Domain Expert. In: Michael E. Kuhl (Hg.). Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Hilton at the Walt Disney World Resort, Orlando, Florida, U.S.A., Dec 4-7, 2005, Winter Simulation Conference, 2005, Orlando, FL. USA, Dec. 4, 2005. New York, N.Y, Piscataway, N.J, Association for Computing Machinery, 419–426.
- Arnold, Dieter/Isermann, Heinz/Kuhn, Axel/Tempelmeier, Horst/Furmans, Kai (2008). Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Balci, Osman (1997). Verification validation and accreditation of simulation models. In: Sigrún Andradóttir/Kevin J. Healy/David H. Withers et al. (Hg.). 1997 Winter Simulation Conference Proceedings, the 29th conference, Atlanta, Georgia, United States, 12/7/1997 - 12/10/1997. Piscataway, IEEE, 135–141.
- Balci, Osman (1998a). Verification, validation, and accreditation. In: D. J. Medeiros (Hg.). 1998 Winter Simulation Conference. Proceedings : Grand Hotel, Washington, D.C., 13-16 December, 1998, IEEE Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 13-16 Dec. 1998. Piscataway, N.J, New York, N.Y, San Diego, Calif, IEEE, 41–48.
- Balci, Osman (1998b). Verification, Validation, and Testing. In: Jerry Banks (Hg.). Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, Chichester, Weinheim, Wiley, 335–396.
- Banks, Jerry (1998). Principles of Simulation. In: Jerry Banks (Hg.). Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, Chichester, Weinheim, Wiley, 3–30.
- Blackstone, John H. (Hg.) (2010). APICS dictionary. 13. Aufl. Alexandria, VA, APICS.
- Brade, D. (2000). Enhancing modeling and simulation accreditation by structuring verification and validation results. In: 2000 Winter Simulation Conference, WSC 2000, Winter Simulation Conference, Orlando, FL, USA, 10-13 Dec. 2000. Piscataway, IEEE, 840–848.
- Carson, J. S. (2002). Model verification and validation. In: Enver Yücesan (Hg.). Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. Manchester Grand Hyatt San Diego, San Diego, CA, U.S.A., December 8-11, 2002, 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, CA, USA, 8-11 Dec. 2002. New York, N.Y, Piscataway, N.J, Association for Computing Machinery, 52–58.
- Chopra, Sunil/Meindl, Perter (2004). Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation. 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education Inc.
- EN ISO 19011. Leitfaden zur Auditierung von Managementsystemen, 2018. Berlin.
- Günther, Hans-Otto/Tempelmeier, Horst (2003). Produktion und Logistik. 5. Aufl. Berlin, Springer.
- Hollocker, C. P. (1987). The standardization of software reviews and audits.

- Kaczmarek, Michael/Stüllenberg, Frank (2002). Decision Support by Model Based Analysis of Supply Chains. In: Stefan A. Seuring/Maria Goldbach (Hg.). Cost management in supply chains. Heidelberg, New York, Physica-Verlag, 273–288.
- Kleijnen, Jack P.C. (2005). Supply chain simulation tools and techniques: a survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling* 1 (1/2), 82. <https://doi.org/10.1504/ijspm.2005.007116>.
- Kuhn, Axel/Rabe, Markus (Hg.) (1998). Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Kumar, Pavan/Syed, Khasim (2011). Software Testing. Goals, Principles, and Limitations. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology (IJESAT)* (9), 52–56. <https://doi.org/10.5120/1343-1448>.
- Law, Averill M. (2008). How to build valid and credible simulation models. In: Scott J. Mason (Hg.). 2008 Winter Simulation Conference. (WSC 2008) ; Miami, Florida, USA, 7 - 10 December 2008 , 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami, FL, USA, 12/7/2008 - 12/10/2008. Piscataway, NJ, IEEE, 39–47.
- Law, Averill M. (2015). Simulation modeling and analysis. New York, NY, McGraw Hill Education.
- Law, Averill M. (2019). How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: N. Mustafee (Hg.). 2019 Winter Simulation Conference (WSC), 2019 Winter Simulation Conference (WSC), National Harbor, MD, USA, 12/8/2019 - 12/11/2019. [Piscataway, NJ], IEEE, 1402–1414.
- Lee, Young Hae/Cho, Min Kwan/Kim, Seo Jin/Kim, Yun Bae (2002). Supply chain simulation with discrete–continuous combined modeling. *Computers & Industrial Engineering* 43 (1-2), 375–392. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00080-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00080-3).
- Maria, Anu (1997). Introduction to modeling and simulation. In: Sigrún Andradóttir/Kevin J. Healy/David H. Withers et al. (Hg.). 1997 Winter Simulation Conference Proceedings, the 29th conference, Atlanta, Georgia, United States, 12/7/1997 - 12/10/1997. Piscataway, IEEE, 7–13.
- Mentzer, John T./DeWitt, William/Keebler, James S./Min, Soonhong/Nix, Nancy W./Smith, Carlo D./Zacharia, Zach G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Journal of Business Logistics* 22 (2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>.
- Perry, William E. (2006). Effective methods for software testing. 3. Aufl. Indianapolis, IN, Wiley.
- Rabe, Markus/Spieckermann, Sven/Wenzel, Sigrid (2008). Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Radatz, J. W. Analysis of IV&V Data. Tech. Report RADC-TR-81-145.
- Robinson, Stewart (2004). Simulation: The practice of model development and use. Chichester, John Wiley & Sons.
- Sargent, R. G. (2000). Verification, validation and accreditation of simulation models. In: 2000 Winter Simulation Conference, WSC 2000, Winter Simulation Conference, Orlando, FL, USA, 10-13 Dec. 2000. Piscataway, IEEE, 50–59.
- Sargent, Robert G. (2013). An introduction to verification and validation of simulation models. In: Raghu Pasupathy (Hg.). Winter Simulation Conference (WSC), 2013.

- 8 - 11 Dec. 2013, JW Marriott, Washington, DC, USA ; [including the 9th International Conference on] Modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing (MASM 2013), 2013 Winter Simulation Conference - (WSC 2013), Washington, DC, USA, 12/8/2013 - 12/11/2013. Piscataway, NJ, IEEE, 321–327.
- Sargent, Robert G./Balci, Osman (2017). History of verification and validation of simulation models. In: Wai Kin Chan/Andrea D'Ambrogio/Grégory Zacharewicz et al. (Hg.). WSC'17. 2017 Winter Simulation Conference : December 3-6, 2017, Red Rock Casino Resort & Spa, Las Vegas, NV, 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, 12/3/2017 - 12/6/2017. Piscataway, NJ, IEEE, 292–307.
- Sargent, Robert G./Goldsmann, David M./Yaacoub, Tony (2016). A tutorial on the operational validation of simulation models. In: Theresa M. Roeder/Peter I. Frazier/Robert Szechtman et al. (Hg.). Simulating complex service systems. WSC'16 - Winter Simulation Conference : Crystal Gateway Marriott, Arlington, VA, December 11-14, 2016, 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, DC, USA, 12/11/2016 - 12/14/2016. Piscataway, NJ, IEEE, 163–177.
- Schruben, Lee W. (1980). Establishing the credibility of simulations. *SIMULATION* 34 (3), 101–105. <https://doi.org/10.1177/003754978003400310>.
- Stadtler, Hartmut/Kilger, Christoph/Meyr, Herbert (2015). *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Terzi, Sergio/Cavalieri, Sergio (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in Industry* 53 (1), 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00104-0).
- U. S. National Bureau of Standards (1983). *Guideline for Lifecycle Validation, Verification, and Testing of Computer Software*. Washington, D.C.
- VDI 3633. Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*, 2014. Berlin.
- Wallace, D. R./Fujii, R. U. (1989). Software verification and validation: an overview. *IEEE Software* 6 (3), 10–17. <https://doi.org/10.1109/52.28119>.
- Wang, Zhongshi (2013). Selecting verification and validation techniques for simulation projects: A planning and tailoring strategy. In: Raghu Pasupathy (Hg.). Winter Simulation Conference (WSC), 2013. 8 - 11 Dec. 2013, JW Marriott, Washington, DC, USA ; [including the 9th International Conference on] Modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing (MASM 2013), 2013 Winter Simulation Conference - (WSC 2013), Washington, DC, USA, 12/8/2013 - 12/11/2013. Piscataway, NJ, IEEE, 1233–1244.
- Wenzel, Sigrid/Collisi-Böhmer, Simone/Pitsch, Holger/Rose, Oliver/Weiß, Matthias (2008). *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Werner, Hartmut (2008). *Supply-chain-Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling* ;. 3. Aufl. Wiesbaden, Gabler.
- Whitner, R. B./Balci, O. (1989). Guidelines for selecting and using simulation model verification techniques. In: Edward A. MacNair/Kenneth J. Musselman/Philip Heidelberger (Hg.). 1989 Winter Simulation Conference proceedings. December 4-6, 1989, the Capital Hilton Hotel, Washington, D.C., the 21st conference,

Washington, D.C., United States, 12/4/1989 - 12/6/1989. New York, NY, s.l., Institute of Electrical and Electronics Engineers, 559–568.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellentwicklungsprozess nach Sargent 2013 .....	5
Abbildung 2: V&V Phasen und Subphasen (Brade 2000) .....	8
Abbildung 3: Flussdiagramm zur Auswertung diskreter Kriterien .....	33
Abbildung 4: Netzdiagramm zur Bewertung der kontinuierlichen Kriterien.....	35
Abbildung 5: Anwendung des Flussdiagramms .....	37
Abbildung 6: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 1, 3, 5, 7, 9 und 11 .....	39
Abbildung 7: Netzdiagramm zu V&V-Technik-Sets 2, 4, 6, 8 und 10 .....	40
Abbildung 8: Netzdiagramme zum V&V-Technik-Set 12.....	40
Abbildung 9: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 13 und 15 .....	42
Abbildung 10: Netzdiagramme zu V&V-Technik-Sets 14 und 16 .....	44

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gruppierungskriterien für V&V-Techniken.....	34
Tabelle 2: Bewertung von V&V-Techniken anhand diskreter Kriterien .....	36

## Abkürzungsverzeichnis

bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
DES	ereignisdiskrete Simulation (Discrete-Event Simulation)
SC	Supply Chain
V&V	Verifikation und Validierung
vgl.	vergleiche