

2 Stand der Forschung und Technik

In diesem Abschnitt sollen die für diese Ausarbeitung wesentlichen theoretischen Grundlagen geschaffen sowie ein Überblick über die relevanten Veröffentlichungen gegeben werden. Begonnen wird mit einer kurzen Einführung in die Modellbildung und Simulation mit besonderem Fokus auf deren Verwendung in der Automobilentwicklung. Anschließend werden die aktuell gängigen Methoden zur Überprüfung der Korrektheit von Simulationsmodellen vorgestellt. Der letzte Teil enthält eine Übersicht über die wichtigsten Veröffentlichungen zu Untersuchungen zur Genauigkeit von Simulationsergebnissen.

2.1 Modellbildung und Simulation in der Entwicklung

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, nimmt die Simulationstechnik in der Produktentwicklung, insbesondere in der Fahrzeugentwicklung, eine immer wichtigere Stellung ein. Sie ermöglicht bei richtiger Verwendung Zeit, Ressourcen und Kosten zu sparen. Durch den korrekten Einsatz der Simulationstechnik kann früher ein höherer Produktreifegrad in der Entwicklung erreicht werden. Dies ist vor dem Hintergrund der allgemein angestrebten fortlaufenden Optimierung der Entwicklungsprozesse und der damit einhergehenden Verkürzung der Entwicklungszeiten von großer Bedeutung.

2.1.1 Begriffsdefinitionen

Um das gleiche Verständnis wichtiger Begriffe im Bereich Modellbildung und Simulation sicherzustellen, werden hier einige wichtige Sachverhalte definiert.

2.1.1.1 System

Der Begriff *System* verfügt über eine Vielzahl an Bedeutungen, wie z.B. die sieben verschiedenen Definitionen im Duden zeigen. In dem hier verwendeten Kontext wird die für die Bereiche Naturwissenschaften, Physik und Biologie geltende Definition als gültig angesehen:

„System: [...] Gesamtheit von Objekten, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden und durch die Wechselbeziehungen untereinander abzugrenzen sind.“ [14]

Die Definition in der VDI¹ Richtlinie 3633 verfügt über eine technische Sichtweise, die mehr auf die Kennzeichen eines *Systems* eingeht:

„System: Abgegrenzte Anordnung von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen. Anmerkung 1: Das System ist gekennzeichnet durch: Systemgrenze, Systemein- und -ausgangsgrößen, Subsysteme, Systemelemente, Aufbaustruktur.“ [15]

Auf eine Definition aus dem angelsächsischen Raum von Averill M. Law sei hier nur verwiesen, da sie sinngemäß mit der obigen übereinstimmt. [16] Ein *System* ist demnach eine Gruppe an Elementen, die durch die Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt werden und miteinander in einem Zusammenhang stehen. Der Austausch mit der Umgebung erfolgt ausschließlich über die Systemeingänge und -ausgänge.

2.1.1.2 Simulation

Das Wort *Simulation* stammt vom lateinischen Substantiv *simulatio* und bedeutet *Vor-spielung, Nachahmung*. [14] Durch diese einfache Worterklärung wird deutlich, was die Simulation im Kern ist: Die Nachahmung von etwas, das sie selber aber nicht ist. In der VDI Richtlinie 3633 wird der Begriff folgendermaßen definiert:

„Simulation: Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [15]

Die *Simulation* ist somit ein Hilfsmittel, um Informationen über das Verhalten des nachgebildeten Systems zu erhalten, welche aus verschiedenen Gründen nicht direkt erlangt werden können. Eine Übersicht über Gründe für die Verwendung von *Simulationen* kann unter anderem bei Sauerbier nachgeschlagen werden. [17]

2.1.1.3 Modell

Der Begriff *Modell* ist elementar in der Simulationstechnik. In der VDI Richtlinie 3633 ist folgende Definition zu finden:

„Modell: Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“ [15]

Mit dieser Definition wird eine wichtige Eigenschaft beschrieben. Es handelt sich bei *Modellen* um „vereinfachte Nachbildungen“ eines Systems. In einem *Modell* werden nur die für die aktuelle Fragestellung relevanten Aspekte eines Systems nachgebildet. Daraus folgt auch, dass mit einem vorhandenen *Modell* nicht jede denkbare Fragestellung bezüglich des abgebildeten Systems beantwortet werden kann.

¹ VDI – Verband deutscher Ingenieure e.V.

Box schreibt:

„Essentially, all models are wrong, but some are useful.” [18]

Dies beschreibt eine hilfreiche skeptische Grundhaltung, die bei der Verwendung von Simulationsmodellen vorherrschen sollte. Methoden, um die Verwendbarkeit von *Modellen* zu bewerten, werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt.

Ein *Modell* kann sowohl physikalisch/körperlich (engl.: *physical*) als auch mathematisch sein. [16] Allseits bekannte Beispiele für *physikalische Modelle* sind z.B. Modellautos oder Modelleisenbahnen. In der Entwicklung werden maßstabsgetreue *Modelle* von z.B. Fahrzeugen oder Flugzeugen in Strömungskanälen verwendet, um das Strömungsverhalten des realen Systems zu untersuchen. Architekten verwenden *Modelle* der geplanten Gebäude, um ihren Kunden einen besseren Eindruck des Aussehens vermitteln zu können. Neben den *physikalischen Modellen* stehen die *mathematischen Modelle*. Diese versuchen mit Hilfe von mathematischen Gleichungen, die auf naturwissenschaftlichen oder logischen Gesetzen basieren, das Verhalten des realen Systems abzubilden. Ein sehr einfaches Beispiel ist die Ermittlung der Geschwindigkeit v eines Fahrzeugs durch die Messung der Zeit Δt zwischen zwei Punkten bekannten Abstands s mit der Gleichung $v = s/(\Delta t)$. Babuska und Tinsely definieren darüber hinaus noch das *rechnergestützte Modell* (engl.: *computerized model*), welches die Umsetzung des mathematischen *Modells* in ein auf dem Rechner lauffähiges *Modell* ist. [19] Diese Unterscheidung ist wichtig, da Berechnungen auf Computern diskret stattfinden und deshalb die meist für kontinuierliche Zeit- und Wertebereiche aufgestellten mathematischen Gleichungen angepasst werden müssen. Auf den so möglicherweise entstehenden Diskretisierungsfehler wird in Abschnitt 2.3 eingegangen.

2.1.2 Simulationstechnik in der Fahrzeugentwicklung

Simulationen können in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden. Im Bild 2.1 ist eine Übersicht der in die beiden Gruppen unterteilten verschiedenen Typen von Simulationen in der Automobiltechnik zu sehen.

Auf der einen Seite steht die reale Simulation, die auch häufig Test genannt wird. Hierbei handelt es sich um Versuche, die unter klar definierten Bedingungen durchgeführt werden. Sie sollen Aufschluss über das Verhalten des Systems geben. Diese werden entweder mit dem realen System oder mit einem physikalischen Modell des Systems durchgeführt. Beispiele aus der Automobilentwicklung sind Crashtests zur Untersuchung des Verformungsverhaltens der Fahrzeugstrukturen, Aerodynamiktests im Windkanal zur Ermittlung des Strömungsverhaltens eines Fahrzeugs, Fahrversuche

zur Bewertung des Fahrverhaltens des Fahrzeugs und Prüfstandsversuche zur Untersuchung des Verhaltens von Fahrzeugkomponenten in bestimmten Situationen und Betriebszuständen.

Auf der anderen Seite stehen die virtuellen Simulationen, die in den Entwicklungsabteilungen der Automobilindustrie auch eine sehr wichtige Rolle spielen. [1] Virtuelle Simulation werden in der Produktentwicklung mit rechnergestützten Modellen, d.h. ausschließlich mit Abbildungen realer Systeme, durchgeführt. Häufig eingesetzte virtuelle Simulationen sind die FEM² z.B. in der Crashtestsimulation, die MKS³ z.B. zur Berechnung der Fahrwerkskinematik, die CFD⁴ Simulation zur Ermittlung des aerodynamischen Verhaltens des Fahrzeugs und die signal- und datenflussorientierten Simulationen z.B. zur Untersuchung des Verhaltens des Steuergeräteverbunds im Fahrzeug. Beispiele für die genannten virtuellen Simulationen sind in den Bild 2.2-5 zu sehen.

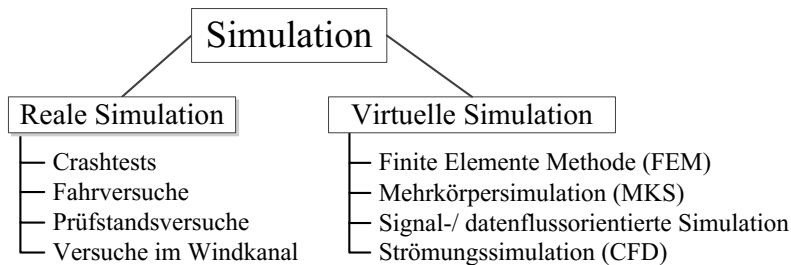


Bild 2.1: Verschiedene Simulationsarten in der Fahrzeugentwicklung

2.1.3 Relevante Entwicklungen der Simulationstechnik in der Automobilentwicklung

Diese Arbeit stellt eine neue Methode in der Verwendung von signalflussorientierten Simulationen vor. Aus diesem Grund werden hier nur die für diesen Bereich der Simulationstechnik relevanten Entwicklungen dargestellt.

² FEM – Finite Elemente Methode

³ MKS – Mehrkörpersimulation

⁴ CFD – Computational Fluid Dynamics (engl. *numerische Strömungsmechanik*)

Die Komplexität in der Fahrzeugentwicklung nimmt stetig zu. Das Automobil wird durch die steigende Zahl an mechatronischen Komponenten, welche Assistenz-, Regel- oder Komfortfunktionen erfüllen und durch die in den letzten Jahren stark vorangetriebene Integration von Hybridsystemen zunehmend komplexer. [20] Neben der bloßen Zahl an Systemen steigt die Komplexität auch durch die Verknüpfung und Abhängigkeit der Komponenten untereinander. [21] Außerdem führt die Modularisierung und die Einführung von Baukästen in der Fahrzeugentwicklung zu einer Potenzierung der Varianten in der Fahrzeugkonzeptentwicklung. Dies hat eine weitere Steigerung der Komplexität in der Entwicklung zur Folge, wie im Bild 2.6 verdeutlicht wird. Die Vorteile durch die Nutzung von Baukästen müssen durch die Beherrschung dieser zusätzlichen Komplexität sichergestellt werden. [22, 23]

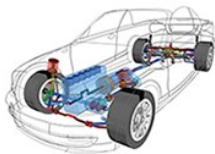


Bild 2.2: MKS Modell Fahrwerk und Antriebsstrang [Quelle: SIMPACK GmbH]

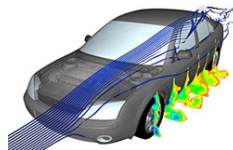


Bild 2.3: CFD Simulation [Quelle: FKFS]



Bild 2.4: FEM Crashesimulation [Quelle: Volkswagen AG]

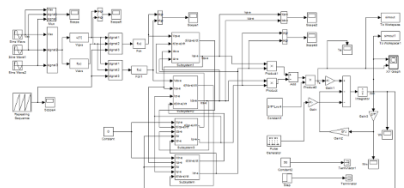


Bild 2.5: Signalflussorientiertes Simulationsmodell [Quelle: The Mathworks]

Neue Entwicklungen in der Simulationstechnik unterstützen den Entwickler in der Beherrschung der steigenden Komplexität in der Automobilentwicklung. Dazu zählen unter anderem neue Methoden und die steigende Leistungsfähigkeit der Rechner. Außerdem hält die Modularisierung auch in der Simulationstechnik Einzug. Es werden vermehrt modulare Fahrzeugmodelle und dazugehörige Modellbibliotheken verwendet, auch mit dem Ziel, Komponenten einfach und schnell auszutauschen. Ein weiterer Grund zur Modularisierung leitet sich aus der Arbeitsteilung in der heutigen Automotiv-

bilentwicklung ab. Ein Großteil der Komponenten wird nicht mehr vom OEM⁵ selbst entwickelt, sondern von einer Vielzahl an Zulieferern und Dienstleistern. Diese liefern auch vermehrt Simulationsmodelle der von ihnen entwickelten Komponenten. Mit Hilfe von modular aufgebauten Fahrzeugmodellen können in kürzerer Zeit mehr Varianten eines Fahrzeugs oder verschiedene Komponenten miteinander verglichen werden. Durch die Ablage der Teilmodelle mit klar definierten Schnittstellen in eine Modellbibliothek kann Expertenwissen aus verschiedenen Quellen besser verfügbar gemacht und wiederverwendet werden. [1]

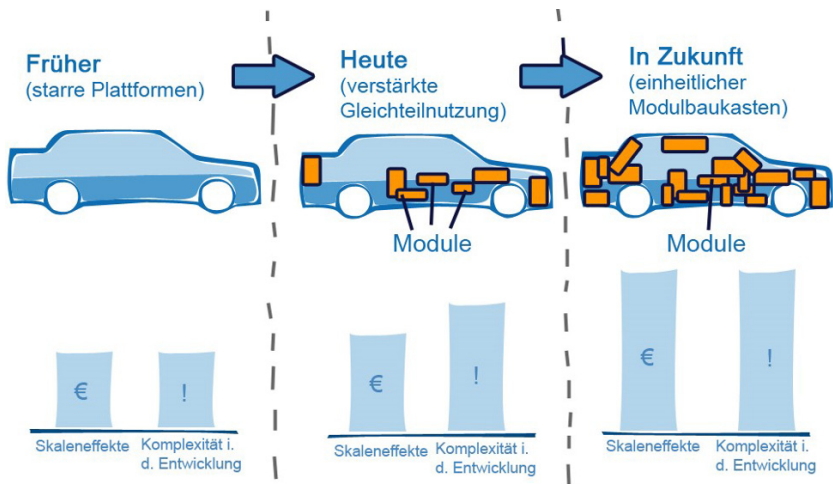


Bild 2.6: Komplexitätsmanagement in der Baukastengestaltung [Quelle: WZL⁶, RWTH Aachen]

Wie bereits erwähnt, sind einige modulare Systemmodelle mit dazugehöriger Modelldatenbank in der Industrie im Einsatz. Beispiele für kommerzielle Simulationsprogramme im Bereich der signalflossorientierten Fahrdynamik- und Antriebsstrangsimulation sind *DYN44* von der Tesis Dynaware GmbH [24] und *CarMaker* von der IPG Automotive GmbH [3].

⁵ OEM – Original Equipment Manufacturer (engl. *Erstausrüster*) – In der Automobilindustrie ist damit ein Unternehmen gemeint, das seine Produkte unter eigenem Namen auf dem Markt bringt (z.B. Volkswagen oder Toyota).

⁶ WZL- Werkzeugmaschinenlabor – Institut an der RWTH Aachen

Beide Programme nutzen die Berechnungs- und Simulationssoftware *Matlab* und *Simulink* von *The Mathworks* als Plattform. [25] Des Weiteren bietet die AVL List GmbH *AVL Cruise* mit besonderem Fokus auf Verbrauchs- und Fahrleistungsberechnungen an. [2] Beispiele für Entwicklungen durch den OEM sind *ISAR*⁷ von der BMW AG und *ITK GmbH* [26] zur Auslegung von Fahrwerksregelsystemen und *ONT*⁸ von der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG und dem FKFS⁹ zur schnellen Bewertung von Fahrzeugkonzepten in der Frühen Phase. [6]

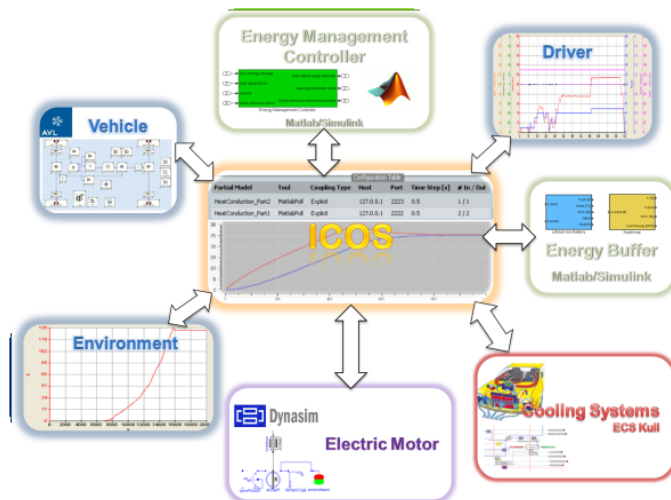


Bild 2.7: Ein Beispiel für verteilte Simulationen [Quelle: Area Vehicle Electrics/Electronics & Software, ViF¹⁰]

In vielen Unternehmen besteht aus einer Vielzahl an Gründen ein „Wildwuchs“ unterschiedlicher Simulationsumgebungen, häufig auch Insellösungen genannt. In den verschiedenen Abteilungen desselben Entwicklungsbereichs werden für die gleiche Aufgabe nicht immer die gleichen Simulationsprogramme und -modelle verwendet.

⁷ ISAR – Integrierte Simulationsumgebung für die Auslegung von Fahrdynamik mit Regelsystemen

⁸ ONT – OverNight Testing

⁹ FKFS – Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart

¹⁰ ViF – Virtuelles Fahrzeug: Forschungsinstitut Virtual Vehicle in Graz

Um Synergien nutzen zu können, Doppelarbeit zu vermeiden und die beste Lösung für Fragestellungen zu erhalten, wird seit einiger Zeit versucht, diesen Wildwuchs zu beseitigen oder zumindest einzudämmen. [1] Dies kann in einigen Fällen durch oben genannte Simulationsumgebungen unterstützt werden. Insbesondere für Gesamtsystemsimulationen, bei denen die Einflüsse der einzelnen Komponenten untereinander untersucht werden sollen, ist es vorteilhaft, alle Komponenten in einer Simulationsumgebung zu simulieren. Jedoch ist es in bestimmten Fällen nicht möglich, dass alle Simulationsaufgaben auf einer Simulationsplattform bearbeitet werden können. Die Gründe hierfür können vielfältig sein, z.B. bietet keines der verwendeten Programme die Möglichkeit alle Komponenten den Anforderungen entsprechend abzubilden. Häufig sind auch schon sehr gute Modelle in einer anderen Umgebung vorhanden und haben sich dort bewährt. Eine Konvertierung wäre zudem sehr zeit- und kostenintensiv.

Da aber die Fragestellungen auf Gesamtsystemebene trotzdem beantwortet werden müssen, gilt es einen Weg zu finden, die Simulationsmodelle auf unterschiedlichen Simulationsplattformen miteinander zu verbinden. Klassischerweise werden die Ergebnissdaten einer Simulation nach deren Abschluss in einer anderen Simulation als Eingangsdaten verwendet. Da aber in vielen Fällen die Systeme miteinander stark wechselwirken, ist dieser statische Informationsaustausch nicht immer sinnvoll oder möglich. Um die direkte Verknüpfung von Simulationsmodellen in verschiedenen Umgebungen zu ermöglichen, wird die verteilte Simulation, auch Co-Simulation genannt verwendet, wie im Bild 2.7 dargestellt.

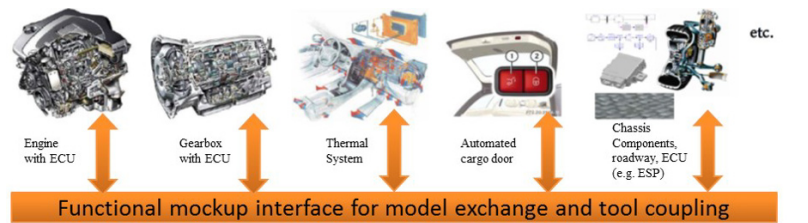


Bild 2.8: Funktionsweise von FMI [31]

In der Nutzung verteilter Simulationen können seit einigen Jahren sehr gute Erfolge verzeichnet werden. [27–29] Dabei können Simulationsmodelle in ihrer nativen Simulationsumgebung betrieben werden, wobei sie über Zwischenanwendungen die notwendigen Informationen austauschen können.

Ein bereits weit fortgeschrittenes Forschungsprojekt in diesem Bereich ist ICOS¹¹ vom Forschungsinstitut Virtual Vehicle in Graz. [30] Eine weitere Entwicklung in der Simulationstechnik ist die im Bild 2.8 gezeigte Standardisierung der Modellschnittstellen mit Hilfe von FMI¹². [31] Damit könnten viele Probleme, die aus der Verwendung von verschiedenen Simulationsumgebungen hervorgehen, umgangen werden. Hierbei soll der Modellaustausch über die Grenzen von Simulationsprogrammen hinweg erleichtert und die Möglichkeit der Co-Simulation unterstützt werden. FMI ermöglicht es, mit anderen Simulationswerkzeugen erstellte Modelle zu öffnen und zu verwenden. Falls sich dieser Standard etabliert, würde die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Entwicklungspartnern in der Simulationswelt erheblich erleichtert werden.

2.2 Methoden der Verifikation und Validierung

Bevor die Ergebnisse von Simulationen verwendet werden können, muss überprüft werden, ob die zur Simulation verwendeten Modelle korrekt sind. Die Überprüfung der Korrektheit von Modellen wird Verifikation und Validierung (kurz V&V) genannt. Der folgende Abschnitt beginnt mit der Definition der wichtigsten Begriffe in diesem Umfeld, um anschließend eine kurze Einführung zu Methoden der V&V und vorhandenen Vorgehensmodellen zu geben.

2.2.1 Begriffsdefinitionen

Die Begriffe *Verifikation* und *Validierung* werden in verschiedenen Wissenschaften und Branchen unterschiedlich verstanden und verwendet. Häufig werden diese Begriffe auch in ihrer Bedeutung verwechselt oder missverstanden. Aus diesem Grund folgt nun eine für diese Arbeit gültige Definition der wichtigsten Begriffe aus dem Umfeld der V&V.

2.2.1.1 Verifikation

Der Begriff *Verifikation* hat in der Simulationstechnik eine von seiner Bedeutung in der Produktentwicklung leicht abweichende Bedeutung. In der Produktentwicklung liefert die *Verifikation* den Nachweis, dass ein Produkt laut den Spezifikationen erstellt ist. [32]

¹¹ ICOS – Independent Co-Simulation

¹² FMI – Functional Mockup Interface

Was ist aber bei einem Simulationsmodell unter einer Spezifikation zu verstehen? Dies hängt davon ab, wer der Auftraggeber des Simulationsmodells ist. Die Spezifikation könnte sich einerseits darauf beziehen, welches Systemverhalten im Modell abgebildet sein muss oder andererseits wie das Modell erstellt sein muss. Der Nachweis würde in diesen beiden Fällen unterschiedlich aussehen.

In der Simulationstechnik befasst sich die *Verifikation* mit der Überprüfung, ob das Simulationsmodell formell korrekt umgesetzt ist. Einfach formuliert, beantwortet die *Verifikation* die Frage: „Habe ich es richtig gemacht?“. Babuska und Tinsley setzen ihren Fokus auf die grundlegende Fähigkeit des Simulationsmodells das reale System zu repräsentieren:

„Verification: The process of determining if a computational model obtained by discretizing a mathematical model of a physical event and the code implementing the computational model can be used to represent the mathematical model of the event with sufficient accuracy.“ [19]

Die *Verifikation* überprüft also, ob die mathematischen Gleichungen, die das reale System beschreiben, korrekt im Simulationsmodell umgesetzt sind und die Diskretisierung des mathematischen Modells so gewählt ist, dass eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann. Dies deckt sich auch sehr gut mit der Definition von Coleman und Steele [9]. Carson betont in seiner Definition, dass der Kern der Verifikation die Suche nach Modellierungsfehlern ist:

“Verification occurs when the model developer exercises an apparently correct model for the specific purpose of finding and fixing modeling errors.“ [33]

Die Suche nach Fehlern in der Modellierung ist ein wichtiger Bestandteil der *Verifikation* und ist auch die Hauptaufgabe zahlreicher Verifikationsverfahren.

2.2.1.2 Validierung

Der Begriff *Validierung* wird in der Umgangssprache häufig synonym zu Verifikation verwendet. In der Simulationstechnik besteht jedoch ein klarer Unterschied zwischen den beiden Begriffen. Die VDI-Richtlinie 3633 liefert für den Begriff folgende Definition:

„Validierung: Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System, die sicherstellen soll, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt.“ [15]

Bei der *Validierung* wird überprüft, wie gut das Modellverhalten und das Systemverhalten übereinstimmen. Die *Validierung* beantwortet die Frage: „Habe ich das Richtige gemacht?“. Diese Überprüfung erfolgt immer konkret auf bestimmte Fragestellungen und Ziele hin. Die *Validierung* ist erfolgreich, falls das Modellverhalten vom System-

verhalten in einer konkreten Fragestellung maximal um einen vorher definierten Wert abweicht. Die Validität wird immer nur für tatsächlich überprüfte Fragestellung ermittelt und kann nicht pauschal auf jede Fragestellung ausgeweitet werden. Die Ursache hierfür liegt vor allem darin, dass ein Modell immer eine Vereinfachung des Systems darstellt. So kann ein Modell das abgebildete System nicht ausnahmslos in allen Bereichen ersetzen und damit auch nicht generell validiert sein. [34, 35] Stattdessen wird mit der *Validierung* überprüft, wie weit das Modellverhalten mit dem Systemverhalten in einem konkreten Szenario übereinstimmt. Eine erfolgreiche *Validierung* kann auch als der fehlgeschlagene Versuch gesehen werden, das Modell systematisch zu falsifizieren. [36]

2.2.2 Allgemeines zur V&V

Bevor im nächsten Abschnitt einzelne Verifikations- und Validierungstechniken vorgestellt werden, sollen einige grundlegenden Merkmale der V&V erläutert werden. Zuerst wird das Konzept zur Feststellung der Glaubwürdigkeit als Ziel der V&V beschrieben. Dann wird vorgestellt, welche in der Literatur definierten Kriterien zur erfolgreichen V&V und Eigenschaften von einer Validierungsmetrik erfüllt werden sollten. Abschließend werden die Arten von möglichen Fehlentscheidungen in Simulationsstudien beschrieben.

2.2.2.1 Glaubwürdigkeit

Laut Balci und Brade können in den meisten Fällen die Korrektheit und die Eignung eines Modells nicht (uneingeschränkt) nachgewiesen werden. [36, 37] Es sei aber von höchster Bedeutung die Glaubwürdigkeit eines Modells zu bestimmen. Nur unter dieser Voraussetzung kann das Modell sinnvoll eingesetzt werden. Hierfür wird vor der V&V festgelegt, welche Ergebnisse dabei mindestens erreicht werden müssen, damit das Modell für die konkrete Fragestellung als glaubwürdig gilt. Die Verfahren der V&V müssen dazu dienen, die Glaubwürdigkeit des Modells mit Hilfe von Beweisen und Indizien zu ermitteln. Die wahrgenommene Eignung eines Modells wird durch Verfahren der Validierung festgestellt. Hierzu gehören der Nachweis der Leistungsfähigkeit, der Wiedergabetreue und der Genauigkeit. Mit Verifikationsverfahren wird die Korrektheit des Modells ermittelt. Diese untergliedert sich in die Feststellung der Konsistenz und der Vollständigkeit. [36] Der Zusammenhang der Begriffe untereinander ist im Bild 2.9 zu sehen.

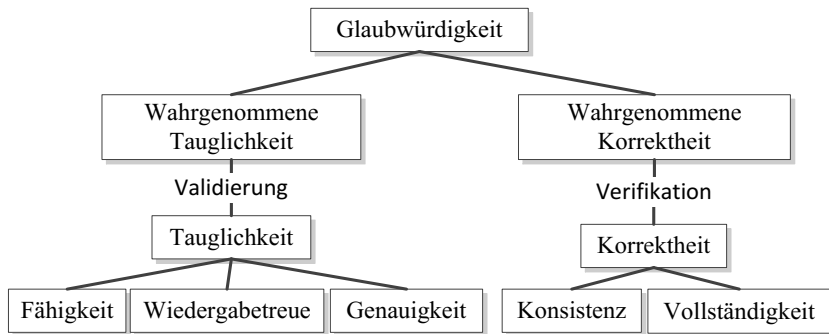


Bild 2.9: Abhängigkeiten im Begriffsumfeld der Validierung und Verifikation (übersetzt [36])

2.2.2.2 Kriterien für die V&V

Zu einer erfolgreichen V&V gehören eine umfassende Planung und ein strukturiertes Vorgehen. Balci stellt zwanzig *goldene Regeln* auf, die bei der V&V beachtet werden sollen. Diese reichen von organisatorischen Regeln, wie der vollständigen Integration von V&V in den Modellbildungs- und Simulationsprozess, über die Grundregeln zur Bewertung von Modellen bis hin zu Erfahrungen, z.B. dass vollständiges Testen bei großen und komplexen Systemen nicht möglich ist. [38] Diese Regeln sind zwar nicht nach ihrer Reihenfolge oder Wichtigkeit sortiert, sie helfen aber bei einer erfolgreichen Anwendung der Modellbildung und Simulation. Oberkampf und Barone stellen sechs Kriterien auf, welche von Validierungsmetriken¹³ erfüllt werden sollten. Sie beziehen sich vor allem auf die Berücksichtigung der Genauigkeit und Fehlerabschätzung. [39] Diese Themen werden in Abschnitt 2.3 weiter besprochen.

2.2.2.3 Fehlertypen bei der V&V

In Simulationsstudien können verschiedene Arten von Fehlern auftreten. Diese haben unterschiedlich große Auswirkungen auf die Simulationsstudien und das Vertrauen in den Einsatz der Simulationstechnik im Allgemeinen. Um die Simulationstechnik optimal einsetzen zu können, müssen die Fehler gefunden werden.

¹³ Validierungsmetrik – Ein definiertes Maß in der Validierung, um die Abweichung zwischen einem realen System und einem Modell zu bestimmen.

In der Statistik werden die Begriffe Fehler 1. Art ¹⁴ und Fehler 2. Art ¹⁵ zur Spezifikation von Fehlern bei der Überprüfung der Nullhypothese¹⁶ verwendet. Sargent hat diese Fehlerarten analog auf die Modellbildung und Simulation übertragen:

Demnach wird der Fehler 1. Art durch eine unberechtigte Ablehnung eines Modells in der V&V erreicht. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hierfür wird das *Risiko des Modellerstellers* genannt. In diesem Fall wird ein Modell, das die Anforderungen eigentlich erfüllt und für den Einsatz geeignet ist, verworfen. Dies hat zur Folge, dass die Simulationsergebnisse nicht verwendet werden können und, wenn Ressourcen dafür vorhanden sind, ein neues Modell erstellt werden muss. Der Fehler 2. Art tritt auf, wenn in der V&V ein vorhandener Modellfehler nicht erkannt wird. Die Auftrittswahrscheinlichkeit hierfür wird das *Risiko des Modellnutzers* genannt. Abhängig vom Einsatz der Simulationsergebnisse kann die Verwendung von falschen Ergebnissen unterschiedlich schwere Folgen haben. Diese Art von Fehlern sollte in sicherheitskritischen Bereichen unbedingt verhindert werden. [41] Balci erwähnt für die Modellbildung und Simulation außerdem den Fehler 3. Art. Dieser tritt auf, wenn die Abbildung des Modells die aktuelle Fragestellung nicht beantworten kann. Er kann z.B. durch fehlendes oder nicht ausreichendes Wissen der Modellentwickler über das abzubildende System hervorgerufen werden. [38]

2.2.2.4 Test von Teilmodellen

In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die ein modulares Gesamtfahrzeugmodell im Kontext der aktuellen Simulationsaufgabe in mehreren Schritten untersucht. Das Ziel ist es, eine Prognose der Ergebnisgenauigkeit zu ermöglichen. Hierbei werden die Module des Gesamtmodells zuerst einzeln betrachtet.

Der Test von Teilmodellen bietet sich an, wenn das Gesamtmodell aus vielen Komponenten besteht, die sinnvoll untergliedert werden können. Bei dieser Art von Test können sowohl Verifikations- wie auch Validierungsverfahren genutzt werden. [42] Auch die Teilmodelle werden einzeln untersucht, wobei für jede Teilkomponente Anforderungen vorhanden sein müssen, die geprüft werden können. Zur Validierung müssen meist Umgebungsmodelle erstellt werden, welche die fehlende Umgebung des Teilmodells nachbilden, um das Modellverhalten in der Zielumgebung bewerten zu

¹⁴ Fehler 1. Art – unberechtigte Ablehnung der Nullhypothese [40]

¹⁵ Fehler 2. Art – unberechtigte Beibehaltung der Nullhypothese [40]

¹⁶ Nullhypothese – Mit der Nullhypothese wird eine Annahme über einen Sachverhalt definiert, der durch Methoden der Statistik bestätigt oder falsifiziert wird [40]

können. Der Aufbau solcher Umgebungsmodelle ist mit Aufwand verbunden und lohnt sich nur, wenn häufig ähnliche Teilmodelle diesen Tests unterzogen werden. Der Aufwand ist von der Anzahl der Schnittstellen eines Teilmodells, der Menge der Daten, die in der Schnittstelle übergeben werden, und der Komplexität der Teilmodelle abhängig. Durch eine Parallelisierung der Einzeltests ist eine Verkürzung der Testdauer möglich. Ist dieser Aufwand zu groß, sollten diese Tests nicht durchgeführt werden. [43] Nach dem Test einzelner Komponenten werden mehrere Teilmodelle miteinander verbunden, um die Schnittstellen zwischen den Modulen in weiteren Tests zu überprüfen.

In der Flugzeugentwicklung sind aufgrund der höheren Systemkomplexität bereits länger modulare Simulationsmodelle im Einsatz. Zur Überprüfung der verwendeten Modelle werden diese automatisierten Tests unterzogen. Nach dem erfolgreichen Bestehen werden die Modelle in einer Modelldatenbank zur Verfügung gestellt. [44] Im Bild 2.10 ist ein Beispiel aus der Flugzeugentwicklung zu sehen, in dem anhand von definierten Randbedingungen teilautomatisiert Modelle aus Teilmodellen aufgebaut, getestet, Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet werden. So ist es möglich, die dort noch um ein Vielfaches höhere Variantenvielfalt zu beherrschen. [45]

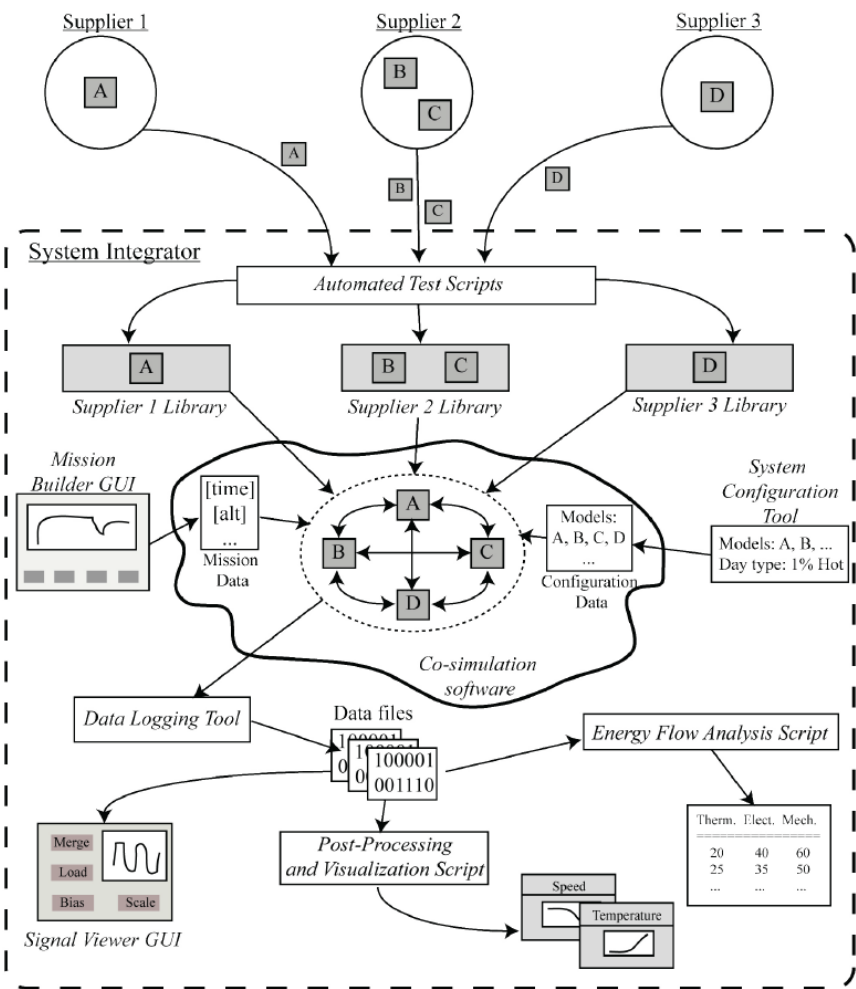


Bild 2.10: Beispiel für einen teilautomatisierten Modellaufbau, -test, Simulation und Auswertung in der Flugzeugentwicklung [45]

2.2.3 Verifikation

Die Verifikation stellt den ersten Schritt zur Feststellung der Glaubwürdigkeit des Modells dar. Wenn die Verifikation des Modells fehlschlägt, wird der Überprüfungsprozess beendet und die Validierung nicht begonnen. Die in der Verifikation gefundenen Fehler müssen also im Modell behoben werden, bevor die Bewertung des Modells fortgesetzt werden kann. Wie im Abschnitt 2.2.1 festgelegt, wird in der Verifikation – vereinfacht gesagt – nach formellen Fehlern im Modell gesucht. Auf der einen Seite wird die korrekte Umsetzung der Gleichungen im Modell überprüft und auf der anderen Seite muss sichergestellt werden, dass die Gleichungen in der Simulationsumgebung korrekt gelöst werden. Zu beachten ist, dass die Benennung der verschiedenen Verifikationsverfahren nicht eindeutig ist und sich in verschiedenen Veröffentlichungen unterscheidet. Außerdem sind nicht alle Verfahren für jede Art von Simulationsmodellen geeignet. An dieser Stelle sollen nur die für die signalflossorientierte Simulation wichtigsten Verifikationsverfahren kurz dargestellt werden. [5]

2.2.3.1 Schreibtischtest, Review, Walkthrough, Inspektion

Die vier Testmethoden Schreibtischtest, Review¹⁷, Walkthrough¹⁸ und Inspektion sind sich sehr ähnlich. In all diesen Methoden gehen Entwickler das Simulationsmodell schrittweise durch und überprüfen es.

Im Schreibtischtest (engl. *self inspection*) überprüft der Modellersteller selbst sein Modell auf Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit und Eindeutigkeit. Diese Methode eignet sich besonders zu Beginn einer Modellierungsaufgabe, wenn ein Modell noch nicht sehr komplex ist. [47] Ein großer Nachteil des Schreibtischtest ist die Gefahr, dass Fehler nicht erkannt werden. Dies kann unbeabsichtigt geschehen, weil ein Modellentwickler dazu neigt seine eigenen Fehler zu übersehen. [48] Es könnte aber auch sein, dass er versucht seine Fehler zu vertuschen. [49] Um diese Fehlermöglichkeit auszuschließen, wird der Schreibtischtest oft von einer anderen Person als dem Modellentwickler durchgeführt.

Bei den Methoden Review, Walkthrough und Inspektion sind mehrere Personen beteiligt, die unterschiedliche Rollen einnehmen. Die einzelnen Schritte, die durchlaufen werden müssen, sind bei den Tests vorgegeben. Entweder erklärt der Modellentwickler den anderen Mitgliedern des Testteams Schritt für Schritt das Modell und je-

¹⁷ Review – engl. *Überprüfung* [46]

¹⁸ Walkthrough – engl. *Durchgang, Durchsprache* [46]

der Punkt kann entsprechend der Notwendigkeit diskutiert werden oder er bereitet vor dem Test Unterlagen vor, die dann gemeinsam durchgegangen und diskutiert werden. Die Ergebnisse werden meist in einem Protokoll festgehalten. [42, 48, 50]

Ein Vorteil dieser Methoden ist, dass das Expertenwissen und die Erfahrung von Mitarbeitern bei gewissenhafter Durchführung eine hohe Bewertungsqualität ermöglichen. Auf der anderen Seite birgt der hohe Ressourcen- und Kostenaufwand das Problem, dass mit dieser Methode keine große Anzahl an Modellen überprüft werden kann.

2.2.3.2 Semantik- und Syntax-Analysen

Die Semantik¹⁹- und die Syntax²⁰-Analysen sind zwei wichtige Methoden zur Verifikation. Beide Methoden werden auch sehr häufig in der Softwareentwicklung verwendet.

Bei der Semantik-Analyse werden die Quelltexte oder Skripte, die in Simulationsmodellen enthalten sind, darauf überprüft, ob diese die grammatikalischen Regeln der jeweiligen Programmier-/Modellersprache einhalten. [51] Hierbei wird kontrolliert, ob die im Code enthaltenen Zeichen, Wörter und Symbole bekannt sind. Dies geschieht bei den aktuellen Simulationsumgebungen meistens bereits automatisch durch einen Parser²¹ und muss somit nicht mehr explizit von Personen durchgeführt werden. Ein Vorteil der Semantik-Analyse ist, dass hierfür das erstellte Modell nicht vollständig sein muss. Die Analyse kann auch mit Fragmenten durchgeführt werden und ähnelt der einer einfachen Rechtsschreibkorrektur ohne Überprüfung der Syntax.

Die Syntax-Analyse überprüft, in welchem Zusammenhang die in einem Quelltext vorkommenden Zeichen, Wörter und Symbole zueinander stehen. Während bei der Semantik-Analyse nur überprüft wird, ob die einzelnen Elemente in einem Quellcode bekannt sind, wird bei der Syntax-Analyse untersucht, ob die Reihenfolge der Elemente sinnvoll ist und interpretiert werden kann. [5] Die Überprüfung wird ebenfalls meist von einem Compiler²² vorgenommen, indem er die einzelnen Bestandteile vor der Übersetzung in maschinenlesbare Befehle auf ihre syntaktische Korrektheit hin prüft.

¹⁹ Semantik – Auch Bedeutungslehre, Theorie von der Bedeutung von Wörtern oder Symbolen [14]

²⁰ Syntax – Auch Satzlehre, die korrekte Verknüpfung von Wörtern oder Symbolen [14]

²¹ Parser – Ein Computerprogramm, das eine syntaktische Analyse durchführt. [14]

²² Compiler – engl. *Übersetzungsprogramm* – Ein Programm, das Quelltext aus einer Ursprungssprache in eine Zielsprache übersetzt. [15]

2.2.3.3 Dimensionstest

Der Dimensionstest hilft dabei, fehlerhafte Gleichungen im Modell zu identifizieren. [42] Die Gleichungen können bereits bei der Aufstellung inkorrekt sein oder erst bei der Implementierung in das Modell fehlerhaft werden. Für diesen Test müssen die Einheiten und Dimension der verwendeten Größen bekannt sein. Es werden die rechte und linke Seite der Gleichungen betrachtet und über die enthaltenen Elemente die Dimensionen ermittelt. Stimmen diese auf den beiden Seiten der Gleichung nicht überein, so liegt ein Fehler vor. Der Dimensionstest lässt sich mit entsprechenden Einheitsdefinitions- und Umrechnungstabellen auch auf eine Überprüfung der Einheiten ausweiten. Außerdem ist es denkbar die Überprüfung der Einheiten auch an Operatoren jeglicher Art durchzuführen.

2.2.3.4 Datenflussanalyse

Die Datenflussanalyse ist eine Methode der Verifikation, bei der die Verwendung der Modellvariablen und ihre Transformationen betrachtet werden. [5] Es wird überprüft, ob alle Variablen eines Modells korrekt definiert und verwendet werden, die Wertebereiche der einzelnen Variablen eingehalten werden und bei Transformationen kein Informationsverlust der Daten stattfinden kann. Die Datenflussanalyse wird mit Hilfe eines Datenflussgraphen durchgeführt. In diesen werden die Variablen, Transformationen und deren Verknüpfung dargestellt. Hierfür sind verschiedene Zustände für Anomalien definiert, die deren Auftreten genau spezifizieren. Durch Datenflussanalyse können mit relativ wenig Aufwand sehr gut Fehler gefunden werden, da keine dynamischen Tests erforderlich sind und Werkzeuge vorhanden sind, um die Analyse zu unterstützen. [50, 52]

2.2.3.5 Black-Box Test

Der Black-Box²³ Test kann sowohl in der Validierung als auch in der Verifikation verwendet werden. Bei einem Black-Box Test ist kein Wissen über den Aufbau des Modells notwendig, da nur die Ein- und Ausgänge des Modells Gegenstand der Betrachtung sind. [5] Dem Modell werden definierte Eingangssignale zur Verfügung gestellt, um anschließend die Ausgangssignale zu untersuchen. Wird der Black-Box Test in der Verifikation verwendet, liegt der Fokus darauf, über die Kombinationen von verschiedenen Eingangssignalen zu überprüfen, ob das Modell durch interne Fehler

²³ Black-Box – engl. *schwarzer Kasten* – Ein System, über das nichts bekannt ist außer seinen Schnittstellen zur Umgebung. [15]

keinen Simulationsabbruch erzeugt und sich die Ausgangssignale innerhalb des definierten Wertebereiches bewegen. Ein offensichtlicher Nachteil beim Black-Box Test ist die fehlende Kenntnis über den Ursprung der Fehler. Dadurch, dass der Blick in das Modell nicht möglich ist, kann nicht festgestellt werden, wodurch ein fehlerhaftes Verhalten am Modellausgang erzeugt wird. Außerdem ist es auch möglich, dass sich mehrere Fehler innerhalb eines Modells aufheben und diese so nicht erkannt werden. Des Weiteren ist bei vielen Modelleingängen und großen Wertebereichen der Testaufwand relativ hoch. Aus den genannten Gründen ist es sinnvoll den Black-Box Test mit anderen Tests zu kombinieren. [50]

2.2.3.6 White-Box Test

Der White-Box²⁴ Test beschäftigt sich im Gegensatz zum Black-Box Test mit dem Inneren des Modells. Die Ein- und Ausgangssignale werden bei diesem Test nicht betrachtet, sondern die korrekte Funktionsweise des Modells steht im Vordergrund. [5] Es wird im Abdeckungstest überprüft, ob alle Modellteile verwendet werden und im Überdeckungstest ermittelt, ob sich einzelne Modellteile gegenseitig überdecken. Schleifen werden auf ihre minimale und maximale Durchlaufzeiten, bedingte Verzweigungen auf ihr mögliches Eintreten und alle Funktionsaufrufe und Datenbewegungen auf ihre Korrektheit überprüft. Die Tests werden in definierten Testprozeduren meist automatisiert durchgeführt und vergrößern bei erfolgreichem Bestehen die Glaubwürdigkeit des Modells. Häufig stehen verschiedene Solver mit ihren dazugehörigen Einstellungen zur Auswahl. Da eine Vielzahl an Tests möglich ist, sollte zur Aufwandsminimierung die Anzahl auf die wichtigsten beschränkt werden. [48] Es sollten auch Untersuchungen über die richtige Wahl des Solvers und zur Konvergenz des Ergebnisses bei der Anpassung der Einstellungen vorgenommen werden. Eine falsche Wahl kann zu großen Fehlern in einem sonst mathematisch korrekt formulierten Modell führen. Dies wird vor allem in der FEM- und CFD-Berechnung intensiv untersucht. [53, 54]

²⁴ White-Box – engl. *weißer Kasten* – Gegensatz zur Black-Box. Hier ist das „Innenleben“ des Systems oder Modells bekannt

2.2.4 Validierung

Die Validierung stellt den zweiten großen Schritt bei der Feststellung der Glaubwürdigkeit eines Simulationsmodells dar. Bei der Validierung wird die Eignung des Modells überprüft, das reale System zu repräsentieren. Die Qualität des Validierungsergebnisses hängt stark von den verwendeten Mitteln ab. Es sollte bereits vor Beginn der Validierung die Methode der Validierung und die maximale akzeptierte Abweichung zwischen dem System und dem Modell festgelegt sein. [5] Leider wird die Validierung in Simulationsstudien häufig als Last gesehen und nicht mit der notwendigen Gründlichkeit verfolgt. In vielen Literaturquellen wird erwähnt, dass die Validierung des Simulationsmodells erfolgreich war, jedoch fehlt jeglicher Nachweis über die Methoden oder Ergebnisse der Validierung. Es werden aber ungeeignete Arten von Diagrammen zum Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen verwendet. Hieraus lassen sich keine qualifizierten Aussagen ableiten und die Glaubwürdigkeit des Modells nicht nachvollziehen. Im Folgenden sollen Techniken dargestellt werden, mit deren Hilfe die Validierung von Simulationsmodellen methodisch, strukturiert und nachvollziehbar durchgeführt werden kann.

Bevor auf ausgewählte Validierungstechniken einzeln eingegangen wird, sollen zuerst die verschiedenen Kategorien mit ihren Hauptmerkmalen vorgestellt werden. Pan, Kokkolaras et. al. unterteilen aktuelle Validierungstechniken in einer Untersuchung in fünf verschiedene Gruppen. [55] Diese sind:

- grafischer Vergleich
- merkmalsbasierte Techniken
- auf Verteilungsfunktionen basierende Techniken
- Hypothesen-Tests
- Bayessche A-posteriori Schätzung

2.2.4.1 Grafische Vergleichstechniken

Beim grafischen Vergleich handelt es sich um die schwächste Form der Validierung. Hierbei werden Simulations- und Versuchsdaten, wie im Bild 2.11 zu sehen, durch das Auftragen über die gleichen Achsen miteinander verglichen. Die Bewertung erfolgt meist subjektiv. Es werden üblicherweise keine quantitativen Methoden zur Messung der Abweichung angewendet. Eine der Gefahren bei grafischen Vergleichen liegt in der Fehlinterpretation der Ergebnisse aufgrund fehlenden Hintergrundwissens oder fehlender Berücksichtigung des Gesamtsystems, da meist nur Ausschnitte des System-

verhaltens betrachtet werden. Eine weitere Fehlerquelle ist bei der bewertenden Person zu finden, die die Ergebnisse möglicherweise nicht objektiv genug bewertet. [55]

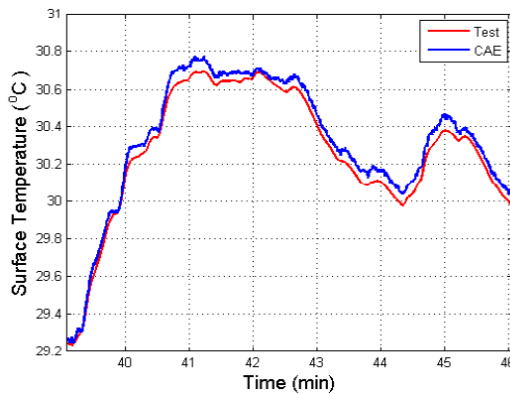


Bild 2.11: Grafischer Vergleich von Test- und Simulationsdaten (CAE) [55]

2.2.4.2 Merkmalsbasierte Techniken

Bei merkmalsbasierten Techniken werden Merkmale von Mess- und Simulationsdaten miteinander verglichen und in Relation zueinander gesetzt. Diese Merkmale sind z.B. absolute Werte zu bestimmten Zeitpunkten oder Ereignissen, Mittelwerte, lokale und globale Maxima und Steigungen sowie Frequenzen und Phasenverschiebungen. Sie können sowohl aus dem Zeitbereich wie auch dem Frequenzbereich stammen. Die verschiedenen Fehlermaße, wie z.B. mittlere Fehler oder absolute Fehler gehören ebenfalls in die Kategorie der merkmalsbasierten Techniken.

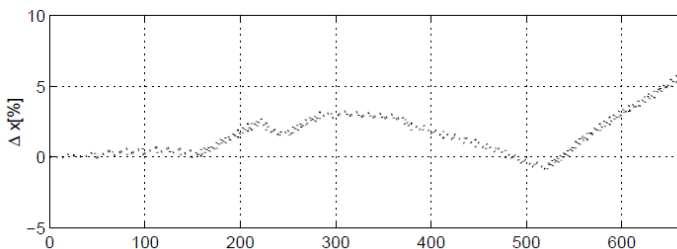


Bild 2.12: Darstellung des relativen Fehlers zwischen Mess- und Simulationsdaten [56]

Eine weitere Gruppe an merkmalsbasierten Techniken bilden die Spragues & Geers Metrik, Knowles & Gear Metrik, Russel's Metrik und die EARTH²⁵ Metrik. [55, 57–59] Einige davon werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Diese Metriken haben gemein, dass sie sowohl den Fehler in den Amplituden als auch den der Phasenverschiebungen bewerten. Die EARTH Metrik berücksichtigt darüber hinaus die Steigung des Signalverlaufs. Das DTW²⁶ kombiniert verschiedene Techniken, um die Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. [55, 57] Diese Techniken haben gemein, dass die Abweichung der Merkmale zwischen Mess- und Simulationsdaten in einem oder mehreren Kennwerten berechnet wird und mit steigender Übereinstimmung von Modell und System die Kennwerte gegen Null gehen. Sie sind dadurch sehr gut geeignet, um mit relativ einfachen Mitteln und wenig Rechenaufwand die Validität von Simulationsergebnissen zu untersuchen. Die für diese Arbeit relevanten Fehlermaße werden im letzten Teil dieses Abschnitts vorgestellt.

2.2.4.3 Auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen basierende Techniken

Diese Techniken verwenden die (kumulativen) Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Mess- und Simulationsdaten zur Validierung. Nach Ermittlung der Verteilungsfunktion werden diese Verteilungen miteinander verglichen. Bei nicht bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung wird üblicherweise eine Normalverteilung angenommen. Der Vergleich kann den Grad der Überdeckung des Bereichs mit hoher Wahrscheinlichkeit, den maximalen Abstand der beiden Verteilungsfunktionen oder die Fläche unter den Funktionen umfassen. [55] Umso ähnlicher sich die Verteilungsfunktionen sind, desto besser fällt das Ergebnis der Validierung aus. Die wahrscheinlichkeitsverteilungsbasierten Techniken erfordern meist eine große Anzahl an Versuchs- und Simulationsergebnissen, welche jedoch alternativ mit verschiedenen mathematischen Methoden, wie z.B. dem MCMC²⁷-Verfahren, erzeugt werden können.

²⁵ EARTH – Error Assessment of Response Time Histories: Methode zum Vergleich von zeitlichen Signalverläufen durch schrittweisen Vergleich der Amplitude, der Frequenz und der Amplitudensteigung [57]

²⁶ DTW – Dynamic Time Warping: Algorithmus aus dem Bereich der Spracherkennung zum Vergleich von verschiedenen zeitlichen Signalverläufen durch Synchronisierung von Maxima und anschließender Kompression und Streckung der dazwischenliegenden Abschnitten [57]

²⁷ MCMC – Markov Chain Monte Carlo: Ein Verfahren zur Ermittlung von Stichproben aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen [60]

2.2.4.4 Hypothesen-Tests

Der Hypothesen-Test formuliert die Validität des Simulationsmodells als Nullhypothese, die es zu überprüfen gilt. Hierbei werden die üblichen Mittel der Statistik verwendet, wie z.B. der t-Test zur Ermittlung der Ähnlichkeit der Mittelwerte der Mess- und Simulationsdaten oder der F-Test zum Vergleich der Varianzen beider Datensätze. [61] Der Vergleich von zeitbasierten Datensätzen wird aufgrund der Möglichkeit, dass dynamisches Systemverhalten²⁸ nicht in die Bewertung miteinfließt, nicht empfohlen. [55]

2.2.4.5 Bayessche A-posteriori Schätzungen

Diese Methode ähnelt den wahrscheinlichkeitsverteilungsbasierten Techniken, mit dem Unterschied, dass die Bayessche Statistik verwendet wird. Hierfür wird die sogenannte A-posteriori-Wahrscheinlichkeit berechnet. Dies ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die das Wissen aus bereits erfolgten Beobachtungen bzw. Vorwissen miteinberechnet. [61] Mit Hilfe von Methoden aus diesem Bereich wird versucht, in verschiedenen Bereichen der Simulationstechnik die Vorhersagefähigkeit von Simulationsmodellen zu bewerten. [12, 63–65]

2.2.4.6 Fehlermaße

In der Validierung werden mit Abstand am häufigsten Fehlermaße verwendet, um den Unterschied zwischen dem Modellverhalten und dem Systemverhalten zu quantifizieren. Fehlermaße sind mathematisch leicht umzusetzen und benötigen wenig Rechenaufwand. Die einfachsten Fehlermaße sind die Differenz (2.1) und der relative Fehler (2.2).

$$\Delta_i = x_i - y_i \quad (2.1)$$

$$\epsilon_i = \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (2.2)$$

i	bestimmter Zeitpunkt
x_i	Simulationswert an der Stelle i
y_i	Messwert an der Stelle i
Δ_i	Differenz an der Stelle i
ϵ_i	Relativer Fehler an der Stelle i

²⁸ Dynamisches Systemverhalten – Ein System zeigt dynamisches Verhalten, wenn der aktuelle Systemzustand nicht nur von den aktuellen Zustandsgrößen und äußeren Einflussgrößen, sondern auch von vergangenen Zuständen abhängt [62]

Darüber hinaus werden der mittlere (relative) Fehler (2.3) und der mittlere absolute (relative) Fehler (2.5) verwendet, die bereits einen Wert für den gesamten Datensatz berechnen. Bei absoluten Fehlermaßen wird verhindert, dass sich positive und negative Fehler bei der Summation aufheben können. Der Nachteil von relativen Fehlern ist in der starken Gewichtung von Abweichungen zu sehen, wenn der Messwert klein ist, da dieser im Nenner steht.

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i - y_i \quad (2.3)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (2.4)$$

$$\bar{\Delta}_{abs} = \frac{1}{n} \sum_i^n |x_i - y_i| \quad (2.5)$$

$$\bar{\epsilon}_{abs} = \frac{1}{n} \sum_i^n \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right| \quad (2.6)$$

n	Anzahl der Datenpunkte
$\bar{\Delta}$	Mittlerer Fehler
$\bar{\epsilon}$	Mittlerer relativer Fehler
$\bar{\Delta}_{abs}$	Mittlerer absoluter Fehler
$\bar{\epsilon}_{abs}$	Mittlerer absoluter relativer Fehler

Der prozentuale Fehler nach Brockfeld und Ranjitkar (2.7) ist eine Anpassung des mittleren absoluten relativen Fehlers (MAPE²⁹) und führt zu einer Abschwächung von Ausreißern. Hierfür wird der Fehler nicht relativ zum lokalen Referenzwert, sondern zu dessen Mittelwert berechnet. [66, 67]

$$\epsilon_{BR} = \frac{\sum_i^n |x_i - y_i|}{\sum_i^n |y_i|} \quad (2.7)$$

ϵ_{BR} Prozentualer Fehler nach Brockfeld und Ranjitkar

Ein weiteres Fehlermaß, das sehr häufig verwendet wird, ist der mittlere quadratische (relative) Fehler (2.8). Hier werden die einzelnen Abweichungen quadratisch gewichtet, wodurch große Ausreißer überproportional stark in die Bewertung einfließen.

²⁹ MAPE – Mean Absolute Percentage Error (dt.: mittlerer absoluter relativer Fehler)

$$\bar{\Delta}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.8)$$

$$\bar{\epsilon}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (2.9)$$

$\bar{\Delta}_{RMS}$ Mittlerer quadratischer Fehler

$\bar{\epsilon}_{RMS}$ Mittlerer quadratischer relativer Fehler

Sprague & Geers stellen in einer ihrer Arbeiten eine Metrik vor, die eine Bewertung der Amplitudenabweichung M_{SG} (2.13) und der Phasenabweichung P_{SG} (2.14) getrennt voneinander vornimmt und diese anschließend zu einem sogenannten Gesamtfehlerfaktor C_{SG} (2.15) zusammenfasst. [58] Diese Metrik ist so konzipiert, dass die beiden Abweichungen sich nicht gegenseitig in der Bewertung beeinflussen und dadurch auch ermittelt werden kann, ob und welche Abweichung größer ist.

$$\vartheta_{xx} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt}{(t_2 - t_1)} \quad (2.10)$$

$$\vartheta_{yy} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} y^2(t) dt}{(t_2 - t_1)} \quad (2.11)$$

$$\vartheta_{xy} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} x(t)y(t) dt}{(t_2 - t_1)} \quad (2.12)$$

$$M_{SG} = \sqrt{\frac{\vartheta_{xx}}{\vartheta_{yy}}} - 1 \quad (2.13)$$

$$P_{SG} = 1 - \frac{\vartheta_{xy}}{\sqrt{\vartheta_{xx}\vartheta_{yy}}} \quad (2.14)$$

$$C_{SG} = \sqrt{M_{SG}^2 + P_{SG}^2} \quad (2.15)$$

$t_{1/2}$ Zeitpunkte in der Aufzeichnung der Mess- und Simulationsdaten

M_{SG} Amplitudenfehlerfaktor nach Sprague & Geers

P_{SG} Phasenfehlerfaktor nach Sprague & Geers

C_{SG} Gesamtfehlerfaktor nach Sprague & Geers

Ähnliche Metriken mit getrennten Bewertungen der Amplituden- und Phasenabweichung mit meist leichten Unterschieden in der Gewichtung der Phasenabweichung stellen z.B. auch Knowles & Gear und Russel vor. [59, 68]

2.2.5 Vorgehensmodelle

Vorgehensmodelle werden meist entwickelt, um dem Nutzer einen einheitlichen Leitfaden an die Hand zu geben. Mit diesem soll sichergestellt werden, dass seine Tätigkeit nach einem bestimmten Muster abläuft und durch die gleiche Bearbeitung von Aufgaben auch die Ergebnisse vergleichbar werden. In der Modellbildung und Simulation gibt es verschiedene Vorgehensmodelle. Balci und Sargent definieren mit ihren Vorgehensmodellen einen Weg von einer Fragestellung bis zu einem Simulationsmodell, dessen Glaubwürdigkeit nachgewiesen ist und welches eine Antwort auf die Fragestellung geben kann. Sargent stellt den Prozess der Modellentwicklung, wie im Bild 2.13 zu sehen, als Kreis dar, in dem zwischen den Elementen gewechselt wird, bis die Problemstellung gelöst ist. [69]

Balci setzt dagegen die Schritte der Problemformulierung außerhalb des Kreisprozesses an, der nach der Formulierung anschließend so lange durchlaufen wird, bis die definierten Vorgaben erfüllt werden können. Der Ablauf ist im Anhang im Bild A.1 zu sehen. Weder Sargent noch Balci legen den Fokus auf die Quantifizierung der Genauigkeit von Simulationsergebnissen, sondern auf die korrekte Erstellung von Modellen, welche die Fragestellung beantworten können. [37]

Brade stellt in seiner Arbeit einen generischen Prozess dar, mit dessen Hilfe Simulationsmodelle und ihre Ergebnisse verifiziert und validiert werden können. Er legt besondere Sorgfalt auf die umfassende Darstellung der Methoden und Schritte, unter anderem die korrekte Dokumentation aller Zwischenergebnisse sowie die Überprüfung durch verschiedene Tests, die nach jedem Schritt im Prozess wiederholt werden. Dadurch wird die Bewertung auch komplexer Simulationsmodelle erleichtert. Zwar erwähnt Brade auch Ungenauigkeiten aus Parametern, verfolgt diese aber nicht bis ins Detail weiter. Das liegt wahrscheinlich an dem Fokus der Arbeit, die ein allgemeingültiges Vorgehensmodell vorstellt. [36]

Die vorgestellten Vorgehensmodelle sind sehr gute Beispiele für hilfreiche Anleitungen bei der Bearbeitung von Simulationsaufgaben. Ihr Fokus liegt aber anders als in dieser Arbeit eindeutig in der Beantwortung einer Frage mit Hilfe eines zu erstellenden Simulationsmodells. Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist die Bewertung der verschiedenen Ungenauigkeiten in einem aus bereits vorhandenen Teilmodellen

bestehenden Gesamtfahrzeugmodell. Deshalb sind die vorhandenen Verfahren für die Fragestellungen dieser Arbeit nicht geeignet.

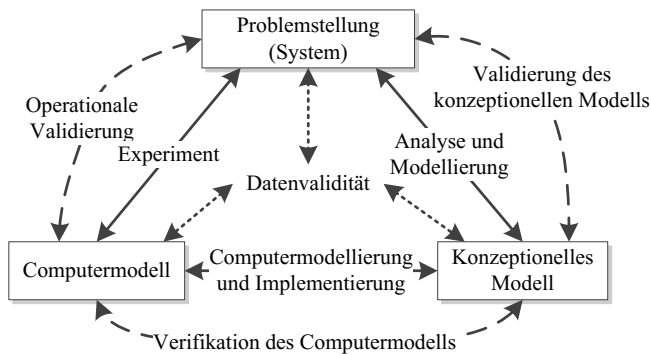


Bild 2.13: Vereinfachte Darstellung des Modellentwicklungsprozesses (übersetzt [69])

2.3 Ungenauigkeit von Simulationsergebnissen

Neben der grundsätzlichen V&V von Simulationsmodellen stellt sich auch die Frage nach der Ungenauigkeit von Simulationsergebnissen. Wenn die Validierung gründlich durchgeführt wird, besteht eine im Voraus definierte maximal akzeptierte Abweichung zwischen Modell- und Systemverhalten. Überschreitet das Modell diese, ist die Validierung nicht bestanden und das Modell wird abgelehnt. Ist die Validierung einmal bestanden, wird häufig nicht weitergegeben, über welche Genauigkeit das Modell verfügt.

In vielen Anwendungsbereichen der Simulationstechnik lassen sich Modelle mit Ergebnissen aus Messungen in Versuchsaufbauten validieren. Wenn diese Möglichkeit nicht zur Verfügung steht, muss versucht werden die Ungenauigkeit des Modells für diese Fragestellung abzuschätzen. Diese Ungenauigkeit ist grundsätzlich vorhanden und kann auch für auf normalem Weg validierte Simulationsmodelle abgeschätzt werden. Ein Vorschlag zur Ausweisung dieser Ungenauigkeit ist das „*Best Estimate plus Uncertainty*“ (dt. beste Schätzung plus Ungenauigkeit) von Romero. [70] Das Simulationsergebnis stellt die Schätzung dar und darüber hinaus wird eine mögliche Abweichung durch die Ungenauigkeit angegeben.

Unterschiedliche Möglichkeiten, die durch Parameter eingeprägte Ungenauigkeit mathematisch abzubilden, werden von Oberkampff dargestellt. Er rechnet einzeln und mehrfach auftretende Ungenauigkeiten von Parametern in die Simulationsergebnisse ein. [71]

Logan und Nitta stellen eine vereinfachte Bewertung von Modellen mit verschiedenen Quellen für Ungenauigkeit vor, die in einer Art Benotung des Systems mündet. [72] Es werden verschiedene qualitative Bewertungsmaße der V&V vorgestellt, die jedoch alle auf einem Punktesystem beruhen, die in Abhängigkeit von vorhandenen Eigenschaften oder durchgeführten Schritten vergeben werden. Abschließend wird ein vierstufiger ABCD-Prozess vorgestellt, der die Schritte Testplanung, Ergebnisverifikation, Modellvalidierung und Angemessenheit der Vorhersage enthält. Diese Herangehensweise ist als Leitfaden zu sehen, mit dessen Hilfe nur eine grobe Abschätzung über die Modellqualität und die Ergebnisqualität getroffen werden kann. Die konkrete Quantifizierung der Ungenauigkeit im Simulationsergebnis bleibt aus.

Einen standardisierten Ansatz zur Verifikation und Validierung von Fahrdynamikmodellen stellen Klemmer, Lauer, et. al. vor. [73] Neben der Definition der notwendigen Schritte in der Verifikation und Validierung wird eine Methode präsentiert, um die Modellqualität zu bestimmen. Hierfür werden die Signalkorrelation und der Validierungsumfang bewertet. Die Signalkorrelation stellt die Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Referenzsignalen dar. Diese wird mit einem Wert zwischen 0 als sehr schlecht und 10 als sehr gut bewertet. Der Validierungsumfang beschreibt, wie umfangreich die Validierung des Modells durchgeführt ist. Werden nur wenige Lastfälle betrachtet, wird der Validierungsumfang als niedrig bewertet. Darüber hinaus werden die Signalverläufe in Abhängigkeit ihres dynamischen Verhaltens in verschiedene Klassen eingeteilt und einzeln bewertet. Zustände, die sich nur langsam ändern, wie Temperaturen, werden als statisch betrachtet, wohingegen zum Beispiel elektrische Zustandsgrößen, wie der Stromverlauf in den Wicklungen einer E-Maschine, als schnelle transiente Größen gelten. Die verschiedenen Klassen können mit unterschiedlichen Gewichten gewertet werden und fließen so unterschiedlich stark in die Gesamtbewertung ein. Jedoch erfolgt auch hier keine Quantifizierung der Auswirkung von Fehlern auf die Ergebnisse.

Eine Veröffentlichung von Fu und Yang befasst sich mit der Quantifizierung der Modellgenauigkeit mit Hilfe von verschiedenen Messdaten. Hierfür wird ein Ansatz gewählt, der eine Validierungsmetrik unter Verwendung des Bhattacharyya Abstands

nutzt, um die Modellgenauigkeit zu überprüfen. Anschließend wird der Model-Bias³⁰ ermittelt und ein Metamodell³¹ zur Abbildung des Model-Bias und der korrekten Darstellung des Systemverhaltens erzeugt. [65] Es ist fraglich, ob der eingebrachte Fehler durch die Erstellung der Response Surface einen Vorteil bei der Bewertung der Modellgenauigkeit mit sich bringt. Außerdem liegt das Anwendungsgebiet Fus und Jangs in der FEM-Berechnung, weshalb die Anforderungen an das Vorgehen sich von denen dieser Arbeit unterscheiden. Beide gehen von einem festen Modell aus, dass mit relativ wenigen, bekannten Gleichungen abgebildet werden kann. Im Gegensatz dazu ist das Gesamtfahrzeugmodell dieser Arbeit modular aufgebaut und es wird davon ausgegangen, dass die Gleichungen der Komponenten nicht immer bekannt sind.

Abschließend lässt sich aus den dargestellten Quellen folgern, dass ein Prozess, der die gestellten Anforderungen erfüllt und die Randbedingungen berücksichtigt, bisher noch nicht veröffentlicht ist. Im folgenden Kapitel wird eine Methode vorgestellt, welche als erste alle gestellten Anforderungen erfüllt.

³⁰ Model-Bias – Systematische Abweichung des Modellverhaltens, welche sich nicht durch die Anpassung von Parametern beheben lässt.

³¹ Metamodell – Ein vereinfachtes mathematisches Modell, welches das Verhalten des ursprünglichen Modells in einem ausgewählten Bereich mit einem geringen Fehler abbildet.

Methode zur Abschätzung der Ergebnisqualität von
modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen

Krausz, M.

2017, XXIII, 128 S. 61 Abb., 12 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-16546-8