



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Malte Fuhrmann

Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware Jarvis

Malte Fuhrmann

**Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung
einer Methodik zur Verifizierung und
Validierung der Simulationssoftware
Jarvis**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Team Wärme des CC4E
Am Schleusengraben 24
21029 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers
Zweitprüfer: M.Eng. Peter Lorenzen

Abgabedatum: 28.03.2021

Zusammenfassung

Malte Fuhrmann

Thema der Masterthesis

Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware Jarvis

Stichworte

CC4E, Wärmenetz, Fernwärme, Jarvis, Verifizierung, Validierung, Methodik, Komponentenmodell, Simulation, Simulationssoftware, Python

Kurzzusammenfassung

Im Team Wärme des CC4E an der HAW-Hamburg wird im Projekt Smart Heat Grid Hamburg die Simulationssoftware Jarvis zur thermo-hydraulischen Berechnung von Fernwärmenetzen entwickelt. In Jarvis bestehen komplexe Simulationsmodelle aus einer Vielzahl einzelner Komponentenmodelle, von denen jedes für sich einen Teil des realen Systems repräsentiert. In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur Verifizierung und Validierung der Komponentenmodelle von Jarvis entwickelt. Hierbei werden bewährte sowie innovative Techniken der Verifizierung und Validierung in den Modellbildungsprozess integriert und eine vollumfängliche Methodik erarbeitet. Ausgewählte Techniken werden exemplarisch auf ihre Anwendbarkeit überprüft.

Malte Fuhrmann

Title of the paper

Smart Heat Grid Hamburg: Development of a method for verification and validation of the simulation software Jarvis

Keywords

CC4E, heat grid, district heating, Jarvis, verification, validation, method, component model, simulation, simulation software, Python

Abstract

Team Wärme of the CC4E at the HAW-Hamburg are developing the simulation software, Jarvis, for the thermo-hydraulic calculation of district heating grids for project Smart Heat Grid Hamburg. In Jarvis, complex simulation models consist of a variety of single component models. Each of them represents a part of the real system. In this paper, a method is being developed to verify and validate the component models of Jarvis. Therefore, established and innovative techniques from the field of verification and validation are integrated into the model-building process, and a comprehensive method is being developed. Certain techniques will be tested for the purpose of applicability.

Vorwort und Danksagung

Zunächst möchte ich mich für das Vertrauen bedanken, dass ich diese wichtige Arbeit übernehmen durfte.

Insbesondere bedanke ich mich bei Philip Tillmann, der mir die gesamte Bearbeitungszeit übergeduldig und mit bestem Rat zur Seite stand.

Weiterhin bedanke ich mich bei Paul Kernstock und Peter Lorenzen für die besonders kurzfristigen Hilfestellungen.

Dem gesamten Team Wärme des CC4E gilt mein Dank, dass sie es trotz Homeoffice schaffen eine freundschaftliche und inspirierende Arbeitsatmosphäre aufrechtzuerhalten.

Ich freue mich auf die weitere Zusammenarbeit im Team Wärme!

Im März 2021,

Malte Fuhrmann



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Masterthesis

von Herrn Malte Fuhrmann

Thema: Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware Jarvis

Am Center for Demand Side Integration der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg wird im Projekt Smart Heat Grid Hamburg die Simulationssoftware *Jarvis* zur thermo-hydraulischen Berechnung von Fernwärmenetzen entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Fachgebiet der Verifizierung und Validierung (V&V) in die Entwicklung von *Jarvis* zu integrieren. Hierfür soll ein Konzept entwickelt werden, wodurch sich für die Simulationssoftware nach anerkannten Maßstäben ein hinreichender Validierungsgrad erreichen lässt.

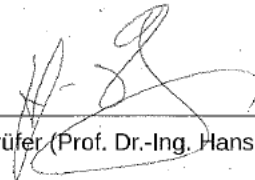
Schwerpunkte: Die Arbeit fokussiert sich auf die Komponentenmodelle der Software. Hierbei handelt es sich um Algorithmen zur Berechnung des Einflusses von Bauteilen auf die thermodynamischen und strömungsmechanischen Größen des Wärmeträgermediums. Die Architektur der Simulationssoftware ist nicht Thema der Arbeit.

Arbeitsschritte:

- Literaturrecherche zu aktuellen Methoden der V&V im Bereich von Simulationssoftware
- Auswahl von Methoden der V&V zur Anwendung auf die Komponentenmodelle von *Jarvis*
- Entwicklung einer Methodik zur Anwendung von V&V auf vorhandene und zukünftige Komponentenmodelle von *Jarvis*
- Exemplarische Anwendung des Konzepts auf einzelne Komponentenmodelle

15.09.2020

Datum


Erstprüfer (Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	IV
Aufgabenstellung	V
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIII
1. Einleitung	1
1.1. Zur Notwendigkeit einer V&V-Methodik	1
1.2. Aufgabenbeschreibung und Struktur dieser Arbeit	2
2. Grundlagen der V&V	4
2.1. Fachbegriffe aus dem Gebiet der V&V	4
2.2. Komponentenmodelle in Jarvis	6
2.3. Statistische Versuchsplanung	8
2.4. Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten	12
2.5. Vorstellung ausgewählter Techniken der V&V	16
2.5.1. Desk Checking	16
2.5.2. Face Validation	16
2.5.3. Traces / Execution Tracing	17
2.5.4. Structured Walkthrough	17
2.5.5. Review	18
2.5.6. Feldtest	18
3. Entwicklungsprozess der V&V-Methodik	20
3.1. Allgemeine Hinweise zur Datenerhebung und -qualität	25
3.2. Problemdefinition	26
3.2.1. Verfahren zur Problemformulierung auf höherer Ebene	27
3.2.2. Überprüfung des formalen Problems	37
3.3. Validierung des konzeptuellen Modells	39
3.4. Verifizierung	42
3.5. Operationale Validierung	45
3.5.1. Auswahl der Versuchspunkte zur operationalen Validierung	47
3.5.2. Explorative Datenanalyse	48
3.5.3. Interne Operationale Validierung	49
3.5.4. Externe Operationale Validierung	51
3.6. Dokumentation der Ergebnisse des V&V-Prozesses	54

3.7. Feldtest	56
4. Darstellung der entwickelten V&V-Methodik	57
4.1. Zusammenfassung der Teilschritte	57
4.1.1. Sicherstellen der Datenqualität	59
4.1.2. Formulierung und Überprüfung des formalen Problems	60
4.1.3. Konzeptuelle Validierung von Komponentenmodellen	64
4.1.4. Verifizierung von Komponentenmodellen	66
4.1.5. Operationale Validierung	67
4.1.6. Dokumentation und Feldtest	71
4.2. Testweise Anwendung ausgewählter Techniken	72
4.2.1. Aufbau der Testumgebung	73
4.2.2. Sinnvolle Eingrenzung der Parameter	74
4.2.3. EDA des Pumpenmodells	77
4.2.4. IOV des Pumpenmodells	79
4.2.5. EOv des Pumpenmodells	85
4.2.6. Fazit zur testweisen Anwendung der Techniken	92
4.3. Kritische Bewertung der V&V-Methodik	94
4.4. Ausblick auf die nächsten Schritte	96
5. Zusammenfassung	100
Quellenangaben	102
A. Beispiel für die Anwendung von DOEPy	A-1
B. Indikatoren zur Messung der Wahrscheinlichkeit einen Typ-3-Fehler zu begehen	B-1
C. Modellbildungsprozess nach Page et al.	C-1

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

DoE	Design of Experiment: Versuchsplanung
DOEPy	Design of Experiments Generator in Python
EDA	Explorative Datenanalyse
EOV	Externe Operationale Validierung
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ID	Identifikator
IOV	Interne Operationale Validierung
M&S	Modellierung und Simulation
mTp	Kennzeichnung eines Komponentenmodells, das Massenstrom- Temperatur- und Druckberechnung berücksichtigt
OV	Operationale Validierung
S1	Haupteffekt bei der Varianzanalyse nach Sobol
SALib	Sensitivity Analysis Library in Python
SE	Systems Engineering
SH	Haupteffekt bei der Varianzanalyse nach Sobol
SME	Subject Matter Expert: Fachexperte
SQR	system reponse quantities
ST	Totaleffekt bei der Varianzanalyse nach Sobol
V&V	Verifizierung und Validierung
VV&A	Verifizierung, Validierung und Akkreditierung

Indizes

k	Zählvariable
n	Zählvariable
i	Zählvariable

Griechische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Dimension	Einheit
σ^2	Varianz	variiert	variiert

Lateinische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Dimension	Einheit
D	Anzahl der Parameter bei der Sensitivitätsanalyse mit SALib	–	–
d_{ne}	Normalized Euclidean Distance	–	–
H	Förderhöhe	L	m
h	Schätzwert für die Förderhöhe H	L	m
k	Anzahl der Faktoren in einem Versuchsplan	–	–
N	Proportionalitätsfaktor bei der Sensitivitätsanalyse mit SALib	–	–
n	Anzahl der Stufen eines Faktors im Versuchsplan	–	–
n	Drehzahl	T^{-1}	$\frac{1}{\text{min}}$
Q	Volumenstrom	$L^3 \cdot T^{-1}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
s^2	Schätzwert für die Varianz nach Typ-A-Ermittlung des GUM	variiert	variiert

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

t	Temperatur	Θ	$^{\circ}\text{C}$
u	Standardunsicherheit	variiert	variiert
u^2	Schätzwert für die Varianz nach Typ-B-Ermittlung des GUM	variiert	variiert
X	Wahrer Wert der Messgröße X	variiert	variiert
x	Schätzwert für X	variiert	variiert
Y	Wahrer Wert der Messgröße Y	variiert	variiert
y	Schätzwert für Y	variiert	variiert

Tabellenverzeichnis

2.1. Unterteilung der Parameter von Komponentenmodellen	7
2.2. Zusammenhang zwischen Begriffen der DoE und Begriffen der Simulation mit Jarvis	9
2.3. Vollfaktorieller 2^3 Versuchsplan mit drei Faktoren und zwei Stufen	11
2.4. Abkürzungen und Bedeutungen ausgewählter Inhalte des GUM	13
3.1. Aktivitäten der Phasen des SE Framework nach Morse et al.	22
3.2. Aktivitäten der Phasen des VV&A-Prozesses nach Wojton et al.	23
3.3. Hilfstabelle 1 des Leitfadens nach Balci und Nance	29
3.4. Zur Rechtfertigung für die Erstellung des Komponentenmodells	30
3.5. Hilfstabelle 4 des Leitfadens nach Balci und Nance	31
3.6. Zur Untersuchung des Entscheidungsfindungsprozesses und Identifikation der Entscheidungsträger*innen	32
3.7. Hilfstabelle 5 des Leitfadens nach Balci und Nance	33
3.8. Zur Identifikation und quantifizierung der benötigten Simulationsergebnisse	34
3.9. Hilfstabelle 2 des Leitfadens nach Balci und Nance	34
3.10. Zur Analyse der technischen Zusammenhänge und Systemgrenzen	35
3.11. Zur Identifikation der Variablen der Simulationsergebnisse	36
3.12. Die Indikatoren zur Überprüfung eines Typ-3-Fehlers bei der Problemdefinition	38
3.13. Gegenüberstellung der Techniken zur Verifizierung des Quelltextes mit Empfehlung zum Anwendungsfall	44
3.14. Grundsätzliche Möglichkeiten zur operationalen Validierung	46
3.15. Exemplarischer Versuchsplan bei der Durchführung der EDA	49
4.1. Die fünf Schritte zur Problemdefinition	62
4.2. Checkliste zur Identifikation eines Typ-3-Fehlers	63
4.3. Informationen über ein Komponentenmodell, die im GUI abrufbar sein sollten	71
4.4. Übersicht der Parameter des Pumpenmodells	75

4.5. Versuchsplan zur EDA des Pumpenmodells	78
4.6. Ergebnisse der Varianzbasierten Sensitivitätsanalyse für das Ersatzmodell bei q=15 m ³ /h	83
4.7. Ergebnisse der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse für das Ersatzmodell bei q=(0, 5.5, 26.6) m ³ /h	84
4.8. Validierungsdaten durch Ablesen einer analogen Skala	87
4.9. Einige Anforderungen an die Testumgebung für Komponentenmodelle	97
A.1. Abgekürzte Darstellung des Versuchsplans durch DOEPy zur Demonstration der Ausgabeform	A-1

Abbildungsverzeichnis

1.1. Struktur des zentralen Teils dieser Arbeit	3
2.1. Exemplarischer Zusammenschluss von Komponentenmodellen in Jarvis	6
2.2. Prinzipielle Funktionsweise von Komponentenmodellen	8
2.3. Typische Untersuchungsumgebung aus Sicht der DoE	9
2.4. Vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren und zwei Stufen	10
2.5. Zwei unterschiedliche Versuchspläne des Typs LHD, erzeugt mit gleichen Eingangsdaten, erstellt mit DOEPy	12
2.6. Exemplarische Rechteckverteilung beim Ermitteln eines Messwertes	15
2.7. Übersicht ausgewählter Techniken der V&V entsprechend des geschätzten Aufwandes sortiert	16
3.1. SE Framework nach Morse et al.	21
3.2. (Idealisierter) Modellbildungsprozess nach Page et al.	24
3.3. Ein Verfahren zur Problemformulierung auf höherer Ebene nach Balci und Nance	28
3.4. Wechselwirkungen von Symptomen und Einflüssen als kausales Netzwerk am Beispiel einer Kreiselpumpe	36
3.5. Fiktiver Ablauf eines Desk Checks mit Traces für das konzeptuelle Komponentenmodell	41
3.6. Erhöhen der Präzision bei der Darstellung von Simulations- und Validierungsdaten	52
3.7. Fiktive Ergebnisse der EOv zweier Pumpenkennlinien zur Erklärung des Nutzens der Normalized Euclidean Distance	53
4.1. Zusammenfassende Darstellung der V&V-Methodik als Flussdiagramm	58
4.2. Flussdiagramm zur Datenqualität von Komponentenmodellen	60
4.3. Flussdiagramm zur formalen Spezifikation von Komponentenmodellen	61
4.4. Flussdiagramm zur konzeptuellen Validierung von Komponentenmodellen	65
4.5. Flussdiagramm zur Verifizierung von Komponentenmodellen	66
4.6. Entscheidungshilfe zur Auswahl geeigneter Techniken bei der Verifizierung von Komponentenmodellen	67

4.7. Flussdiagramm zur explorativen Datenanalyse von Komponentenmodellen . . .	68
4.8. Flussdiagramm zur internen operationalen Validierung von Komponentenmodellen	69
4.9. Flussdiagramm zur externen operationalen Validierung von Komponentenmodellen	70
4.10. Vereinfachte Zusammenhänge zwischen Pumpenmodell, Inputparameter und Systemumgebung	73
4.11. Testumgebung zur operationalen Validierung des Pumpenmodells	73
4.12. Kennlinienfeld der Pumpe Wilo-Stratos 50/1-12	77
4.13. Ergebnisse der explorativen Datenanalyse des Pumpenmodells	79
4.14. Zur Funktionsweise des Pumpenersatzmodells	81
4.15. Zur Plausibilisierung der Ergebnisse der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse .	85
4.16. Kennlinienfeld der Pumpe Wilo-Stratos 50/1-12 mit hinterlegtem Gitter	86
4.17. Grafische Gegenüberstellung von Simulations- und Validierungsdaten für das Pumpenmodell	89
4.18. Zum konzeptuellen Modell des Pumpenmodells	90
4.19. Darstellung der Normalized Euclidean Distance für verschiedene Drehzahlen . .	91
C.1. Modellbildungsprozess von Page et al.	C-1

1. Einleitung

Im Team Wärme des Competence Centers für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz (CC4E) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg wird im Projekt Smart Heat Grid Hamburg die Simulationssoftware Jarvis zur thermo-hydraulischen Berechnung von Fernwärmenetzen entwickelt.

Mit freundlicher Unterstützung des Projektpartners Hamburg Energie konnte bereits im Rahmen eines Masterprojekts die Energiezentrale Energiebunker hochaufgelöst abgebildet und die Simulationsergebnisse mehrerer Szenarien plausibilisiert werden [11].

In Jarvis bestehen derart komplexe Simulationsmodelle aus einer Vielzahl einzelner Komponentenmodelle, von denen jedes für sich einen Teil des realen Systems repräsentiert. Aus den Simulationsergebnissen des Gesamtsystems lassen sich jedoch keine Rückschlüsse mehr auf die Validität einzelner Komponentenmodelle ziehen. In dieser Masterarbeit wird daher eine Methodik entwickelt, mit der die detaillierte Verifizierung und Validierung (V&V) einzelner Komponentenmodelle in Jarvis ermöglicht wird.

In den folgenden Abschnitten dieser Einleitung wird zunächst näher auf die Notwendigkeit der entwickelten V&V-Methodik eingegangen (Abschnitt 1.1). Anschließend werden die Inhalte der Aufgabenstellung kurz erläutert und die Struktur dieser Arbeit aufgezeigt (Abschnitt 1.2).

1.1. Zur Notwendigkeit einer V&V-Methodik

Die Modellbildung und Simulation (M&S) mit Jarvis ermöglicht es, die komplexen Zusammenhänge innerhalb von Wärmenetzen zu untersuchen, die sich sonst im Detail nicht erfassen lassen. Die einzelnen Komponentenmodelle können modular zu individuellen Wärmenetzen zusammengebaut und gezielt auf die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Die Simulationsergebnisse stellen dann Informationen bereit, die als Entscheidungshilfen dienen, um Strategien für die Zukunft abzuleiten oder frühzeitig Probleme zu identifizieren. Aufgrund dieses überragenden Potentials besteht jedoch die Gefahr, dass die damit einhergehenden Probleme aus dem Blickfeld der Anwender*innen verdrängt werden. Die Eigenschaft von Computern komplexe Berechnungen in kürzester Zeit und hochpräzise durchzuführen, kann zu einer gewissen „Computergläubigkeit“ [29] führen. Ein häufiger Kritikpunkt ist daher, dass man mit Simulationssoftware „schneller und vor allem genauer irren kann“ [36].

Hochkomplexe Wärmenetze mit Jarvis abbilden zu können, wird mit der Komplexität der Simulationssoftware selbst erkaufte, wodurch eine hohe Fehleranfälligkeit unvermeidlich ist.

Hinter jedem Komponentenmodell steht ein Entwicklungsprozess aus mehreren Phasen mit ganz individuellen Herausforderungen. Bereits eine unvollständige oder fehlerhafte Problemdefinition zu Beginn des Entwicklungsprozesses kann dazu führen, dass das Komponentenmodell für eine unzulässige Fragestellung verwendet wird. Weiterhin müssen bei der Entwicklung eines Komponentenmodells zwangsläufig Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden, um die komplexen Systeme unter vertretbarem Aufwand abbilden zu können. Dies führt dazu, dass die produzierten Simulationsergebnisse nie gänzlich der Realität entsprechen. Letztlich können Fehler auch beim Formulieren des Quelltextes auftreten, der die Verwendung des Komponentenmodells im Rahmen der Simulationsumgebung erst ermöglicht.

Die hier entwickelte V&V-Methodik wird in erster Linie benötigt, damit die unterschiedlichen Fehlerpotentiale beim Entwicklungsprozess von Komponentenmodellen minimiert werden können.

Weiterhin muss sichergestellt werden, dass den Anwender*innen von Jarvis nicht nur die Möglichkeiten, sondern auch die Grenzen der Simulationssoftware bewusst sind. Die Möglichkeiten und Grenzen der Komponentenmodelle sowie der Entwicklungs- und Validierungsprozess müssen offengelegt und für Anwender*innen nachvollziehbar sein, um ein angemessenes Maß an Vertrauen in das Komponentenmodell zu gewährleisten.

Um diese Ziele möglichst strukturiert und für die Komponentenmodelle einheitlich zu erreichen, wird eine allgemeine V&V-Methodik benötigt und in dieser Arbeit entwickelt. Die hierfür geplanten Arbeitsschritte und ihre Struktur innerhalb dieser Arbeit werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

1.2. Aufgabenbeschreibung und Struktur dieser Arbeit

In diesem Abschnitt werden die Arbeitsschritte zur Entwicklung der V&V-Methodik vorgestellt und gezeigt, wo sie in der Struktur dieser Arbeit einzuordnen sind. Hierfür sind die zentralen Inhalte zunächst in Abbildung 1.1 veranschaulicht.

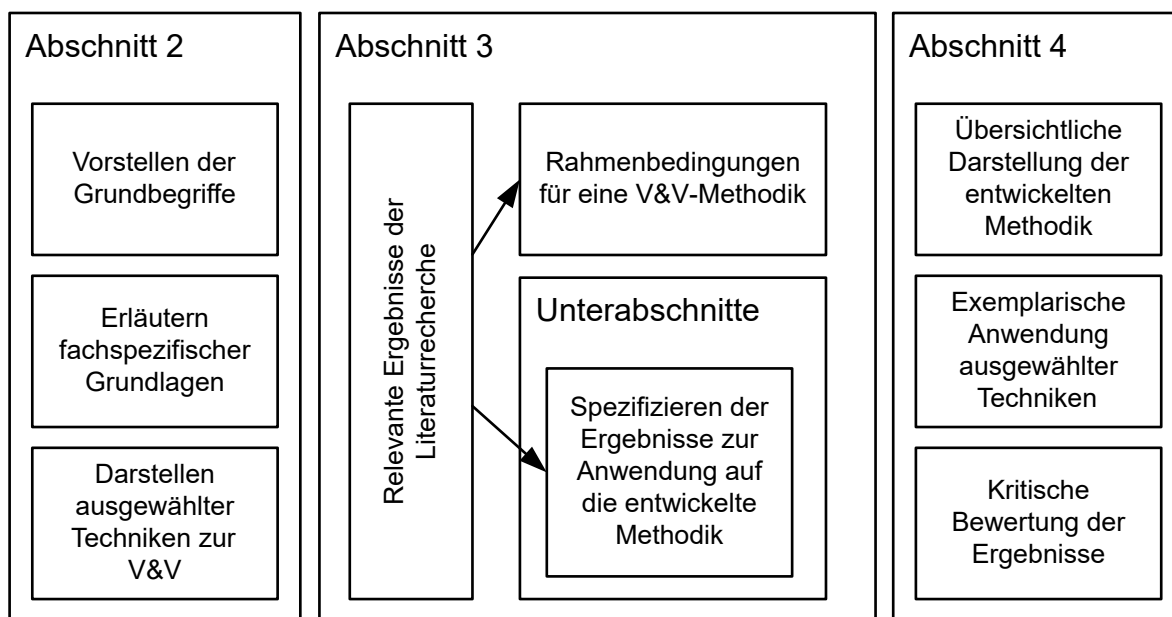


Abbildung 1.1: Struktur des zentralen Teils dieser Arbeit

Um eine moderne V&V-Methodik nach aktuellen Erkenntnissen zu entwickeln, wird eine ausführliche Literaturrecherche auf dem Gebiet der V&V sowie der M&S durchgeführt. In Abschnitt 3 werden ausgewählte Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt. Diese werden genutzt, um zu Beginn des Abschnitts die Rahmenbedingungen für eine V&V-Methodik herauszuarbeiten. In Abschnitt 3.1 bis Abschnitt 3.7 werden die Ergebnisse zur Anwendung in der entwickelten Methodik spezifiziert. Die Abschnitte orientieren sich dabei am Entwicklungsprozess eines Komponentenmodells.

Auf Basis der Diskussion in Abschnitt 3 wird eine vollumfängliche V&V-Methodik extrahiert, welche in Abschnitt 4 vorgestellt wird. Zusätzlich werden in Abschnitt 4.2 exemplarisch ausgewählte Techniken der entwickelten Methodik angewandt und ein Fazit gezogen. Anschließend findet in Abschnitt 4.3 eine kritische Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit statt. In Abschnitt 4.4 wird abschließend ein Ausblick auf die nächsten Schritte gegeben.

Zum besseren Verständnis der späteren Ausführungen findet zunächst in Abschnitt 2 eine Einführung in den Fachbereich der V&V statt. Hierbei werden Grundbegriffe und Definitionen vorgestellt (Abschnitt 2.1), notwendige Voraussetzungen zum Verständnis der weiteren Arbeit dargestellt (Abschnitt 2.2 bis Abschnitt 2.4) und einige relevante Techniken aus dem Gebiet der V&V vorgestellt (Abschnitt 2.5), welche im späteren Verlauf der Arbeit diskutiert werden.

2. Grundlagen der V&V

In diesem Abschnitt werden Grundlagen vorgestellt, die zum Verständnis der weiteren Inhalte der Arbeit beitragen sollen. Hierfür werden in Abschnitt 2.1 zunächst Fachbegriffe aus dem Bereich der V&V definiert. Anschließend wird der Begriff des Komponentenmodells in Abschnitt 2.2 näher beleuchtet. Für die Arbeit relevante Eigenschaften werden ausführlich dargestellt. In Abschnitt 2.3 werden das Prinzip und die Grundzüge der statistischen Versuchsplanung vorgestellt. Die Durchführung von Messungen und die Angabe der Messunsicherheit sind zentrale Elemente der V&V-Methodik, in die im Abschnitt 2.4 eingegangen wird. Abschließend werden in Abschnitt 2.5 ausgewählte Techniken der V&V beschrieben, auf die im späteren Verlauf der Arbeit Bezug genommen wird.

2.1. Fachbegriffe aus dem Gebiet der V&V

Für viele Begriffe aus dem Gebiet der V&V lässt sich auch in Fachliteratur oft keine einheitliche Definition finden, obwohl dies innerhalb einer Fachdisziplin grundsätzlich wünschenswert ist. Ein Großteil der Literatur zur V&V bezieht sich bei der Definition von Begriffen auf die „Modeling and Simulation Enterprise Verification, Validation, & Accreditation“-Referenzwebsite [25], weshalb die nachfolgend vorgestellten Begriffe ebenfalls an die dortigen Definitionen angelehnt sind.

Verifizierung (verification). Bei der Verifizierung wird festgestellt, ob eine Modellimplementierung korrekt die konzeptuellen Beschreibungen und Spezifikationen des Entwicklers repräsentiert [25]. Oft wird die Verifizierung allgemein als „die Überprüfung der Korrektheit des Weges“ [36] bezeichnet.

Validierung (validation). Bei der Validierung wird festgestellt, zu welchem Grad ein Modell eine genaue Repräsentation des Realsystems darstellt, bezogen auf den definierten Anwendungsbereich [25]. Validierung wird oft als „die Überprüfung der Korrektheit des Ergebnisses“ [36] bezeichnet.

Akkreditierung (accreditation). Der Begriff Akkreditierung wird im Bereich der V&V meist in Verbindung mit dem U.S.A. Department of Defense verwendet und wird dort definiert als „The official certification that a model, simulation, or federation of models and simulations and its associated data are acceptable for use for a specific purpose“ [25]. Anstelle von V&V wird dann auch von VV&A (Verifizierung, Validierung und Akkreditierung) gesprochen.

Realsystem (real world). Die Menge an realen oder hypothetischen Ursachen und Effekten, die durch ein Modell ersetzt werden soll.

Fachexpert*in (Subject Matter Expert: SME). Eine Person, die aufgrund ihrer Ausbildung, Fortbildung oder Erfahrung außergewöhnlich hohe Kompetenz in einer bestimmten technischen oder betrieblichen Disziplin, einem System oder einem Prozess besitzt und ausgewählt oder berufen wurde, an der Validierung eines Modells oder einer Simulation teilzunehmen.

Validierungsdaten (validation data, live data). Validierungsdaten sind Daten des Realsystems, die zur Validierung der Simulationsergebnisse verwendet werden. Validierungsdaten können aus empirischen Quellen wie Messungen, Datenblättern, historischen Aufzeichnungen, Ergebnissen anderer (bereits validierter) Simulationen, oder dem Wissen von Fachexpert*innen stammen.

Konzeptuelles Modell (conceptual model). Annahmen, Algorithmen und Beziehungen die das Konzept eines Entwicklers beschreiben, um die Anforderungen an die Simulationstechnik zur Repräsentation des Realsystems zu erfüllen.

Softwaremodell (software model). Digitales (nicht physikalisches) Simulationsmodell, das aus dem konzeptuellen Modell entwickelt wurde und als Quelltext ausgeführt werden kann.

Komponentenmodell. Hierbei kann es sich je nach Kontext um ein konzeptuelles Modell oder ein Softwaremodell handeln. Speziell in Jarvis ist dies ein Modell, das eine reale oder fiktive Komponente aus dem Fernwärmenetz repräsentiert. In Jarvis wird der Bezeichnung eines Komponentenmodells der Zusatz „mTp“ gegeben, wenn es mit der neuesten Version der Architektur zur Massenstromberechnung (m), Temperaturberechnung (T) und Druckberechnung (p) kompatibel ist.

Merge Request. Ein Merge Request ist ein Revisionsprozess für die Integration von Quelltext-Änderungen in das Gesamtprojekt. Hierfür stellt ein*e Softwareentwickler*in zunächst den Antrag. Ein*e zuständige*r Fachexpert*in überprüft dann die Änderungen, schlägt zusätzliche (ggf. notwendige) Änderungen vor und führt diese schließlich mit dem Projekt zusammen.

Simulationsumgebung (simulation environment). Die gesamte Struktur aus Software und Hardware worin Modelle und Simulationen entwickelt und ausgeführt werden können.

Simulation (simulation). Als Simulation wird das Implementieren eines oder mehrerer Modelle in der Simulationsumgebung bezeichnet, um herauszufinden, wie Schlüsseleigenschaften des Realsystems sich über der Zeit verändern.

Entscheidungsträger*in (decision maker). Ein*e Entscheidungsträger*in ist eine Person, die mit Hilfe von Simulationsergebnissen eine Entscheidung trifft. Dies kann beispielsweise die Bauform des betrachteten Wärmenetzes sein, oder die Dimensionierung von dessen Komponenten.

Entscheidungsfindungsprozess (decision making process). Der Entscheidungsfindungsprozess ist derjenige Prozess, den ein*e Entscheidungsträger*in durchläuft, um mithilfe von

Simulationsergebnissen eine Entscheidung zu treffen. Der Entscheidungsfindungsprozess bedeutet nicht, eine Entscheidung über die Validität der Simulation zu fällen.

Insbesondere das Komponentenmodell ist zentraler Bestandteil der entwickelten V&V-Methodik, weshalb im folgenden Abschnitt eine kurze Einführung in die prinzipielle Funktionsweise von Komponentenmodellen gegeben wird.

2.2. Komponentenmodelle in Jarvis

Wie in Abschnitt 2.1 definiert, kann ein Komponentenmodell beispielsweise eine Komponente aus dem Fernwärmenetz repräsentieren. Das fertige Softwaremodell des Komponentenmodells kann innerhalb der Simulationsumgebung Jarvis als Simulation ausgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass es zusammen mit anderen Komponentenmodellen ein geschlossenes hydraulisches System ergibt. Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch einen Zusammenschluss von Komponentenmodellen in Jarvis.

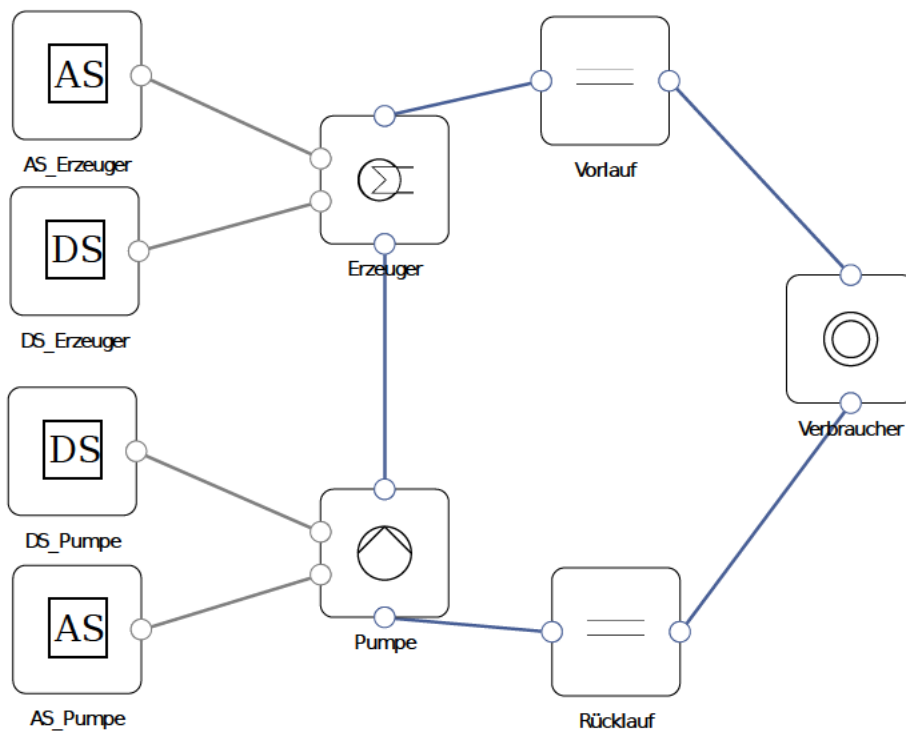


Abbildung 2.1: Exemplarischer Zusammenschluss von Komponentenmodellen in Jarvis

Instanzen von Komponentenmodellen werden durch quadratische Blöcke dargestellt. Schnittstellen zu anderen Komponenten, sogenannte Konnektoren, über die Informationen, z.B. über physikalische Größen, übertragen werden können, sind durch Kreise auf der Kontur der Blöcke dargestellt. Blaue Linien symbolisieren den Transport von Wasser, graue Linien elektrische

Signale. In diesem Beispiel handelt es sich um eine Pumpe mit zwei elektrischen Anschlüssen, einem Wärmeerzeuger mit zwei elektrischen Anschlüssen, einem Rohr als Vorlauf, einem Verbraucher und einem Rohr als Rücklauf.

Eine Schlüsseleigenschaft der Komponentenmodelle von Jarvis liegt in ihrer Flexibilität. Anwender*innen können technische Merkmale der Komponentenmodelle weitestgehend frei anpassen. Beispielsweise kann das Komponentenmodell einer Rohrleitung („Pipe_mTp“) quasi jedes reale oder fiktive Rohr repräsentieren. Kontrollierbare Merkmale werden in diesem Zusammenhang allgemein als Parameter bezeichnet. Zum besseren Verständnis späterer Ausführungen dieser Arbeit, werden die Parameter der Komponentenmodelle entsprechend Tabelle 2.1 weiter spezifiziert.

Tabelle 2.1: Unterteilung der Parameter von Komponentenmodellen

Art des Parameters	Beschreibung des Parameters	Beispiele
Realparameter	Wird genutzt, um direkt messbare Eigenschaften des Realsystems festzulegen	Rohrdurchmesser, maximale Drehzahl
Hilfsparameter	Wird genutzt, um indirekt Eigenschaften des Realsystems festzulegen	Koeffizienten eines Polynoms zur Abbildung der Pumpenkennlinie
Inputparameter	Wird zur Steuerung von Eigenschaften des Komponentenmodells genutzt, die während der Simulation veränderlich sind	Teillastbereich eines BHKW, Ventilöffnung
Architekturparameter	Wird nur benötigt, damit die Simulation ausgeführt werden kann	Startwerte von Inputparametern

Neben den kontrollierbaren Einflüssen wirken auf das Komponentenmodell während der Simulation auch Randbedingungen, also unkontrollierbare Einflüsse, die in Wechselwirkung mit dem Komponentenmodell stehen. Hierbei handelt es sich z.B. um thermohydraulischen Größen Massenstrom, Druck und Temperatur des Heizwassers im simulierten Wärmenetz. Diese Größen werden nachfolgend als Eintritts-, bzw. Austrittsgrößen bezeichnet. Die Eintrittstemperatur ergibt sich aus der Austrittstemperatur der Vorgängerkomponente. Druck und Massenstrom ergeben sich aus dem Gleichgewicht aller Komponenten, dessen Berechnung Teil der Architektur von Jarvis ist.

Unter Verwendung der vorgestellten Begriffen wird in Abbildung 2.2 eine vereinfachte Dar-

stellung der Funktionsweise von Komponentenmodellen gezeigt, um ihre Zusammenhänge zu verdeutlichen.

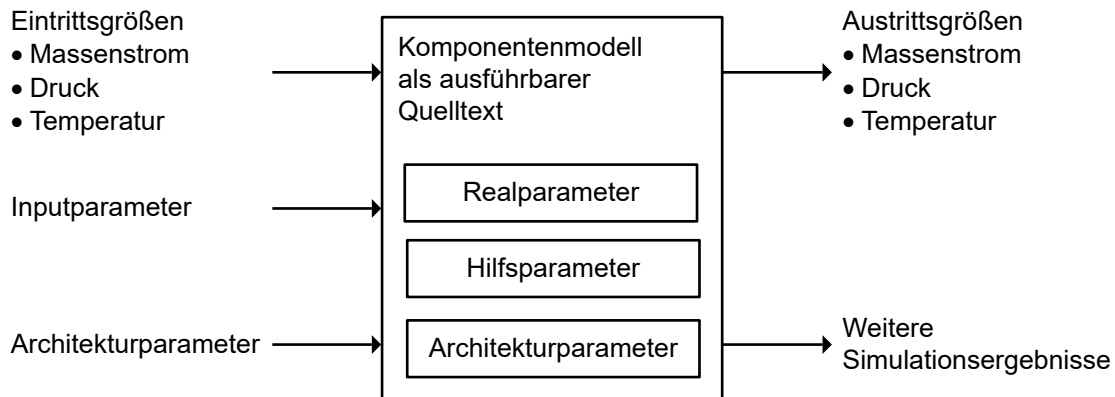


Abbildung 2.2: Prinzipielle Funktionsweise von Komponentenmodellen

Experimente (Versuche) mit einzelnen oder mehreren Komponentenmodellen sind wichtiger Bestandteile der entwickelten V&V-Methodik. Der Fachbereich, der sich mit der Planung von Versuchen beschäftigt nennt sich statistische Versuchsplanung. Eine kurze Einführung in die statistische Versuchsplanung wird im folgenden Abschnitt gegeben.

2.3. Statistische Versuchsplanung

Das Hauptziel der statistischen Versuchsplanung (englisch: Design of Experiment: DoE) ist es, die Kosten für eine Versuchsdurchführung zu reduzieren, während der Erkenntnisgewinn durch den Versuch möglichst groß ist. Die Methoden der DoE fokussieren sich hierfür auf statistische Techniken, um die Anzahl der Messwertaufnahmen zu reduzieren [1, 3, 38].

In der Literatur zur DoE wird spezielles Vokabular verwendet, das auf Begriffen der Statistik begründet ist. Nachfolgend werden einige dieser Begriffe erklärt und anschließend auf bereits vorgestellte Begriffe übertragen. Zu diesem Zweck wird in Abbildung 2.3 zunächst ein typisches System (Produkt / Prozess) dargestellt, das mit Hilfe der DoE untersucht werden soll [1].

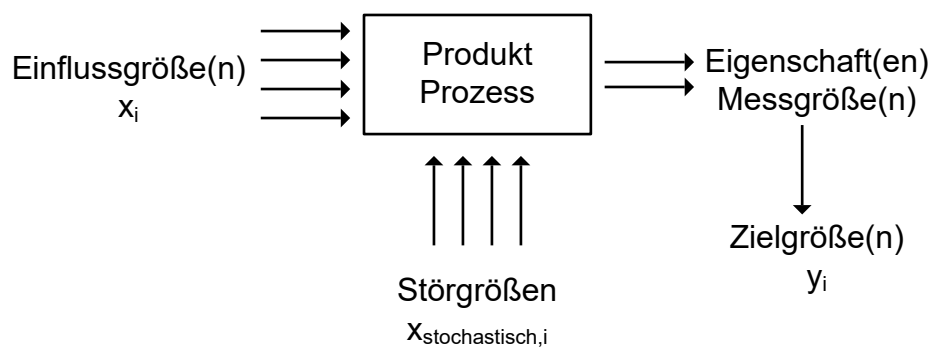


Abbildung 2.3: Typische Untersuchungsumgebung aus Sicht der DoE (vgl. [1])

Auf das System wirken Einflussgrößen (Faktoren) und Störgrößen. Einflussgrößen werden bei der Versuchsdurchführung gezielt auf bestimmte Werte (Stufen) eingestellt. Störgrößen können sich zufällig (stochastisch) ändern. Störgrößen sind zum Beispiel [1]:

- Größen, deren Einfluss nicht bedacht wurde
- Größen, die nicht beeinflussbar sind
- Einstellfehler bezüglich der Einflussgrößen
- Messfehler bezüglich der Zielgrößen

Zielgrößen sind diejenigen Größen, deren Messwerte oder Eigenschaften bei der Versuchsdurchführung von Interesse sind. Weiterhin wird die Anzahl der Faktoren mit k bezeichnet, die Anzahl der Stufen mit n . Der von den Versuchspunkten eingeschlossene Bereich wird als Versuchsraum bezeichnet. Die mithilfe von DoE ausgewählten Versuchspunkte und deren Reihenfolge werden Versuchsplan genannt.

Einige dieser Fachbegriffe können mit bereits eingeführten Begriffen der Wärmenetzsimulation in Verbindung gesetzt werden. Die Zusammenhänge sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Zusammenhang zwischen Begriffen der DoE und Begriffen der Simulation mit Jarvis

Begriffe der DoE	Jarvis-spezifische Begriffe	Beispiele
System (Produkt / Prozess)	Komponentenmodell, Realsystem	Pump_mTp, Pipe_mTp, reale Pumpe
Einflussgrößen (Faktoren)	Eintrittsgrößen, Inputparameter, (Realparameter)	Massenstrom, Druck, Temperatur, Analogsignal, (Rohrdurchmesser)

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 2.2: (fortgesetzt)

Begriffe der DoE	Jarvis-spezifische Begriffe	Beispiele
Zielgrößen	Austrittsgrößen, Simulationsergebnisse	Massenstrom, Druck, Temperatur, Wärmestrom

Hilfsparameter zählen nicht zu den Einflussfaktoren, Realparameter nur bedingt. Die Hintergründe hierfür werden in späteren Ausführungen dieser Arbeit erläutert.

Klassische DoE bietet Techniken zur Erstellung von Versuchsplänen, die mit möglichst wenig Messwerten einen möglichst großen Erkenntnisgewinn erlauben. Typisch sind zweistufige Versuchspläne. Hierbei werden Versuche durchgeführt, bei denen Einflussgrößen nur mit ihrem kleinsten (auf -1 normiert) und größten (auf +1 normiert) Wert eingestellt werden und ein linearer Zusammenhang angenommen wird. Zur Überprüfung dieser Annahme wird meist ein zusätzlicher Zentralpunkt im Zentrum des Versuchsraums gemessen. Die Abbildung 2.4 zeigt die Visualisierung eines vollfaktoriellen, zweistufigen Versuchsplans für $k = 3$ Faktoren. Vollfaktoriell bedeutet, dass für alle Kombinationen der Faktorstufen Messwerte aufgenommen werden.

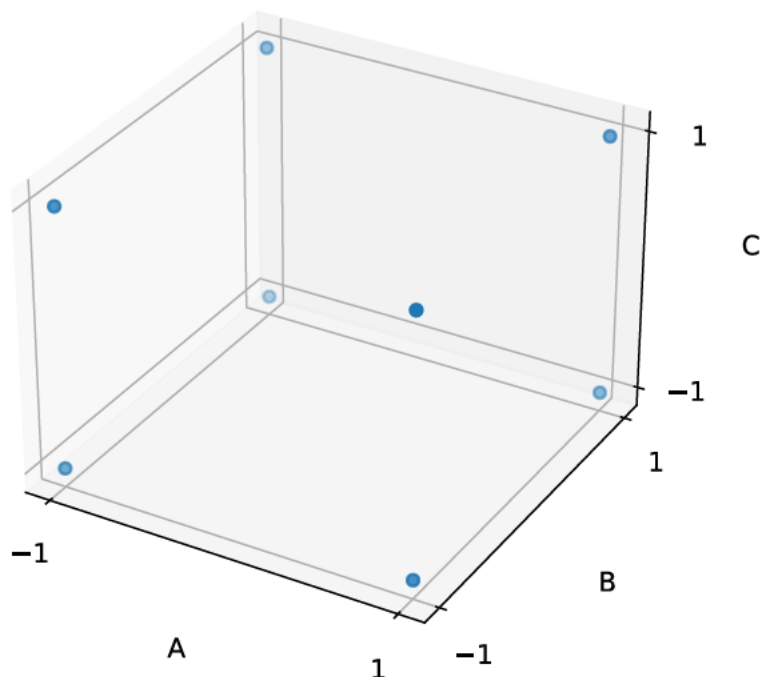


Abbildung 2.4: Vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren und zwei Stufen, erstellt mit DOEPy [35]

DOEPy (kurz für *Design of Experiments Generator in Python*) ist eine Python-Bibliothek zur

Erstellung von statistischen Versuchsplänen [35].

Versuchspläne werden typischerweise in tabellarischer Form dargestellt. Die Versuchspunkte des exemplarischen Versuchsplans aus Abbildung 2.4 sind in Tabelle 2.3 dargestellt, wobei die gängige Bezeichnung für Versuchspläne: n^k genutzt wird. Diese Bezeichnung gibt sofort Aufschluss über die Anzahl der Faktoren, Stufen und Versuchspunkte.

Tabelle 2.3: Vollfaktorieller 2^3 Versuchsplan mit drei Faktoren und zwei Stufen

Nr.	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Für Experimente mit einer großen Anzahl an Faktoren lassen sich vollfaktorielle Versuchspläne systematisch weiter reduzieren (z.B. zu teilfaktoriellen Plänen).

Moderne DoE wurde speziell für Computersimulationen entwickelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass Versuche automatisch durchgeführt werden können und eine große Anzahl an Messpunkten kein Problem mehr darstellt. Für deterministische Simulationen werden zum Beispiel Versuchspläne des Typs Latin Hypercube Design (LHD) empfohlen [19]. Diese Versuchspläne nutzen Pseudozufallszahlen¹ in Verbindung mit speziellen Algorithmen, um eine vorgegebene Anzahl an Versuchspunkten innerhalb des Versuchsraums zu verteilen. Die Anzahl der Versuchspunkte ist prinzipiell frei wählbar, sollte für einen praktischen Nutzen jedoch eine gewisse Anzahl nicht unterschreiten [19].

Zwei Beispiele für LHDs, die mit gleichen Eingangsdaten (3 Faktoren, 2 Stufen, 20 Versuchspunkte) erzeugt wurden, sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

¹Künstlich erzeugte Zahlen, die sich wie Zufallszahlen verhalten

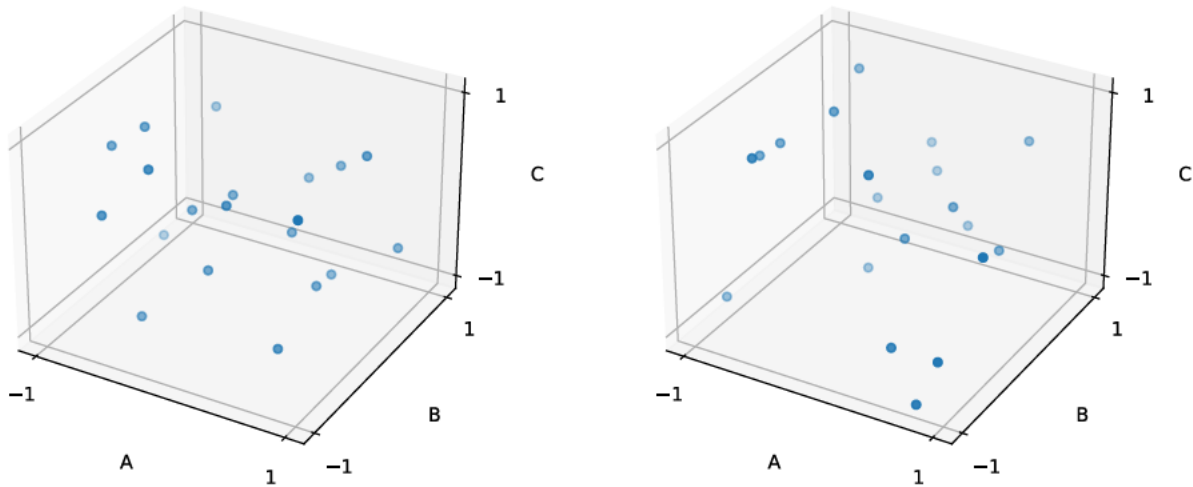


Abbildung 2.5: Zwei unterschiedliche Versuchspläne des Typs LHD, erzeugt mit gleichen Eingangsdaten, erstellt mit DOEPy [35]

Die moderne DoE beschränkt sich auf automatisch durchführbare Versuche, wodurch auch die Methoden der klassischen DoE relevant bleiben. Erstens sind die Möglichkeiten automatisierter Versuchsdurchführungen mit Jarvis beschränkt, zweitens sind sie für manuelle Messwertaufnahmen aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten unrealistisch.

Manuelle Messwertaufnahmen sind ein wichtiges Hilfsmittel bei der Überprüfung der Simulationsergebnisse. Vor Allem ist die Ermittlung der damit einhergehenden Messunsicherheit wichtig. Eine Einführung zu dieser Thematik wird im folgenden Abschnitt gegeben.

2.4. Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten

Allgemein gilt, dass das *Ergebnis* einer *Messung* nur eine *Annäherung*, oder *Schätzung* des wahren Wertes einer *Messgröße* ist. Infolgedessen ist die Angabe des Messergebnisses nur vollständig, wenn eine quantitative Aussage über die *Unsicherheit* des Messwertes hinzugefügt wird [8]. Nur mit der Angabe der Unsicherheit lässt sich entscheiden, ob das Messergebnis für einen bestimmten Verwendungszweck geeignet ist.

Messunsicherheiten lassen sich auf ganz verschiedene Weise angeben, weshalb der Wunsch nach internationalen Standards zur Entwicklung des *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) führte [27]. Die Entwicklung des GUM dient u.A. dem Zweck, Messungen in wissenschaftlichen und industriellen Bereichen international vergleichbar zu machen [7].

Aus diesem Grund werden die Methoden des GUM auch zur Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten in Verbindung mit der hier entwickelten V&V-Methodik verwendet. Nachfolgend werden für die Arbeit relevante Inhalte zu den Methoden des GUM vorgestellt.

Zunächst werden in Tabelle 2.4 einige Abkürzungen und ihre Bedeutung dargestellt, anschließend wird die Anwendung anhand einer Beispielrechnung demonstriert.

Tabelle 2.4: Abkürzungen und Bedeutungen ausgewählter Inhalte des GUM

Abk.	Bezeichnung	Beispiel
Y bzw. X	Wahrer Wert einer Messgröße Y bzw. X	$5.00 \text{ m}^3/\text{h}$
y bzw. x	Schätzwert für Y bzw. X	$5.10 \text{ m}^3/\text{h}$
n	Anzahl der unabhängigen Beobachtungen für die Messgröße X	20
X_k	k -ter beobachteter Wert für die Messgröße X	$4.90 \text{ m}^3/\text{h}$
\bar{X}	Arithmetischer Mittelwert der Beobachtungen von X	$5.10 \text{ m}^3/\text{h}$
$\sigma^2(X_k)$	Varianz der Wahrscheinlichkeitsverteilung der beobachteten Werte X_k	$0.04 \text{ m}^6/\text{h}^2$
$s^2(X_k)$	Experimenteller Schätzwert für $\sigma^2(X_k)$	$0.360 \text{ m}^6/\text{h}^2$
$\sigma^2(\bar{X})$	Varianz des Mittelwertes \bar{X}	$0.025 \text{ m}^6/\text{h}^2$
$s^2(\bar{X})$	Experimenteller Schätzwert für $\sigma^2(\bar{X})$	$0.030 \text{ m}^6/\text{h}^2$
$u(x)$	Standardunsicherheit: Unsicherheitsangabe für den Schätzwert x der Messgröße X nach GUM	$0.173 \text{ m}^3/\text{h}$

Allgemein wird davon ausgegangen, dass eine Messgröße Y als Funktion mehrerer Messgrößen X_i beschrieben wird.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \tag{2.1}$$

Zur Vereinfachung wird nachfolgend angenommen, dass die gesuchte Messgröße Y einer einzelnen Messgröße X entspricht.

$$Y = X \tag{2.2}$$

Der wahre Wert der gesuchten Messgröße X bleibt unbekannt und auch eine Messung ist nur eine Schätzung. Der Schätzwert für Messgröße X wird mit x bezeichnet. Die Empfohlene Angabe zur Messunsicherheit dieser Schätzung wird nach GUM als Standardunsicherheit $u(x)$ bezeichnet.

Die Methoden des GUM basieren auf der Annahme, dass sich die experimentell ermittelten Werte für X wie Zufallsvariablen verhalten, deren Eigenschaften durch eine Verteilungsform und ihre Parameter beschrieben werden können. Diese Kennzahlen bilden die Grundlage zur Berechnung der Messunsicherheit $u(x)$ und können prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten ermittelt werden.

Bei der **Typ-A-Ermittlung** werden Schätzungen der statistischen Kennwerte auf Basis mehrerer unabhängiger Beobachtungen der Messgröße X ermittelt. Der Schätzwert für den Erwartungswert ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der beobachteten Werte aus

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k. \quad (2.3)$$

Der Schätzwert für die Varianz der Wahrscheinlichkeitsfunktion von X beschreibt die Schwankungen der beobachteten Werte um ihren Mittelwert \bar{X} und ergibt sich aus

$$s^2(X_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2. \quad (2.4)$$

Der Schätzwert für die Varianz des Mittelwertes beschreibt, wie gut der Erwartungswert von X durch \bar{X} geschätzt wurde und wird berechnet mit

$$s^2(\bar{X}) = \frac{s^2(X_k)}{n}. \quad (2.5)$$

Der arithmetische Mittelwert \bar{X} entspricht dem Schätzwert x für die Einflussgröße X . Die experimentelle Standardabweichung des Mittelwertes $s(\bar{X}) = s(x)$ entspricht der Standardunsicherheit $u(x)$.

Bei der **Typ-B-Ermittlung** wird der Schätzwert x der Messgröße X nicht durch wiederholtes Beobachten ermittelt. Die zugehörige Varianz $u^2(x)$ und die Standardunsicherheit $u(x)$ werden hier durch eine wissenschaftliche Bewertung auf Basis aller verfügbaren Informationen der möglichen Schwankungen von X ermittelt.

Grundlage dieser wissenschaftlichen Bewertung können statistische Informationen aus Herstellerangaben, Handbüchern etc. sein, mit deren Hilfe sich auf die Standardabweichung des Messwertes zurückrechnen lässt.

Hier zu zählt auch die Bestimmung von $u^2(x)$ durch Annahme einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung von X . Beispiel: Wenn ein Messwert mit Sicherheit zwischen zwei Grenzen a_+ und a_- liegt (Wahrscheinlichkeit 1) und mit Sicherheit nicht außerhalb dieser Grenzen

(Wahrscheinlichkeit 0) und es keine weiteren Informationen zu der Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb dieser Grenzen gibt, dann kann für X eine Rechteckverteilung entsprechend Abbildung 2.6 angenommen werden [8].

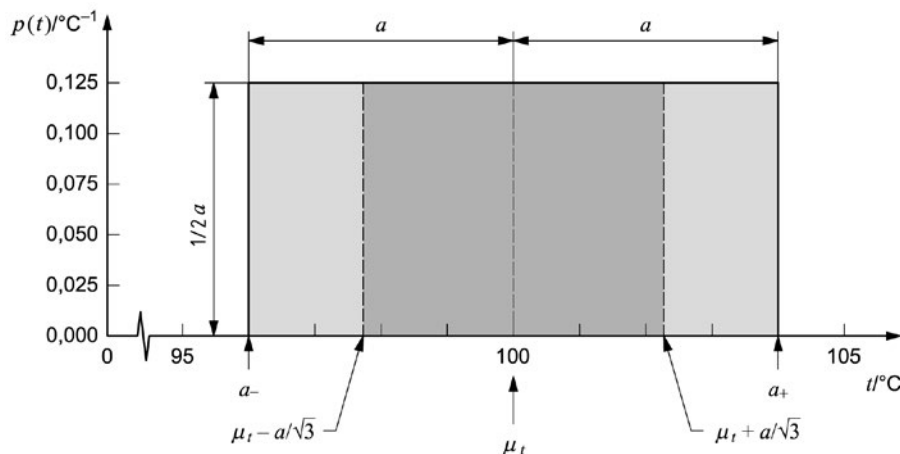


Abbildung 2.6: Exemplarische Rechteckverteilung beim Ermitteln eines Messwertes [8]

Der Schätzwert für den Erwartungswert von X ist dann der Mittelpunkt des Intervalls

$$x = \frac{a_- + a_+}{2}. \quad (2.6)$$

Die zugehörige Varianz der Rechteckverteilung ergibt sich aus

$$u^2(x) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}, \quad (2.7)$$

bzw. mit $a_+ - a_- = 2a$ aus

$$u^2(x) = \frac{a^2}{3}. \quad (2.8)$$

Die Annahme einer Rechteckverteilung kann beispielsweise beim Ablesen von Messgeräten mit Digitalanzeige sinnvoll sein.

Die Anwendung der Methoden nach GUM, insbesondere der Typ-A-Ermittlung, unterliegt wichtigen statistischen Voraussetzungen und besitzt ein hohes Fehlerpotential. Die zusammenfassende Darstellung in diesem Unterabschnitt dient dem Zweck, einen Eindruck der Methoden des GUM zu vermitteln und bestimmte Inhalte im späteren Verlauf dieser Arbeit besser verständlich zu machen. Sie ersetzt nicht die ausführliche Auseinandersetzung mit den Inhalten des GUM im Anwendungsfall.

2.5. Vorstellung ausgewählter Techniken der V&V

In den folgenden Unterabschnitten werden ausgewählte Techniken aus dem Gebiet der V&V vorgestellt. Die Auswahl beschränkt sich dabei auf diejenigen Techniken, deren Anwendung im weiteren Verlauf der Arbeit diskutiert wird. Eine Übersicht dieser Techniken mit zusätzlicher Einschätzung des notwendigen Aufwands wird in Abbildung 2.7 dargestellt. Die Bezeichnung und Beschreibung der Techniken orientiert sich aus den bereits genannten Gründen abermals an der *Modeling and Simulation Enterprise VV&A-Referenzwebsite* [24].

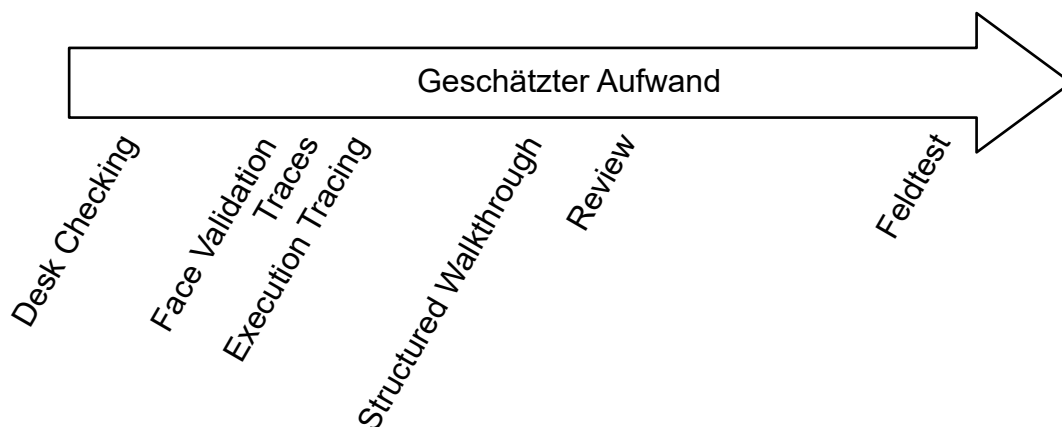


Abbildung 2.7: Übersicht ausgewählter Techniken der V&V entsprechend des geschätzten Aufwandes sortiert

2.5.1. Desk Checking

Beim Desk Checking, oder auch Self-Inspection, wird eine intensive Untersuchung des Ergebnisses einer Arbeit, eines Dokument usw. durchgeführt. Die Bezeichnung der Technik bezieht sich nicht darauf, dass ein*e Entwickler*in ihre / seine eigene Arbeit untersucht, sondern dass die Untersuchung von einer einzelnen Person durchgeführt wird. Für eine effektive Anwendung des Desk Checks wird empfohlen, dass die untersuchende Person nicht selbst Verfasser der untersuchten Arbeit ist.

2.5.2. Face Validation

Bei der Face Validation werden Simulationsergebnisse durch Entwickler*innen, potentielle Nutzer*innen des Simulationsmodells oder Fachexpert*innen begutachtet und plausibilisiert. Grundlagen der Einschätzung sind Erfahrungswerte und Intuition. Der notwendige Aufwand dieser

Technik kann steigen, wenn mehrere Gutachter*innen an der Face Validation teilnehmen und eine Diskussion erfolgt.

2.5.3. Traces / Execution Tracing

In Computermodellen werden meist eine Vielzahl an physikalischen Größen und anderen Variablen behandelt. Alle logischen Zusammenhänge sollten in einer frühen Phase der Entwicklung des Computermodells sehr genau geplant werden. Die Technik zur Überprüfung dieser logischen Zusammenhänge durch die schrittweise Verfolgung aller Variablen wird Traces genannt [33]. Diese Technik kann beispielsweise auf komplexe Ablaufdiagramme angewandt werden, um Fehler in der Logik (z.B. Sackgassen) zu identifizieren.

Etwas aufwendiger ist das Execution Tracing. Es bezeichnet die Anwendung von Traces auf Quelltext. Hierbei wird der Quelltext des Modells ausgeführt und das Verhalten der Variablen Zeile für Zeile verfolgt. Meist muss der Quelltext hierfür entsprechend manipuliert werden, damit die Ergebnisse analysiert werden können.

2.5.4. Structured Walkthrough

Structured Walkthroughs werden durchgeführt, um meist technische oder logische Fehler aufzudecken und zu dokumentieren. Es ist wichtig, dass es dabei nicht um eine Bewertung der/des Entwickler*in, sondern eine Bewertung der Arbeit geht. Dies muss jeder/jedem Teilnehmer*in des Structured Walkthrough klar sein, sodass eine offene und objektive Analyse gewährleistet ist. Üblicherweise werden beim Structured Walkthrough folgende Aufgaben durch die Teilnehmer*innen erfüllt:

- Koordinator*in, zur Organisation und Moderation
- Entwickler*in, der/die die Präsentation hält
- Protokollführer*in, um relevante Ereignisse und Ergebnisse zu dokumentieren
- Instandhaltungssoraker*in, mit dem Fokus auf langfristige Ziele
- Standardträger*in, der/die die Einhaltung von Standards bewertet
- Akkreditierungsagent*in der/die die Bedürfnisse und Bedenken der Anwender*innen vertritt
- Fachexpert*innen

Neben der/dem Entwickler*in sollte kein weiterer Teilnehmer des Structured Walkthrough direkt am Entwicklungsprozess der untersuchten Arbeit beteiligt gewesen sein.

2.5.5. Review

Beim Review wird eine Arbeit vor Allem mit dem Fokus auf Richtlinien oder **Spezifikationen** betrachtet. Ziel ist es, gegenüber den Vertreter*innen der Nutzer- und Entwicklergruppen den Beweis zu erbringen, dass der Simulations- und Entwicklungsprozess entsprechend der angegebenen Ziele durchgeführt wird. Anders als im Structured Walkthrough werden keine technischen Einzelheiten inspiziert, sondern die Arbeit auf höherer Ebene betrachtet.

Je nach Komplexität der Thematik sollten zur Vorbereitung entsprechende Dokumente erstellt und an die Teilnehmer*innen versendet werden, um das Review möglichst effizient durchzuführen.

Das Ergebnis des Reviews sollte erstens eine Bewertung der betrachteten Arbeit hinsichtlich Richtlinien oder Spezifikationen, zweitens die Dokumentation von Defiziten und Defekten, sowie drittens eine Empfehlung des Review-Teams zur Korrektur möglicher Defizite und Defekte sein.

2.5.6. Feldtest

Der Feldtest unterscheidet sich grundsätzlich von anderen V&V-Techniken, da er nicht unter Laborbedingungen stattfindet, sondern in realen Anwendungsfällen und mit realen Nutzer*innen („im Feld“) durchgeführt wird. Eine Analyse von Softwarefehlern, die während der Anwendung im Feld auftraten, hat gezeigt, dass die Identifikation einiger dieser Fehler im Labor unrealistisch und manchmal auch unmöglich ist [12].

Um diese Fehler frühzeitig zu erkennen und zu analysieren wurde der Feldtest entwickelt. Das Prinzip des Feldtests ist es, die entwickelte Software mit Hilfe zusätzlicher Mittel während der Anwendung durch Nutzer*innen zu untersuchen. Dieses Prinzip ist noch relativ neu und es gibt keine etablierte Vorgehensweise. Luca Gazzola hat in seiner Arbeit [12] prinzipielle Ansätze entwickelt, für die folgende zwei Herausforderungen als besonders bedeutsam identifiziert werden konnten.

Sicherheit. Oft werden Fehler, die nicht im Labor erkannt werden können, durch bestimmte Interaktionen mit externer Software verursacht. Effektive Feldtests müssen daher diese Interaktionen berücksichtigen und analysieren. Dabei steht die Sicherheit und der Komfort der Anwender*innen an oberster Stelle. Es muss sichergestellt werden, dass genügend zusätzliche Ressourcen (Overhead) für die Analyse verfügbar sind, sodass die Anwender*innen in ihrer Arbeit nicht eingeschränkt werden. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass durch die Interaktionen über die Grenzen der eigenen Software hinaus keine Daten gefährdet werden.

Komplexität. Die Analyse von Fehlern muss gezielt durchgeführt werden, um unnötigen Overhead zu vermeiden. Hierfür wird eine Überwachungsfunktion mit minimalem Overhead benötigt, welche die Nutzung der Software auf bestimmte Anwendungsfälle überwacht und im Bedarfsfall die Analysefunktion startet. Hierfür müssen zunächst die Anwendungsfälle definiert und ggf. klassifiziert werden. Weiterhin muss für jeden Anwendungsfall definiert werden, wann ein Fehler vorliegt.

Feldtests können eine wirkungsvolle Technik sein um Fehler frühzeitig zu erkennen, die unter Laborbedingungen selten erkannt werden. Im Vergleich zu anderen V&V-Techniken sind die Komplexität und der benötigte Aufwand jedoch deutlich höher.

3. Entwicklungsprozess der V&V-Methodik

Der Großteil dieser Arbeit bestand aus den drei Schritten (1) Literaturrecherche zum Thema V&V, (2) der Auswahl passender Techniken für das vorliegende Problem und (3) der Entwicklung einer Methodik zur Anwendung auf vorhandene und zukünftige Komponentenmodelle.

Dieser Abschnitt zeigt den Recherche- und Auswahlprozess einer geeigneten V&V-Methodik für den geforderten Anwendungsfall auf. Als Quintessenz dieses Abschnitts wird die entwickelte Methodik im darauffolgenden Abschnitt 4 zusammenfassend dargestellt und exemplarisch angewandt.

Ein Ergebnis der Literaturrecherche ist, dass ein V&V-Konzept nicht von einem dazugehörigen M&S-Konzept, also einem planmäßigen Modellbildungsprozess, trennbar ist [26, 29, 33, 36, 40]. Der Modellbildungsprozess zeigt die logischen Zusammenhänge wichtiger Tätigkeiten bei der Erstellung von Modellen und der Durchführung von Simulationen. Die Tätigkeiten der V&V dürfen dabei keine Restschuld sein, die nach der Erstellung der M&S-Komponenten beglichen wird. Sie müssen von Anfang an parallel zur Erstellung der M&S-Komponenten durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird nachfolgend zunächst ein M&S-Prozess entwickelt und vorgestellt, in dessen Struktur die V&V-Methodik integriert wird.

Der hier entwickelte Modellbildungsprozess baut maßgeblich auf einer Studie nach Morse et al. [26] und einem VV&A-Konzept nach Wojton et al. [40] auf.

Das Hauptziel von Morse et al. war ein Systems Engineering (SE) Framework mit dem Fokus auf eigenständige Modelle und Simulationen. Ein zentraler Aspekt dabei lag auf der engen Zusammenarbeit mit Organisationen, welche auf dem Gebiet der M&S tätig sind, um die Akzeptanz in diesem Fachbereich zu erhöhen [26]. Das SE Framework nach Morse et al. ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

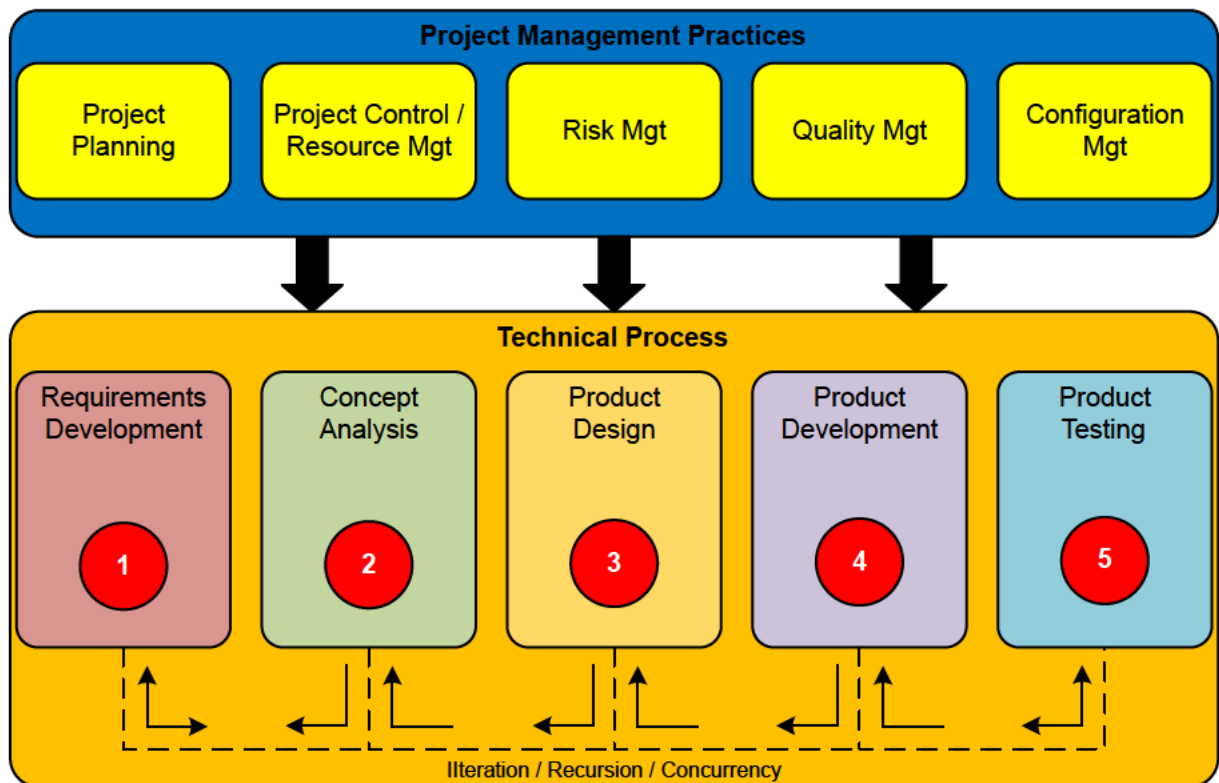


Abbildung 3.1: SE Framework nach Morse et al. [26]

Das SE Framework beinhaltet fünf technische Elemente (orange hinterlegt) und ein sechstes Management-Element (blau hinterlegt). In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den technischen Elementen. Jedes Element beinhaltet wiederum verschiedene Aktivitäten, die in Tabelle 3.1 aufgelistet sind.

Mit dem *Produkt* ist im ursprünglichen Sinne nach Morse et al. das gesamte Simulationsprojekt gemeint. In dieser Arbeit reduziert sich das Produkt auf das jeweils betrachtete Komponentenmodell. Da das Komponentenmodell keine eigenständige Simulationsumgebung darstellt, ergeben sich im Vergleich zum ursprünglichen SE Framework Besonderheiten in der dritten und vierten Phase (siehe Kurzbeschreibung in Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Aktivitäten der Phasen des SE Framework nach Morse et al.[26]

Phase	Aktivitäten	Kurzbeschreibung
1)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Anforderungen der Stakeholder ermitteln 2. Anforderungen an das Produkt ermitteln 3. Anforderungen validieren 	In der ersten Phase werden die Anforderungen an das Produkt ermittelt und validiert. Dies ist für einzelne Komponenten genau so essenziell wie für alleinstehende Simulationen.
2)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Entwickeln des konzeptuellen Modells 2. Konzeptuelles Modell validieren 	In der zweiten Phase wird ein theoretisches Konzept entwickelt, womit die Anforderungen an das Produkt erfüllt werden sollen.
3)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Funktionale Analyse 2. Design zusammenfassen 3. Design verifizieren 	In dieser Phase wird die Architektur entwickelt und verifiziert. Die Überprüfung der Architektur von Jarvis ist nicht Teil dieser Arbeit und wird im weiteren Verlauf ausgeklammert.
4)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einrichten der Software-Entwicklungsumgebung 2. Implementieren des Produktdesigns 	Die Entwicklungsumgebung ist in Jarvis bereits für alle Komponentenmodelle vorhanden und wird nicht weiter thematisiert. Für Komponentenmodelle reduziert sich diese Phase auf die Überführung des Konzeptes aus Phase 2 in Quelltext.
5)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Produkt verifizieren 2. Produkt validieren 	In dieser Phase wird der Quelltext der Komponentenmodelle verifiziert und die Simulationsergebnisse validiert.

In Wojton et al. [40] wird ein VV&A-Prozess vorgestellt, der jedoch ebenfalls M&S-Aktivitäten beinhaltet. Eine klare Trennung der V&V-Aktivitäten von den M&S-Aktivitäten wurde auch hier nicht durchgeführt. Der VV&A-Prozess nach Wojton et al. besteht aus neun Phasen, die in Tabelle 3.2 dargestellt sind. In der letzten Spalte der Tabelle werden die Phasen nach Wojton et al. mit den Phasen des SE Frameworks nach Morse et al. in Zusammenhang gebracht.

Tabelle 3.2: Aktivitäten der Phasen des VV&A-Prozesses nach Wojton et al.[40]

Phase	Aktivitäten	Phase nach Morse et al.
1)	Definieren des Anwendungszwecks	Phase 1
2)	Identifikation der Antwortvariablen und Messgrößen	Phase 1
3)	Ermitteln der Faktoren, welche die Antwortvariablen beeinflussen, oder für die operationale Validierung benötigt werden	Phase 1
4)	Ermitteln der Akzeptanzkriterien	Phase 1
5)	Anzahl der Daten abschätzen, die benötigt werden, um die Akzeptanzkriterien zu erfüllen	Phase 2
6)	Model-Test-Model-Schleife iterieren, bis das konzeptuelle Modell die benötigte Genauigkeit erreicht hat	Phase 2
7)	Verifizieren, dass das finale konzeptuelle Modell korrekt in ein Computermodell überführt wurde	Phase 5
8)	Quantifizieren der Unterschiede zwischen den Simulationsdaten und den Livedaten	Phase 5
9)	Akkreditieren des Simulationsmodells für dessen Anwendungszweck (ja / limitiert / nein)	/

Die erste Phase, die Definition des Anwendungszwecks selbst, ist zwar keine V&V-Aktivität, legt aber den Grundstein einer jeden Simulationsstudie und wird daher stets mit aufgeführt. Eine exakte Formulierung des Anwendungszwecks ist notwendig, damit die Entwicklung gezielt darauf angepasst wird und als Maßstab für das zu erreichende Ziel dient.

Die neunte Phase wird nicht in Morse et al. behandelt. In diesem Schritt wird das fertige Simulationsmodell für bestimmte Anwendungszwecke akkreditiert. Die Akkreditierung von Simulationsmodellen ist ein formaler Schritt und im Allgemeinen nicht üblich.

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Studie von Morse et al. und des VV&A Prozesses nach Wojton et al., wurde ein Modellbildungsprozess als Grundlage der V&V-Methodik dieser Arbeit entwickelt (Abbildung 3.2). Die Darstellung basiert auf einer Grafik nach Page et al. siehe Anhang C.

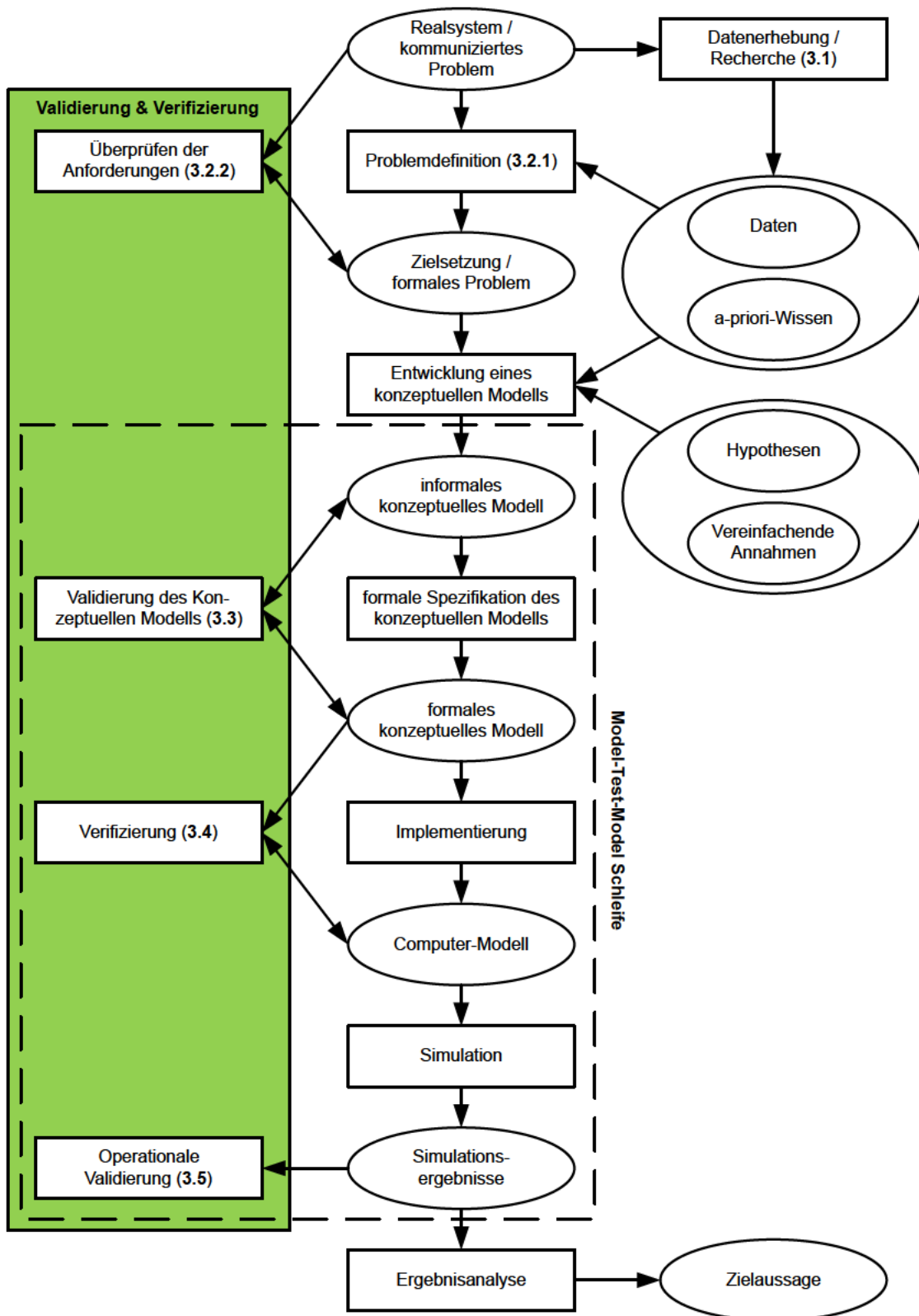


Abbildung 3.2: (Idealisierter) Modellbildungsprozess nach Page et al. [29]

In diesem Modellbildungsprozess stellen Rechtecke die Aktivitäten der Entwickler dar, Ellipsen deren Voraussetzungen bzw. Resultate. Aktivitäten die im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden sind durch die Angabe des jeweiligen Abschnittes in Klammern gekennzeichnet. Auf der linken Seite sind die Schritte des V&V-Prozesses dargestellt (grün hinterlegt). Sie sind während des gesamten Modellbildungsprozesses eng mit den restlichen M&S-Prozessen verbunden und stellen grundsätzlich iterative Prozesse dar (Kennzeichnung durch Doppelpfeile). Die Abbildung zeigt einen idealisierten Modellbildungsprozess, worin nur die Problemdefinition, die formale Spezifikation des konzeptuellen Modells und die Implementation einen iterativen Vorgang darstellen. In der Praxis ist es jedoch üblich, dass zwischen allen Schritten gesprungen wird. Grundsätzlich sind mehrere Iterationen von Modellbildung, Implementierung, Test und Ergebnisanalyse notwendig, um zu einem guten Ergebnis zu gelangen [36].

In den folgenden Abschnitten wird in angemessener Detailtiefe auf diejenigen Schritte des Modellbildungsprozesses Bezug genommen, welche für die V&V-Methodik von Relevanz sind. Es werden die besonderen Herausforderungen der einzelnen Schritte beschrieben und diskutiert, welche speziellen Techniken in der entwickelten V&V-Methodik empfehlenswert sind. Allgemein gilt für alle Abschnitte, dass die Modellbildung und die Qualitätssicherung von zwei unterschiedlichen Personen durchgeführt werden sollten [36].

3.1. Allgemeine Hinweise zur Datenerhebung und -qualität

Die Beschaffung von Daten in der benötigten Qualität ist meist schwierig, zeitintensiv und kostspielig. Oft scheitern Simulationsstudien, weil dieser Aspekt bei der Planung nicht berücksichtigt wurde [33]. In dieser Arbeit stellt die Datenqualität zwar eine wichtige Voraussetzung zur Anwendung der V&V-Methodik dar, die Art und Weise der Datenerhebung wird jedoch nicht spezifiziert. Eine umfangreiche Auflistung von Möglichkeiten wäre an dieser Stelle nicht zielführend. Im konkreten Fall kann die individuell passende Technik von einer Vielzahl an Faktoren abhängen, weshalb der Fokus nachfolgend auf allgemeinen Hinweisen zur Datenerhebung und -validität liegt.

Prinzipiell werden Daten während des Modellbildungsprozesses in drei Phasen benötigt. Für die Erstellung des konzeptuellen Modells, die Validierung und um Experimente mit dem Modell durchzuführen [33]. In dieser Arbeit wird die Verwendung der Daten zur Validierung betrachtet. Wenn die Daten jedoch für mehrere Zwecke verwendet werden sollen, so gilt die Einschränkung, dass zur Erstellung des konzeptuellen Modells und dessen Validierung nicht die selben Daten verwendet werden dürfen [36].

Allgemein gilt, dass alle erhobenen Daten auf ihre Qualität überprüft werden müssen [36]. Daten müssen „appropriate, accurate und sufficient“ sein [33]. Appropriate bedeutet, dass die Daten der Software und des Modells entsprechend aufbereitet werden, der Fokus also auf der

Form der Daten liegt. Diese Überprüfung wird auch als Verifizierung der Daten bezeichnet [23]. Accurate bedeutet, dass die Daten dem Realsystem entsprechen. Der Fokus liegt dabei auf den Datenwerten und wird auch als Validierung der Daten bezeichnet [23]. Sufficient bedeutet, dass die Anzahl der Daten ausreichend zur Anwendung der jeweiligen Technik sein muss. Diese Anforderung wird beispielsweise oft an statistische Tests gestellt (Anwendung des zentralen Grenzwertsatzes [1, 10]).

Um dies zu gewährleisten, können Datenanalysemethoden und Glättungsmethoden, aber auch Expertenbefragungen verwendet werden [36]. Wichtige Hinweise zu statistischen Methoden der Datenanalyse und wann sie angewandt werden sollten, sind beispielsweise im GUM zu finden [8]).

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, gute Prozesse zu entwickeln, um Daten zu ermitteln, die Daten zu testen, sie nach Ausreißern zu scannen und diese zu hinterfragen [33]. Einige Methoden lassen sich am besten im Laufe der Zeit durch wachsende Erfahrung entwickeln [8]. Ein Beispiel zur Ermittlung von Validierungsdaten ist in Abschnitt 4.2 gegeben, worin einige Techniken zwecks Validierung der Anwendbarkeit getestet werden.

3.2. Problemdefinition

Die Problemdefinition ist der erste Schritt des Modellbildungsprozesses. Hierbei werden diejenigen Kriterien herausgearbeitet, die mithilfe der V&V-Methodik validiert werden und an denen schlussendlich der Erfolg der jeweiligen Entwicklung bewertet wird [26].

Prinzipiell wird bei der Modellvalidierung einer Simulationsstudie von drei Fehlertypen gesprochen. Die Fehler 1. und 2. Art sind statistischer Natur und sind für Hypothesentests relevant. Der Fehler 3. Art kommt durch eine verzerrte oder unvollständige Wahrnehmung der Realität zustande. Hierbei wird das falsche Problem (ggf. richtig) gelöst. Eine Fehlerquelle hierfür ist eine unsorgfältige Problemdefinition [20]. Da die Lösung einer falschen Problemstellung die Lösung hinfällig macht, ist die korrekte Problemdefinition mindestens so wichtig, wie die Lösung des Problems selbst [4].

Die Inhalte der folgenden Unterabschnitte basieren maßgeblich auf einer Arbeit von Balci und Nance [4], dessen zentraler Bestandteil ein Leitfaden zur korrekten Formulierung der Problemdefinition für Simulationsstudien ist: Das Verfahren zur Problemformulierung auf höherer Ebene.

3.2.1. Verfahren zur Problemformulierung auf höherer Ebene

Balci und Nance behandeln in ihrer Arbeit zwei Klassen von Problemen, welche präskriptive und / oder deskriptive Lösungen benötigen. Präskriptive Lösungen unterstützen bei der Entscheidung, welche konkreten Aktionen durchzuführen sind, inklusive einer Bewertung wie gut oder schlecht diese Aktionen sind. Deskriptive Lösungen stellen Wissen bereit, ohne die Beurteilung wie gut oder schlecht dieses Wissen ist und welche Schlüsse daraus gezogen werden [4].

Auf Jarvis bezogen wäre eine Problemstellung, welche präskriptive Lösungen erfordert, die Frage nach der Bauweise eines Fernwärmenetzes. Zum Beispiel, ob es als Strahlnetz, Ringnetz oder Maschennetz ausgeführt werden soll. Eine Problemstellung, welche eine Lösung deskriptiver Art erfordert, könnte die Frage sein, um wie viel Prozent sich die Temperaturen im Netz unter der Verwendung neuer Technologien absenken lässt. Welche Lösung benötigt wird, hängt also von der individuellen Problemstellung ab.

Das vollständige Fließdiagramm zum Leitfaden nach Balci und Nance, welches beide Lösungswege beinhaltet, ist frei übersetzt in Abbildung 3.3 dargestellt.

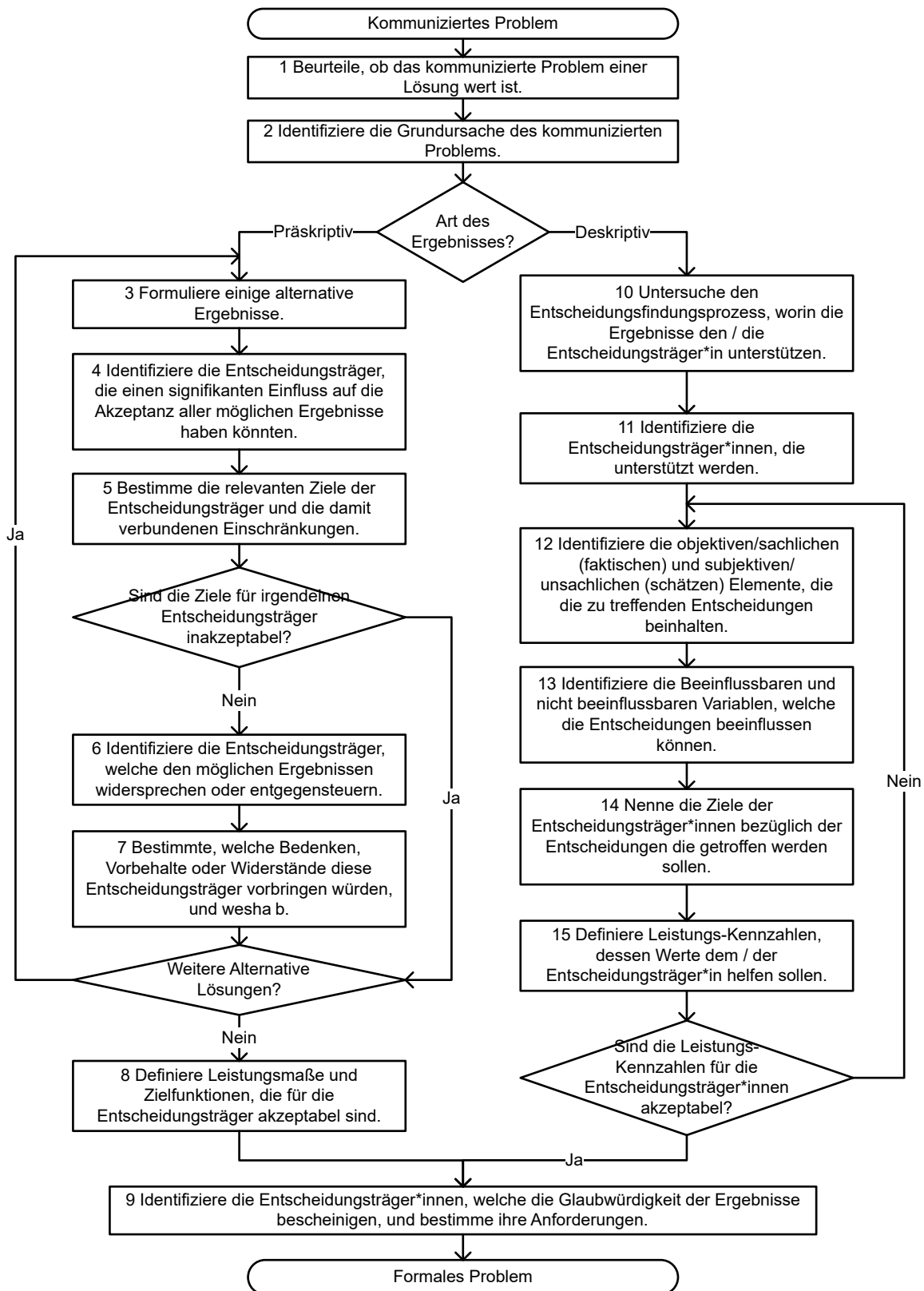


Abbildung 3.3: Ein Verfahren zur Problemformulierung auf höherer Ebene nach Balci und Nance [4]

Im folgenden Teil dieses Unterabschnitts wird gezeigt, wie die einzelnen, abstrakten Punkte des Leitfadens zur Anwendung auf die Komponentenmodelle von Jarvis konkretisiert werden.

Dabei wird die Reihenfolge des Flussdiagramms aus Abbildung 3.3 leicht angepasst. Für jeden Schritt werden die Inhalte anhand von Leitfragen und konkreten Beispielen in Tabellenform verdeutlicht. Der Bezug zu den Ursprünglichen Punkten des Leitfadens wird in den Tabellen durch einen Klammerausdruck hinter dem jeweiligen Schritt hergestellt: Schritt x (Punkt y).

Start. Initial wird das kommunizierte Problem benötigt, woraus am Ende des Leitfadens das formale Problem formuliert werden kann. Das kommunizierte Problem lautet für alle Komponentenmodelle gleich:

„Die Werte der benötigten Zustands- und Prozessgrößen, die durch das Realsystem erzeugt oder beeinflusst werden, sind unbekannt.“

Punkt 1. Im ersten Punkt des Leitfadens wird beurteilt, ob das kommunizierte Problem einer Lösung wert ist. Hierfür stand im Leitfaden unterstützend Tabelle 3.3 zur Verfügung.

Tabelle 3.3: Hilfstabelle 1 des Leitfadens nach Balci und Nance [4]

ID	Justify that the communicated problem is worthwhile to solve.
<1a>	If it is perceived that a set of current conditions deviate from a range of acceptable conditions or a desired set of conditions, go to <1d>.
<1b>	If a need is perceived to obtain some required information for decision making, go to <1e>.
<1c>	If a set of condition reflecting no significant deviation are sought, go to <1f>; otherwise go to <1g>
<1d>	Is this deviation significant? If not go to <1h>. Does the comparison of potential benefits of correcting this deviation with the estimated cost of correcting it justify an attempted solution? If not go to <1h>; otherwise go to Table 2.
<1e>	Does the comparison of potential utility of this information with the estimated cost of obtaining it justify obtaining this information? If not go to <1h>; otherwise go to Table 2.
<1f>	Does the comparison of potential benefits of this set of conditions with the estimated cost of achieving it justify the attempt to obtain this set of conditions? If not go to <1h>; otherwise go to Table 2.
<1g>	Examine the context of the communicated problem and reexamine the benefits / costs (B/C) ratio to justify a solution attempt. Go to Table 2.
<1h>	The problem is not worthwhile to solve. The solution cost is likely to exceed the return. Terminate.

Für Simulationen mit Jarvis trifft immer der Fall <1b> zu, wobei die Informationen den Werten der benötigten Zustands- und Prozessgrößen aus dem kommunizierten Problem entsprechen. Im weiterführenden Fall <1e> muss der potentielle Nutzen zur Beschaffung dieser Informationen die Kosten rechtfertigen. Die Kosten entsprechen dem Aufwand zur Erstellung des Komponentenmodells, das diese Informationen bereitstellt.

Der gesamte Modellbildungsprozess eines Komponentenmodells geht grundsätzlich mit erheblichem Aufwand einher. Je nach Komplexität sind mehrere Durchgänge der Model-Test-Model-Schleife (siehe Abbildung 3.2) zu erwarten. Hinzu kommen Dokumentation und Wartung der Software.

Im ersten Schritt der Problemdefinition von Komponentenmodellen sollte daher mindestens kurz diskutiert werden, ob der potentielle Nutzen des Komponentenmodells den notwendigen Aufwand rechtfertigt. Mögliche Leitfragen zur Diskussion und Beispiele sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.4: Zur Rechtfertigung für die Erstellung des Komponentenmodells

Schritt 1 (Punkt 1): Rechtfertigung für die Erstellung des Komponentenmodells

Mögliche Leitfragen:

- Könnten die Werte der Zustands- und Prozessgrößen auch anders beschafft werden?
 - Gibt es bereits andere (externe) Programme hierfür?
 - Muss es ein neues Komponentenmodell sein?
 - Können die Informationen auch durch ein bereits bestehendes (leicht modifiziertes) Komponentenmodell bereitgestellt werden?
 - Kann das Komponentenmodell auch zukünftig für andere Projekte hilfreich sein, oder wird es für eine sehr spezielle Fragestellung benötigt?
-

Beispiele:

- Eine Kreiselpumpe ist zentrales Element von Wärmenetzen und wird voraussichtlich in jeder Simulation benötigt. Ein allgemeines Modell zur Abbildung von Kreiselpumpen sollte in Jarvis vorhanden sein.
 - Eine sehr exotische Komponente mit geringem Einfluss auf die Zustands- und Prozessgrößen wird für eine bestimmte Fragestellung benötigt. Es stellt sich in der Diskussion jedoch heraus, dass diese Fragestellung gar nicht relevant für das übergeordnete Ziel des Projekts ist.
-

In Punkt 2 sollen die Grundursachen des kommunizierten Problems ermittelt werden. Für die Komponentenmodelle wird diese Analyse abweichend vom Leitfaden erst in Schritt 4 durchgeführt, da es in den meisten Fällen sinnvoll ist, erst gemeinsam mit den Entscheidungsträ-

ger*innen die benötigten Simulationsergebnisse (Schritt 3) zu ermitteln.

Da die Problemlösungen durch Jarvis stets deskriptiver Art sind, wird entsprechend des Leitfadens an dieser Stelle mit Punkt 10 fortgefahren.

Punkte 10 und 11. Im Punkt 10 des Leitfadens sollen konkrete Prozesse untersucht werden, bei denen die Simulationsergebnisse das Treffen von Entscheidungen unterstützen. Diese Untersuchung ist Grundlage zur Identifikation der Entscheidungsträger*innen im Punkt 11. Hierfür steht im Leitfaden unterstützend Tabelle 3.5 zur Verfügung.

Tabelle 3.5: Hilfstabelle 4 des Leitfadens nach Balci und Nance [4]

ID	Identify the decision maker(s) who may have a significant influence on the acceptability of the set of possible outcomes.
<4a>	Identify the aspects of the problem environment that may affect the acceptability of the set of possible outcomes.
<4b>	Identify all the relevant decision makers who influence the controlling of those aspects.
<4c>	Determine the range of control open to each decision maker.
<4d>	Determine the degree of influence each decision maker may have on the acceptability of the set of possible outcomes.
<4e>	Determine the means and channels through which each decision maker may exercise his influence.
<4f>	Identify those decision makers who can significantly influence the acceptability of the set of possible outcomes. Go to Table 5.

Der Leitfaden basiert auf der Annahme, dass die Problemdefinition für einen konkreten Fall durchgeführt wird. Jarvis hingegen ist dafür konzipiert, alle möglichen Anwendungsfälle zu berücksichtigen. Ein realer Entscheidungsfindungsprozess ist daher nicht immer vorhanden und auch die Entscheidungsträger*innen lassen sich nicht unbedingt namentlich bestimmen. Aus diesem Grund sollten in einem kreativen Prozess möglichst viele potentielle Anwendungsfälle und Personen(gruppen) identifiziert werden. Dieser kreative Prozess bildet den zweiten Schritt der Problemdefinition von Komponentenmodellen. Basierend auf Tabelle 3.5, sind in der folgenden Tabelle 3.6 einige Leitfragen und Beispiele zur Bearbeitung dieses Schrittes dargestellt.

Tabelle 3.6: Zur Untersuchung des Entscheidungsfindungsprozesses und Identifikation der Entscheidungsträger*innen

Schritt 2 (Punkte 10 und 11): Untersuchung des Entscheidungsfindungsprozesses und Identifikation der Entscheidungsträger*innen

Mögliche Leitfragen:

- Wird das Komponentenmodell für einen konkreten Fall benötigt?
 - Für welche (zukünftigen) anderen Fälle könnte das Komponentenmodell benötigt werden?
 - Welche Aspekte des Realsystems sind in diesen Fällen besonders relevant?
 - Welche Eigenschaften müssen die Simulationsergebnisse aufweisen, damit sie zur Unterstützung weiterer Entscheidungen akzeptabel sind?
 - Welche Personen(gruppen) entscheiden, ob ein Simulationsergebnis akzeptabel ist?
 - Wodurch wird diese Entscheidung beeinflusst? Wie Stark ist der Einfluss?
-

Beispiele:

- Im Projekt X ist der Einfluss des Komponentenmodells einer Kreiselpumpe auf die Druckerhöhung im Wärmenetz sehr wichtig. Wenn die Abweichung zu groß ist, dann wird Person Y die Simulationsergebnisse nicht als Grundlage einer Investitionsentscheidung akzeptieren.
 - Die notwendige Parametrierung des Komponentenmodells ist nur mithilfe der Informationen aus dem Datenblatt des Herstellers nicht möglich. Hieraus folgt, dass bei der Parametrierung zu große Unsicherheit herrscht und den Simulationsergebnissen kein Vertrauen geschenkt wird.
-

Es ist zu erwarten, dass viele Ergebnisse dieses kreativen Prozesses für mehrere Komponentenmodelle gültig sind, beispielsweise bei der Identifikation von Personengruppen. Die Ergebnisse anderer Komponentenmodelle sollten daher zur Vervollständigung hinzugezogen werden.

Punkt 12. Im Punkt 12 werden, gemeinsam mit den identifizierten Entscheidungsträger*innen, ihre möglichen Entscheidungen näher untersucht. Ziel hierbei ist die Identifikation von objektiven und subjektiven Aspekten einzelner Entscheidungen. Hierfür stand im Leitfaden unterstützend Tabelle 3.7 zur Verfügung.

Tabelle 3.7: Hilfstabelle 5 des Leitfadens nach Balci und Nance [4]

ID	Determine the relevant objective(s) of the decision maker(s) and the associated constraint(s).
<5a>	Examine the possible outcomes with the decision maker(s) to assess support for particular course(s) of action.
<5b>	Depending upon the response, identify the decision maker's choices related to goals that can be affected by the solution of the problem.
<5c>	Identify the objective (factual) and subjective (value) elements within each of the decision maker's choice.
<5d>	Define the objective(s) by using the element(s) identified.
<5e>	Define the constraint(s) by using the element(s) identified within the choices in connection with the decision maker's goals.
<5f>	If the set of possible outcomes is unacceptable to any one of the decision makers, go to <7e>; otherwise go to Table 6.

In <5a> sollen zunächst die möglichen Simulationsergebnisse untersucht und ihr Einfluss auf konkrete Entscheidungen bewertet werden. Weiterführend wird in <5b> beurteilt, wie die Simulationsergebnisse übergeordnete Ziele der Entscheidungen beeinflussen können. Auf Basis dieser Überlegungen werden in <5c> schließlich die objektiven und subjektiven Aspekte der möglichen Simulationsergebnisse identifiziert.

Bezogen auf die Komponentenmodelle von Jarvis dient dies (1) der Identifikation von objektiven Simulationsergebnissen, die zur Ableitung weiterer Entscheidungen notwendig sind und (2) der Identifikation von subjektiven Simulationsergebnissen, auf die verzichtet werden kann.

Allgemein wird für jedes Komponentenmodell der Einfluss auf Massenstrom, Temperatur und Druck des Wassers im Wärmenetz benötigt. Im speziellen Fall können weitere Simulationsergebnisse gefordert werden. Im Rahmen dieses Schrittes sollte auch der zulässige Bereich der Simulationsergebnisse definiert werden. Die Identifikation und Quantifizierung der benötigten Simulationsergebnisse ist der dritte Schritt der Problemdefinition von Komponentenmodellen. Einige Leitfragen und Beispiele zur Bearbeitung dieses Schrittes sind in Tabelle 3.8 dargestellt.

Tabelle 3.8: Zur Identifikation und quantifizierung der benötigten Simulationsergebnisse

Schritt 3 (Punkt 12): Identifikation und quantifizierung der benötigten Simulationsergebnisse

Mögliche Leitfragen:

- Welche Simulationsergebnisse müssen bereitgestellt werden, um konkrete Entscheidungen ableiten zu können?
 - Sind die geforderten Simulationsergebnisse objektiv begründet?
 - Für welchen Anwendungsbereich müssen die Simulationsergebnisse gelten?
-

Beispiele

- Bei einem Pumpenmodell soll die benötigte elektrische Leistung bereitgestellt werden. Dies ist unbedingt notwendig, damit eine Abschätzung der Betriebskosten des Wärmenetzes in Projekt X möglich ist.
 - Ein*e Entscheidungsträger*in fordert, die Stromstärke in den Wicklungen des Elektromotors einer Kreiselpumpe bereitzustellen. Es stellt sich heraus, dass hiermit keine objektiven Ziele verbunden sind und darauf verzichtet werden kann.
 - Da für die Berechnungen in Jarvis flüssiges Wasser angenommen wird, gilt für die Werte der Zustandsgrößen:
 - Dampfdruck $< p \leq$ maximal zulässiger Druck der Komponente nach Datenblatt
 - Gefrierpunkt $< t <$ Siedepunkt
-

Punkt 2. In Punkt 2 sollen die Grundursachen des kommunizierten Problems ermittelt werden. Dies dient dem Zweck die Systemumgebung zu erfassen und alle Einflüsse zu berücksichtigen. Zur Identifikation der Grundursachen steht im Leitfaden unterstützend Tabelle 3.9 zur Verfügung.

Tabelle 3.9: Hilfstabelle 2 des Leitfadens nach Balci und Nance [4]

ID	Identify root causes of the communicated problem.
<2a>	Examine the symptoms described within the communicated problem and analyze causality relationships within the context of the problem environment.
<2b>	List and label all the symptoms, problematic situations, problems, factors, and conditions that affect each other in causing the communicated problem.
<2c>	Construct a causality network by drawing a series of edges crossing the labeled elements in <2b> to represent how they relate to each other. (One can contribute to another, be caused by another, or be independent on another.)
<2d>	Identify the root causes as the ones with no indirected edges.

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 3.9: (fortgesetzt)

ID	Identify root causes of the communicated problem.
<2e>	If the communicated problem requires a prescriptive solution, go to Table 3. If it requires a descriptive solution, go to Stage 10.

Für Komponentenmodelle können die Symptome aus <2a> als die Simulationsergebnisse, inklusive aller damit verbundenen technisch- /physikalischen Effekte verstanden werden. Entsprechend <2b> und <2c> werden alle identifizierten Effekte aufgelistet und als kausales Netzwerk grafisch dargestellt. Die Grundursachen entsprechen oft bereits den späteren Inputparametern des Komponentenmodells. In Tabelle 3.10 sind Leitfragen und zur Bearbeitung dieses Schrittes dargestellt, sowie ein Beispiel für ein Pumpenmodell. Das dazugehörige kausale Netzwerk ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.10: Zur Analyse der technischen Zusammenhänge und Systemgrenzen

Schritt 4 (Punkt 2): Analyse der technischen Zusammenhänge und Systemgrenzen

Mögliche Leitfragen:

- Welche kausalen Zusammenhänge bestehen zwischen den Simulationsergebnissen und den ursächlichen physikalischen Effekten?
 - Werden an dieser Stelle bereits Messdaten benötigt, um die kausalen Zusammenhänge hinreichend zu verstehen?
 - Welche Einflussgrößen charakterisieren die Systemgrenzen des Komponentenmodells?
-

Beispiel für eine Pumpenmodell:

- (A) Druckdifferenz zwischen Ein- und Austritt
 - (B) Volumenstrom
 - (C) Elektrische Stromstärke durch die Wicklungen des Elektromotors
 - (D) Elektrische Spannung die am Elektromotor anliegt
 - (E) Steuerung
 - (F) Rotationsbeschleunigung des Elektromotors
 - (G) Kraftübertragung von den Laufschaufeln auf das Wasser
 - (H) Druckverluste durch die Anlage (Reibung, Stöße)
 - (I) Physikalische Beschaffenheit der Anlage (Druckverlustbeiwert)
 - (J) Massenträgheit der rotierenden Bauteile
-

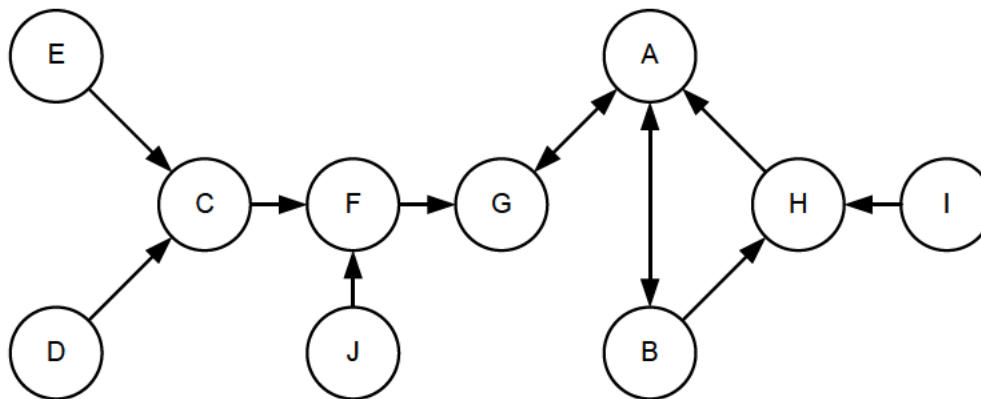


Abbildung 3.4: Wechselwirkungen von Symptomen und Einflüssen als kausales Netzwerk am Beispiel einer Kreiselpumpe

Als Grundursachen für die Druckdifferenz und den Volumenstrom können in diesem Beispiel entsprechend die elektrische Spannung (D), die Steuerung (E), der Druckverlustbeiwert der Anlage (I) und das Massensträgheitsmoment (J) identifiziert werden.

Punkt 13. Im Punkt 13 wird analysiert, welche Variablen im Rahmen des Entscheidungsfindungsprozesses beeinflussbar sind und welche nicht. Diese Analyse wird als Schritt 5 der Problemdefinition von Komponentenmodellen durchgeführt. Im Anwendungsfall wäre es denkbar, dass bestimmte Variablen nicht beeinflussbar sind. Beispielsweise die Rohrlänge vom Erzeuger zum Abnehmer. Auf die Entwicklung eines allgemeinen Komponentenmodelles bezogen ist davon auszugehen, dass zunächst alle Variablen beeinflussbar sind. Es sind aber auch Ausnahmen denkbar. Ein Beispiel hierfür und mögliche Leitfragen sind in Tabelle 3.11 dargestellt.

Tabelle 3.11: Zur Identifikation der Variablen der Simulationsergebnisse

Schritt 5 (Punkt 13): Identifikation der Variablen der Simulationsergebnisse

Mögliche Leitfragen:

- Welche Eigenschaften des Komponentenmodells sind für die Entscheidungsträger*innen relevant und variabel und müssen durch Parameter realisiert werden?
 - Welche Eigenschaften hängen voneinander ab und werden durch andere Eigenschaften indirekt festgelegt?
-

Beispiele:

- Beim Komponentenmodell eines Rohres sind Innendurchmesser, Außendurchmesser und Wandstärke variabel. Da sie jedoch voneinander abhängig sind, kann es sinnvoll sein, eine dieser Größen als nicht beeinflussbar zu klassifizieren.
-

Punkte 14 und 15. In Punkt 14 sollen die übergeordneten Ziele genannt werden, um in Punkt 15 Leistungskennzahlen zur Bewertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich dieser Ziele zu entwickeln. Ein übergeordnetes Ziel könnte beispielsweise die Minimierung der Wärmeverluste im Wärmenetz sein. Für eine Rohrkomponente ließe sich dann eine Leistungskennzahl entwickeln, um den optimalen Rohrdurchmesser für dieses Ziel zu berechnen. Die Komponentenmodelle in Jarvis sollen jedoch in der Regel nicht für ein bestimmtes Ziel entwickelt werden, sondern universell einsetzbar sein. Aus diesem Grund werden die Punkte 14 und 15 bei der Problemdefinition nicht berücksichtigt.

Punkt 9. Im letzten Punkt des Leitfadens würden diejenigen Entscheidungsträger*innen identifiziert, welche die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse, sowie die hierfür benötigten Anforderungen zertifizieren. Da für die Komponentenmodelle von Jarvis in voraussehbarer Zukunft keine Zertifizierung vorgesehen ist, wird dieser Schritt ebenfalls nicht weiter berücksichtigt.

Die Bearbeitung der unterschiedlichen Schritte soll dabei helfen, das Problem aus verschiedenen Perspektiven zu beleuchten und sukzessive ein umfängliches Bild der Problembeschreibung zu erhalten. Die Reihenfolge der einzelnen Schritte folgt dabei einer gewissen Logik, jedoch sollte die Problemdefinition als iterativer Prozess verstanden werden. Durch Analysen und Diskussionen in späteren Schritten lassen sich auch vorherige Schritte noch ergänzen (z.B. von Schritt 6 zurück zu Schritt 2).

3.2.2. Überprüfung des formalen Problems

Zusätzlich zum Leitfaden zur korrekten Formulierung der Problemdefinition, beschreiben Balci und Nance auch einen Ansatz, womit sich die Ergebnisse aus der Anwendung des Leitfadens auf ihre Korrektheit überprüfen lassen. Für diese Überprüfung muss das formale Problem durch diejenigen evaluiert werden, die aufgrund ihrer Erfahrung und ihres Wissens am besten mit dem Problem vertraut sind. Da der Analyst, der das Problem formuliert hat, ebenfalls Teil der Evaluierung ist, ist er selbst nicht für eine Beurteilung qualifiziert [4].

Anders als Balci und Nance es fordern, soll die Problemdefinition bei der Entwicklung der Komponentenmodelle von Jarvis nicht von einem einzelnen Analysten auf Basis von Befragungen etc. durchgeführt werden, sondern in Teamarbeit erfolgen. Das Entwicklerteam von Jarvis ist zu klein, als dass wichtige Kompetenzen auf die Formulierung, bzw. Überprüfung der Problemdefinition beschränkt werden sollten. Eine Überprüfung der Problemdefinition von Komponentenmodellen durch die Teilnehmer selbst ist daher zulässig. Falls nicht alle Fachexperten an der Problemdefinition teilgenommen haben, so sollten diese Fachexperten zumindest an der Überprüfung der Problemdefinition teilnehmen.

Grundlage des Ansatzes zur Überprüfung der Problemdefinition nach [4] sind 20 Indikatoren (siehe Anhang B), welche die Wahrscheinlichkeit einen Typ-3-Fehler zu begehen messen sollen [4]. Die Indikatoren wurden für die spezielle Anwendung in der Entwicklung von Komponentenmodellen aussortiert und spezifiziert. Die hieraus resultierenden acht Indikatoren mit einem jeweiligen Beispiel sind in Tabelle 3.12 dargestellt. In der ersten Spalte wird in Klammern Bezug auf die ursprünglichen Indikatoren nach Balci und Nance genommen.

Tabelle 3.12: Die Indikatoren zur Überprüfung eines Typ-3-Fehlers bei der Problemdefinition

Indikator	Indikation	Beispiel
1 (1)	Werden Probleme personalisiert?	Wichtige Eigenschaften des Komponentenmodells müssen realisiert werden, was jedoch einen erheblichen programmiertechnischen Aufwand bedeutet. Die für die Umsetzung verantwortliche Person versucht nun, dass diese Eigenschaften als nicht notwendig definiert werden. Eine stark defensive Haltung gegenüber einem angesprochenen Problem kann ein Hinweis darauf sein.
2 (3)	Sind die Zusammenhänge zu komplex?	Wissenslücken über die technisch- / physikalischen Zusammenhänge des Realsystems werden als irrelevant oder vernachlässigbar abgetan und führen zu einem unvollständigen und fehlerhaften Komponentenmodell.
3 (6)	Werden Meinungen als Fakten akzeptiert?	Eine Aussage zu den kausalen Zusammenhängen lässt sich nicht durch Messungen oder Berechnungen belegen und wird aus Bequemlichkeit als wahr akzeptiert.
4 (8)	Ist die Abstraktionsebene der Zusammenhänge ausreichend detailliert?	Der quadratische Zusammenhang zweier physikalischer Effekte wurde im Rahmen der Abstraktion linearisiert, wodurch ein wichtiges Simulationsergebnis nicht mehr mit hinreichender Genauigkeit berechnet wird.

Fortsetzung nächste Seite . . .

Tabelle 3.12: (fortgesetzt)

Indikator	Indikation	Beispiel
5 (9)	Beinhalten die Systemgrenzen das gesamte Problem?	Die kausalen Zusammenhänge eines Komponentenmodells wurden ohne Berücksichtigung der solaren Einstrahlung durchgeführt. Da das Komponentenmodell jedoch im freien eingesetzt wird, hat die Strahlungshitze erheblichen Einfluss auf die Wassertemperatur des Komponentenmodells.
6 (13, 14)	Ist die Informationsgrundlage ausreichend?	Zur Entwicklung eines neuen Komponentenmodells wurden Informationen und Daten eines bestimmten Typs des Realsystems verwendet. Dieses unterscheidet sich jedoch stark von anderen Typen, die ebenfalls durch das Komponentenmodell abgebildet werden sollen.
7 (17)	Wird das Problem unter dem Einfluss eines bestimmten Lösungsansatzes formuliert?	Während der Problemdefinition plant ein*e Entwicklerin bereits die Umsetzung anhand eines vereinfachten Konzeptes. Anstatt die kausalen Zusammenhänge am Realsystem zu analysieren, wird das vereinfachte Konzept als Grundlage verwendet und wichtige Einflüsse übersehen.
8 (20)	Ist das Problem aktuell?	Der Entwicklungsprozess eines Komponentenmodells dauert außergewöhnlich lange. Die ursprüngliche Problemdefinition lässt sich nicht mehr mit der Architektur von Jarvis vereinbaren, welche sich in der Zwischenzeit grundlegend verändert hat.

Es ist weiterhin empfehlenswert, dass die Indikatoren bereits während der Problemdefinition präsent sind. Dadurch können Hinweise auf eine fehlerhafte Problemdefinition schneller identifiziert und spontan behoben werden.

3.3. Validierung des konzeptuellen Modells

Das konzeptuelle Modell ist ein gedankliches Modell, das durch Abstraktion und Idealisierung entstanden ist [29]. Die Validierung des konzeptuellen Modells ist ein wichtiger Schritt bevor

daraus der Quelltext erstellt wird, da es erhebliche Mehrkosten bedeutet, Fehler nach der Erstellung des Quelltextes zu beseitigen [6]. Bei der Validierung des konzeptuellen Modells werden folgende zwei Aspekte getestet.

Erstens muss getestet werden, ob die zugrundeliegenden Theorien und Annahmen stimmen [33, 36]). Technische Komponenten, die in Wärmenetzen vorkommen, sind meist etablierter Standard und ihre Eigenschaften sind sehr gut untersucht und dokumentiert. In diesem Fall können bereits validierte Theorien und Annahmen üblicherweise aus entsprechender Literatur übernommen werden. Falls eigene Theorien und Annahmen entwickelt werden, sollten diese mit Hilfe mathematischer Analysen (z.B. Linearität, Unabhängigkeit der Parameter, statistische Verteilungen) gegenüber dem Realsystem getestet werden [33]. Hierfür sind Messdaten des Realsystems notwendig. Für jede verwendete Theorie sollte ein Review stattfinden, um sicherzustellen, dass sie korrekt angewendet wurde [33].

In einem weiteren Schritt muss geprüft werden, ob die Struktur, Logik und die mathematischen und kausalen Beziehungen des Modells passend zur Lösung des formalen Problems sind. Bewährte Techniken für diesen Schritt sind Desk Checking und Traces. Bei der Anwendung von Desk Checking zur Validierung des konzeptuellen Modells wird normalerweise ein Flussdiagramm oder eine grafische Abbildung des konzeptuellen Modells untersucht. Traces können verwendet werden um zu prüfen, ob die Logik des Modells korrekt ist [33].

Zur Anwendung auf Komponentenmodelle in Jarvis wird für alle verwendeten Theorien und Annahmen jeweils ein Review empfohlen. Das Review bietet mit seinem formalen Charakter und der Teilnahme zusätzlicher Fachexperten eine hohe Sicherheit, dass die gewählten Theorien und Annahmen den Anforderungen des formalen Problems entsprechen. Insbesondere selbst entwickelte Theorien sollten kritisch betrachtet werden und unbedingt mit Messdaten des Realsystems verglichen werden. Falls im Rahmen des Reviews bereits Verbesserungen möglich sind (z.B. eine passendere Theorie) oder Fehler aufgedeckt werden (z.B. falsche Annahmen) kann dies zeitintensive Nachbesserungen verhindern.

Der Desk Check eines Flussdiagramms des konzeptuellen Modells wird ebenfalls empfohlen. Dieser sollte in Kombination mit Traces durchgeführt werden. Die grafische Darstellung des konzeptuellen Modells hilft, dessen wichtigste Aspekte in einer übersichtlichen Form zu betrachten, zu diskutieren und dessen Logik durch Traces zu validieren.

Normalerweise sollte das Review zur Überprüfung der Theorien und Annahmen stattfinden, bevor daraus ein vollständiges grafisches Modell erstellt wird, das dann mit Hilfe von Desk Checking und Traces validiert wird. Handelt es sich um verhältnismäßig kleine Modelle, so können Review, Desk Check und Traces auch gleichzeitig durchgeführt werden. Die Anwesenheit zusätzlicher Fachexperten erhöht die Sicherheit des Desk Checks. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Qualität des Reviews dadurch nicht gefährdet wird. Der Ablauf eines Desk Checks mit Traces wird anhand eines fiktiven Beispiels in Abbildung 3.5 illustriert.

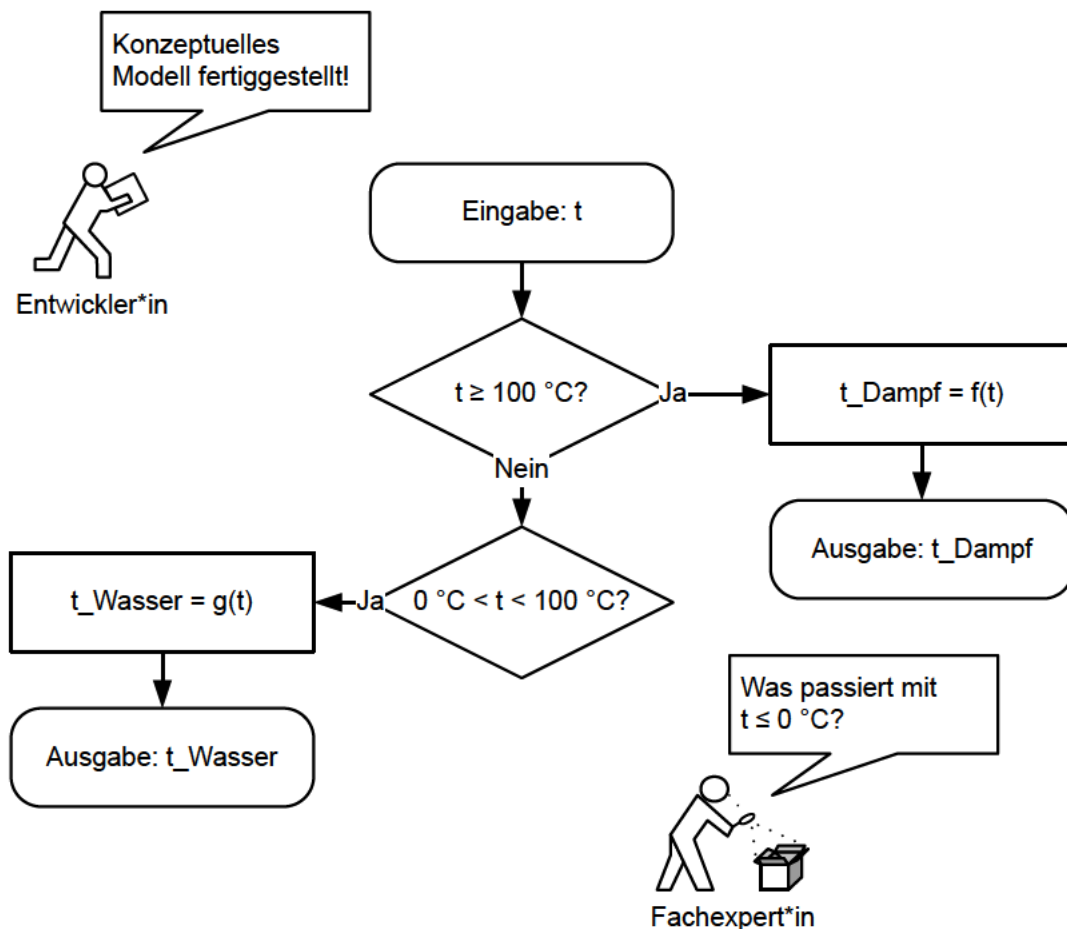


Abbildung 3.5: Fiktiver Ablauf eines Desk Checks mit Traces für das konzeptuelle Komponentenmodell

Bei der sorgfältigen Überprüfung des konzeptuellen Modells entdeckt die / der Fachexpert*in, dass das Konzept unvollständig ist: Nicht alle Möglichkeiten für die Eingabevariable wurden berücksichtigt. Dieser Fehler kann beispielsweise entstanden sein, weil die /der Entwickler*in die Möglichkeit von Temperaturen unter 0 °C im Wärmenetz von vornherein ausgeschlossen hat. Problematisch wird es jedoch, wenn alle Entwickler*innen diese Annahme stillschweigend treffen und der Fall gar nicht behandelt wird. Dies kann im schlechtesten Fall nach tagelanger Simulation eines großen Fernwärmenetzes bei winterlichen Temperaturen zum Abbruch der Simulation führen. Das Beispiel mag fiktiv sein und sehr unwahrscheinlich erscheinen, jedoch gibt es unzählige dieser seltenen Szenarien, wodurch sie in Summe eine reale Problematik darstellen. Die Logik des konzeptuellen Modells muss sorgfältig überprüft werden, bevor sie in Quelltext überführt wird.

3.4. Verifizierung

Nachdem das konzeptuelle Modell mit den genannten Techniken zufriedenstellend validiert wurde, wird das formale konzeptuelle Modell in Quelltext überführt. Der nächste Schritt der V&V-Methodik ist die Verifizierung dieses Quelltextes. Die Verifizierung stellt sicher, dass die Programmierung und Implementierung des konzeptuellen Modells korrekt ist [33]. Grundsätzlich ist die Frage nach der Notwendigkeit der Verifizierung gerechtfertigt, da mithilfe des Quelltextes nun eine Simulation ausgeführt werden kann und ein Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten (operationale Validierung, siehe Abschnitt 3.5) auf den ersten Blick hinreichend für die Glaubwürdigkeit eines Simulationsmodells erscheint. Es kann jedoch ein Fehler sein, vom korrekten Simulationsergebnis auf korrekte Einzelschritte zu schließen [36]. Auch bei zufriedenstellender operationalen Validierung können sich bestimmte Fehler negativ auf die Simulation auswirken, die sich nur durch die ausführliche Verifizierung des Quelltextes finden lassen. Aus diesem Grund ist eine Verifizierung des Quelltextes wichtig [29, 36, 40] und stellt daher einen elementaren Schritt bei der V&V von Komponentenmodelle dar.

Ein echter Beweis für die Korrektheit von Quelltexten ist durch die Anwendung von Techniken möglich, die auf formalen mathematischen Beweisen basieren [24, 33]. Die Anwendung solcher Beweise ist jedoch oft aufgrund der hohen Komplexität von Simulationssoftware unrealistisch [29]. Eher sollten die bewährten Methoden des Software-Engineerings sauber angewandt werden [29, 30, 33, 36].

Dies muss bereits bei der Erstellung des Quelltextes berücksichtigt werden. Als Teil der Verifizierung sollte der Quelltext auf diese Methoden hin überprüft und so die Glaubwürdigkeit in den Quelltext erhöht werden. Bei der Entwicklung von Komponentenmodellen in Jarvis wird diese Überprüfung durch einen Desk Check bereits im Rahmen des Merge Request durchgeführt.

Mehrfach zitierte Techniken zur Verifizierung von Quelltexten sind außerdem Structured Walkthrough und Execution Tracing [33, 36].

Beim Structured Walkthrough wird der Quelltext im Team betrachtet, was neben der Verbesserung der Quelltextqualität zwei weitere entscheidende Vorteile mit sich bringt [6]:

- Möglichst viele Teammitglieder verstehen den Quelltext und können daran (in Vertretung) mitarbeiten
- Andere Teammitglieder lernen durch die gemeinsame Betrachtung und Analyse der Quelltexte

Weiterhin sollte Structured Walkthrough aus zwei Gründen möglichst früh angewendet werden. Erstens können Fehler durch das vier-Augen-Prinzip effizienter gefunden werden. Dadurch werden aufwendige Fehleranalysen durch die Entwickler*innen alleine vermieden. Zweitens ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass durch den Structured Walkthrough nur selten Fehler entdeckt

werden, wenn die Entwickler*innen bereits viel Zeit investiert haben, um diese selbst zu beseitigen. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Teilnehmer*innen der Structured Walkthroughs im Laufe der Zeit unachtsam werden [6].

Für einen Structured Walkthrough gilt per Definition (siehe Abschnitt 2.5.4), dass neben den Entwickler*innen des Quelltextes keine weiteren Teilnehmer*innen direkt am betrachteten Aspekt involviert sein sollte. Da es sich beim Entwicklerteam von Jarvis jedoch um ein vergleichsweise kleines Team handelt, wird die Empfehlung für diese Arbeit dahingehend abgeschwächt, dass neben den Entwickler*innen mindestens ein*e Fachexpert*in teilnehmen muss, die / der nicht direkt am Entwicklungsprozess des betrachteten Quelltextes involviert war.

Die Verwendung von Execution Tracing ist obligatorisch. Nachdem Traces bereits zur Überprüfung der Logik des konzeptuellen Modells verwendet wurde, wird dessen Implementierung durch Execution Tracing verifiziert.

Eine weitere Möglichkeit ist es, mit Hilfe des fertigen Quelltextes bestimmte Probleme zu simulieren, für die analytische Lösungen bekannt sind [36]. Hierfür sind meist vereinfachte Randbedingungen notwendig. Wenn das gleiche Ergebnis herauskommt, deutet dies auf eine korrekte Übertragung des konzeptuellen Modells hin. Diese eher exotische Technik ist nur selten anwendbar. Gerade bei den deterministischen Komponentenmodellen ist dies jedoch öfters der Fall und sollte, wenn möglich, genutzt werden.

Die Reprogrammierung ist eine weitere Möglichkeit zur Verifizierung des Quelltextes. Hierbei wird der Quelltext durch eine weitere Person auf Basis des konzeptuellen Modells neu erstellt, wobei im Allgemeinen auch eine andere Programmiersprache verwendet werden kann [33, 36]. Für kritische Komponenten wird diese Technik explizit empfohlen [33]. Bei der Entwicklung von Komponentenmodellen in Jarvis bietet sich diese Technik besonders an, da sie beispielsweise von Praktikant*innen und Student*innen zur Übung im Umgang mit Jarvis durchgeführt werden kann. Auf diese Weise sind unabhängige Ergebnisse ohne großen Mehraufwand möglich. Es sollte jedoch die gleiche Programmiersprache verwendet werden, damit der Quelltext mit der Architektur von Jarvis kompatibel ist und sich die Ergebnisse der beiden Versionen besser vergleichen lassen.

Eine automatische Konsistenzprüfung [33, 36] lässt sich insbesondere bei Komponentenmodellen gut einsetzen. Hierbei können Werte zum Beispiel auf physikalische Grenzen überprüft werden. Wenn physikalisch unmögliche Werte entstehen, kann dies ein Hinweis auf eine fehlerhafte Übertragung des konzeptuellen Modells sein. Solche Kontrollfunktionen können jedoch auch die Simulationszeit nennenswert verschlechtern und es sollte individuell entschieden werden, wann dies notwendig ist [36]. Als Teil der V&V-Methodik für Komponentenmodelle in Jarvis wird empfohlen, bis zum vorläufigen Abschluss des V&V-Prozesses eines Komponentenmodells, alle physikalischen Größen auf ihren Geltungsbereich zu überwachen. Danach können die Kontrollfunktionen gegebenenfalls deaktiviert werden.

Eine weiteres Hilfsmittel zur Verifizierung des Quelltextes ist die Untersuchung von Input-Output-Beziehungen [33, 36]. Grafische Darstellungen bieten sich hier besonders an, da diese sich einfacher als Tabellen mit dem menschlichen Auge analysieren lassen. Der Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten wird im Rahmen der entwickelten V&V-Methodik der operationalen Validierung zugeschrieben, welche in Abschnitt 3.5 behandelt wird. Grundsätzlich sollte während des V&V-Prozesses bedacht werden, dass die Ursache eines Fehlers in jedem vorherigen Schritt liegen kann. Neben dem fehlerhaften Quelltext können auch die verwendeten Daten, das konzeptuelle Modell und das Computerprogramm für Fehler verantwortlich sein [33].

Für die Verifizierung des Quelltextes von Komponentenmodellen wurden sechs mögliche Techniken identifiziert. Je nach Komplexität des Quelltextes und dem Ermessen der / des Programmierer*in, kann eine Technik im individuellen Anwendungsfall mehr oder weniger gut geeignet sein. In Tabelle 3.13 werden die Techniken gegenübergestellt und eine konkrete Empfehlung zu möglichen Anwendungsfällen gegeben.

Tabelle 3.13: Gegenüberstellung der Techniken zur Verifizierung des Quelltextes mit Empfehlung zum Anwendungsfall

Technik	Anwendungsfälle	Vorteile
Structured Walkthrough	Der besondere Mehrwert dieser Technik liegt in ihrer didaktischen Wirkung. Der Structured Walkthrough sollte für besonders komplexe oder exotische Komponentenmodelle durchgeführt werden, damit andere Teammitglieder daraus lernen und die Inhalte verstehen.	Je mehr Teammitglieder sich auch mit komplexem Quelltext auskennen, desto agiler kann die Softwareentwicklung durchgeführt werden. Wenn es zeitlich zulässig ist, kann der Structured Walkthrough auch im Rahmen der wöchentlichen Softwarebesprechung für simplen Quelltext neuer Komponentenmodelle durchgeführt werden. So lässt sich der Quelltext verifizieren und die Grundprinzipien von Jarvis nebenbei an neue Teammitglieder vermitteln.
Execution Traces	Execution Traces sollte für alle Teile des Quelltextes durchgeführt werden, die auf einem konzeptuellen Modell basieren, das mithilfe von Traces validiert wurde.	Die Ergebnisse der beiden Techniken lassen sich durch eine einfache Liste vergleichen und ermöglichen ein quantitatives Urteil.

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 3.13: (fortgesetzt)

Technik	Anwendungsfälle	Vorteile
Ausführen von Problemen mit bekannten Randbedingungen	Diese Technik sollte durchgeführt werden, wenn das konzeptuelle Modell aus einer bereits validierten Quelle mit Beispielrechnungen stammt.	In diesem Fall lassen sich die Beispielrechnungen auf einfache Weise durch den Quelltext reproduzieren und die Ergebnisse vergleichen.
Implementieren von Kontrollfunktionen	Kontrollfunktionen sollten immer verwendet werden, wenn der zulässige physikalische Anwendungsbereich in der Problemdefinition beschränkt wurde.	Die Implementierung von Kontrollfunktionen für einzelne Komponentenmodelle ist in der Regel ohne größeren Aufwand möglich und Dimensionierungsfehler lassen sich so mit hoher Wahrscheinlichkeit identifizieren.
Reprogrammierung	Reprogrammierung sollte für Komponentenmodelle mit besonders komplexem konzeptuellen Modell durchgeführt werden.	Je komplexer das konzeptuelle Modell ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit von Übertragungsfehlern. Diese lassen sich durch eine unabhängige Wiederholung der Implementierung am ehesten identifizieren.
Desk Check	Der Desk Check stellt die Mindestanforderung an die Verifizierung von Quelltext dar und für ist jede Zeile pflicht.	Hierbei wird die saubere Anwendung bewährter SE-Methoden überprüft, was die meistzitierte Technik zur Gewährleistung eines korrekten Quelltextes ist.

Es ist denkbar, dass bestimmte Abschnitte des Quelltextes für mehrere Komponentenmodelle identisch sind. In diesem Fall kann die Notwendigkeit einer erneuten Überprüfung gänzlich hinterfragt werden.

3.5. Operationale Validierung

Nachdem eine akzeptable Sicherheit besteht, dass der Quelltext korrekt das konzeptuelle Modell abbildet, kann das Modell als Simulation ausgeführt werden. Im Rahmen der operativen Validierung werden dann die Simulationsergebnisse geprüft. Das Ziel der operativen

Validierung (OV) ist sicherzustellen, dass das Komponentenmodell alle definierten Anforderungen erfüllt. Die Zufriedenheit der Entscheidungsträger*innen ist das übergeordnete Ziel der OV [26].

Eine Besonderheit bei der OV der Komponentenmodelle in Jarvis ist, dass sie nicht alleinstehend ausgeführt werden können und daher eine Testumgebung aus anderen Komponentenmodellen erstellt werden muss. Dies hat zur Folge, dass auch die Architektur von Jarvis und die anderen Komponentenmodelle Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Bei der Identifikation von Fehlerquellen müssen die Architektur und andere Komponentenmodelle stets mit in Betracht gezogen werden.

Allgemein gilt bei der OV, dass der Einfluss von Einschwingvorgängen ausgeschlossen werden muss. Hierfür eignen sich visuelle Kontrollen besser als schematische Verfahren [36].

Oberkampf und Roy beschreiben die Modellvalidierung mit den Worten: „[...] if you are not comparing model predictions of system response quantities (SRQs) with experimental measurements of the SRQs for the purpose of assessing the accuracy of the model, you are not conducting model validation.“ [28]. Diese Sichtweise ist besonders drastisch, aber auch verständlich, denn nur durch den Vergleich mit umfangreichen Daten des Realsystems ist ein hohes Maß an Sicherheit erreichbar [33].

In welchem Umfang das Realsystem untersuchbar ist, bestimmt welche Ansätze bei der operationalen Validierung möglich sind [33]. Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur operationalen Validierung sind in Tabelle 3.14 dargestellt.

Tabelle 3.14: Grundsätzliche Möglichkeiten zur operationalen Validierung nach [33]

	Untersuchung des Realsystems möglich	Untersuchung des Realsystems nicht möglich
Subjektiver Ansatz	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten durch Verwendung grafischer Anzeigen • Untersuchen des Outputverhaltens des Simulationsmodells mittels Parameter-Variability-Sensitivity-Analysis etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchen des Modellverhaltens • Vergleich mit anderen Modellen
Objektiver Ansatz	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten durch Verwendung statistischer Tests und Methoden 	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich mit anderen Modellen mit Hilfe statistischer Tests

Für alle Ansätze gilt, dass im Allgemeinen kein Beweis für die Richtigkeit des Modells möglich ist [29, 33].

Es lässt sich jedoch das Vertrauen in die Gültigkeit des Komponentenmodells, im Rahmen bestimmter Problemstellungen erhöhen [29].

Dies ist das zentrale Ziel der OV für die hier entwickelten V&V-Methodik. Im weiteren Verlauf des Abschnittes werden hierfür verschiedene Techniken vorgestellt und argumentiert, weshalb sie (nicht) zur Anwendung auf die Komponentenmodelle von Jarvis geeignet sind.

Die operationale Validierung sollte strukturell in drei Teilschritte gegliedert werden [40]. Im ersten Schritt, der Explorativen Datenanalyse (EDA), werden die Simulationsergebnisse visualisiert, sodass ein erster Eindruck der Daten ermöglicht wird. Im zweiten Schritt, der Internen Operationalen Validierung (IOV), werden interessante Eigenschaften der Simulationsergebnisse herausgearbeitet. Im letzten Schritt, der Externen Operationalen Validierung (EOV), werden die Simulationsergebnisse mit Validierungsdaten verglichen.

Für alle Teilschritte werden Simulations- und / oder Validierungsdaten benötigt. Welche Herausforderungen hierbei im Fall der Komponentenmodelle bestehen, wird zunächst im folgenden Unterabschnitt behandelt, bevor anschließend die Inhalte der oben genannten Teilschritte erläutert werden.

3.5.1. Auswahl der Versuchspunkte zur operationalen Validierung

Die Auswahl der Versuchspunkte ist die erste Herausforderung der operationalen Validierung. Das Problem der großen Anzahl von Versuchspunkten bei vielen Einflussgrößen wurde bereits im Abschnitt 2.3 deutlich. Einige Komponentenmodelle besitzen über 10 Parameter, wodurch vollfaktorielle Versuchspläne mit nur zwei Stufen bereits über $2^{10} = 1024$ Versuchspunkte beinhalten würden. Manuell durchgeführte Versuche sind in diesem Fall unrealistisch. Wie dieses Problem entschärft werden kann, wird nachfolgend beschrieben.

Allgemein müssen nur Parameterkombinationen betrachtet werden, die ein sinnvolles und messbares Realsystem ergeben. Es fallen beispielsweise alle Kombinationen weg, in denen der Außendurchmesser eines Rohres kleiner oder gleich dem Innendurchmesser ist. Weiterhin sind einige Parameter nur in bestimmten Kombinationen sinnvoll. So werden Rohre oft nach Norm gefertigt, sodass der Innendurchmesser eines realen Rohres nur in bestimmten diskreten Werten sinnvoll ist und jeweils genau ein Außendurchmesser dazu passt. Diese Rahmenbedingungen des Simulationsmodells sollten bestenfalls bereits in der Problemdefinition (Abschnitt 3.2) festgelegt werden. Falls eine Einschränkung in der Problemdefinition nicht gewünscht ist, so muss sie bei der Auswahl der Versuchspunkte zur operationalen Validierung stattfinden. Aus

diesen Überlegungen lässt sich der erste Schritt zur Auswahl der Versuchspunkte formulieren:

1. Die Kombinationen der Parameter werden sinnvoll eingegrenzt

Dieser Schritt kann nicht allgemeingültig weiter spezifiziert werden und muss sorgfältig, individuell für jedes Komponentenmodell durchgeführt werden. Nachdem die Parameterkombinationen sinnvoll eingegrenzt sind, werden mit Hilfe der DoE diejenigen Versuchspunkte ausgewählt, die im jeweiligen Fall verwendet werden sollen.

2. Die Versuchspunkte werden mit Hilfe von DoE ausgewählt

Für eine Messwertaufnahme am Realsystem wird klassische DoE empfohlen [40]. Für die Komponentenmodelle in Jarvis wird klassische DoE allgemein für alle manuell ermittelten Versuchspunkte empfohlen, beispielsweise beim Ablesen von Diagrammen aus einem Datenblatt. Zusätzlich zu den typischen Versuchsplänen der klassischen DoE kann es im speziellen Fall der Komponentenmodelle sinnvoll sein, Versuchspunkte zu wählen, die in der Praxis besonders häufig vorkommen (z.B. bestimmte Temperaturen oder Drücke im Wärmenetz). Erstens ist davon auszugehen, dass für diese Versuchspunkte überdurchschnittlich viele Messwerte vorhanden sind und zweitens sind sie für die Praxis besonders relevant.

Falls Validierungsdaten automatisiert generiert werden können, zum Beispiel wenn das Komponentenmodell mit einem anderen Computermodell verglichen wird, dann sollten Techniken der modernen DoE verwendet werden [40]. Die Techniken der modernen DoE sind in Jarvis derzeit jedoch nur bedingt anwendbar, da während eines Simulationsdurchlaufs nur Inputparameter veränderlich sind. Falls die zu untersuchenden Eigenschaften eines Komponentenmodells ausschließlich durch Inputparameter repräsentiert werden, so lassen sich moderne Versuchspläne mithilfe von Zeitreihen realisieren.

Damit Versuchspläne der modernen DoE für Komponentenmodelle durchgeführt werden können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens müssen Simulationsdurchläufe automatisiert, mit wechselnder Parametrierung durchführbar sein. Zweitens muss der Einfluss von Einschwingvorgängen dabei ausgeschlossen werden. Konkrete Hinweise zur Realisierung werden in Abschnitt 4.4 gegeben.

3.5.2. Explorative Datenanalyse

Das Hauptziel der EDA ist es, ein Grundverständnis der Simulationsdaten zu bekommen [40]. Dieser Schritt ist nicht auf formalen Regeln begründet, sondern stellt eher einen kreativen Prozess dar. Im Rahmen der EDA können die ersten Simulationsergebnisse per Face Validation plausibilisiert werden [36].

Der Versuchsplan, mit dem die Simulationsdaten von Komponentenmodellen zur Face Validation erzeugt werden, könnte zum Beispiel eine Variation der Inputparameter beinhalten, die auf ca. 5 Stufen über den zulässigen Bereich verteilt werden. Dies ist mit geringem Aufwand durch Zeitreihen realisierbar und kann bereits einen aussagekräftigen ersten Eindruck ermöglichen. Bei der Durchführung von Versuchsplänen mithilfe von Zeitreihen ist jedoch erhöhte Vorsicht geboten. Gegebenenfalls braucht das System nach dem Wechsel auf den nächsten Versuchspunkt eine gewisse Einschwingzeit, um einen stationären Zustand zu erreichen.

Mit zusätzlichem Aufwand kann auch die Variation bestimmter Real- und Hilfsparameter berücksichtigt werden. Realparameter könnten beispielsweise mit 2 Stufen (Randwerte der zulässigen Bereiche) parametrisiert werden, während die anderen Parameter auf mittlerem Niveau bleiben.

Das vorangegangene Beispiel ist als Versuchsplan in Tabelle 3.15 dargestellt.

Tabelle 3.15: Exemplarischer Versuchsplan bei der Durchführung der EDA

Nr	Inputparameter 1	Realparameter A	Realparameter B	Realparameter C
1	- 1	0	0	0
2	- 0.5	0	0	0
3	0	0	0	0
4	+ 0.5	0	0	0
5	+ 1	0	0	0
6	0	-	0	0
7	0	+	0	0

Es handelt sich bei dem beschriebenen Beispiel um einen rein fiktiven Versuchsplan und dient der Anschaulichkeit. Das Vorgehen während der EDA bleibt dem Entwickler überlassen.

Die relevanten Eintritts- und Austrittsgrößen der Simulation werden in geeigneten Diagrammen dargestellt, um sie für die Face Validation vorzubereiten. Sobald alle notwendigen Versuche durchgeführt wurden und das Komponentenmodell zufriedenstellend plausibilisiert wurde, wird mit der IOV fortgefahren.

3.5.3. Interne Operationale Validierung

Allgemein ist das Ziel der IOV, das Simulationsmodell auf interessante Eigenschaften hin zu untersuchen. Hierfür eignen sich beispielsweise Variationsanalysen, sowie statistische Emulatoren [40]. Variationsanalysen können mittels Monte Carlo Analyse oder Sensitivitätsanalyse

durchgeführt werden [40], wobei erstere nur bei stochastischen Simulationen sinnvoll ist. Da zum derzeitigen Stand von Jarvis keine stochastischen Vorgänge simuliert werden, wird nachfolgend die Sensitivitätsanalyse näher betrachtet.

Eine Sensitivitätsanalyse kann dazu genutzt werden, die quantitativen Einflüsse einzelner Faktoren auf die Simulationsergebnisse einzuschätzen [40]. Hieraus wird deutlich, an welchen Stellen das Simulationsmodell optimiert werden sollte, wenn eine höhere Genauigkeit gewünscht ist [40]. Mit der Sensitivitätsanalyse lässt sich weiterhin die Frage nach der Stabilität des Modells beantworten: Wenn sich kleine Änderungen einer Einflussgröße bereits stark auf eine Austrittsgröße auswirkt, lässt sich diese Einflussgröße vielleicht überhaupt nicht in der notwendigen Genauigkeit erfassen [36]. Das Simulationsmodell gilt dann als instabil.

Zur Anwendung in Jarvis ist die Sensitivitätsanalyse zum derzeitigen Stand nur bedingt geeignet, da hierfür meist eine sehr große Anzahl von Simulationsdurchläufen mit unterschiedlichsten Parametrierungen des Komponentenmodells durchgeführt werden müssen. Die Voraussetzungen hierfür entsprechen den Voraussetzungen für allgemeine Versuchspläne der modernen DoE. Es werden automatisierte Simulationsdurchläufe mit wechselnder Parametrierung unter Ausschluss des Einflusses von Einschwingvorgängen benötigt.

Davon abgesehen ist die Sensitivitätsanalyse aus technischer Sicht relativ formal und lässt sich gut schematisch durchführen. Für den Fall, dass Komponentenmodelle zukünftig in einer entsprechenden Versuchsumgebung ausgeführt werden können (Hinweise notwendiger Eigenschaften der Versuchsumgebung sind in Abschnitt 4.4 gegeben), können die folgenden Literaturhinweise bei der Durchführung hilfreich sein. Eine Gegenüberstellung verschiedener Sensitivitätsanalysen ist in [37] zu finden. Exemplarische Anwendungen sind in [15, 41], sowie in Abschnitt 4.2.4 zu finden. Ausführliche Hintergründe mit Hinweisen zur praktischen Anwendung sind in [32] zu finden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind für Entscheidungsträger*innen besonders interessant, da im Vorfeld einer Simulation eine Abschätzung möglich ist, welche Parameter für die Modellierung mit Jarvis mit höherer Genauigkeit ermittelt werden müssen.

Als Tool zur Validierung von Simulationssoftware werden in moderner Literatur vermehrt auch statistische Emulatoren bzw. Metamodels aufgeführt [9, 19, 33, 40]. Der Vorteil von Metamodels ist, dass mithilfe weniger Simulationsdurchläufe ein statistisches Modell erstellt wird, welches das Simulationsmodell repräsentiert. Das Metamodel kann dann mit sehr geringem Rechenaufwand ausgeführt werden, wobei fehlende Informationen inter- bzw. extrapoliert werden. Der Vorteil dieser Methodik ist, dass sehr komplexe oder teure Simulationen nur für die Erstellung des Metamodels durchgeführt werden müssen. Alle weiteren Versuche werden dann kostengünstig und in kurzer Simulationszeit mit dem Metamodel durchgeführt. Wenn das erstellte Metamodel stabil genug ist, kann es oft sogar als Ersatz für das ursprüngliche Simulationsmodell genutzt werden [19, 40].

Die Simulation einzelner Komponentenmodelle ist weder komplex, noch besonders teuer. Die Verwendung von Metamodels (oder Krigingmodels, wie sie speziell für deterministische Simulationen empfohlen werden [19, 40]), hat den Nachteil, dass die inter- bzw. extrapolierten Ergebnisse nur Näherungen der Ergebnisse des echten Simulationsmodells sind. Die Vorteile der vereinfachten Simulation durch Metamodels sind für einzelne Komponentenmodelle verschwindend gering, sodass diese Technik hier nicht empfehlenswert ist. Mit Blick in die Zukunft lässt sich jedoch schon an dieser Stelle sagen, dass Metamodels für Zusammenbauten komplexer Wärmenetze, die mehrere Tage oder Wochen an Simulationszeit benötigen, eine wirkungsvolle Technik sein kann.

3.5.4. Externe Operationale Validierung

In [28] heißt es, dass ein Simulationsmodell nur dann validiert wird, wenn die Simulationsdaten mit denen des Realsystems verglichen werden. Wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben, ist dies eine überspitzte Aussage und die Ermittlung von Messdaten des Realsystems ist meist schwierig und kostspielig [33]. Kosten verursachen beispielsweise die Anschaffung von Messtechnik, die Arbeitszeit zur Installation, die gesamten Durchführung der Messung, sowie die Aufbereitung der Daten. Systematische Messfehler müssen im Vorfeld reduziert und in der Nachbereitung kompensiert werden [8]. Für den Fall, dass bereits Messwerteinrichtungen an bestehenden Wärmenetzen verfügbar sind, so muss mindestens eine sorgfältige Datenaufbereitung stattfinden. Weiterhin sind die Messgeräte, sowie die untersuchten Komponenten unter Umständen schon längere Zeit in Betrieb, wodurch Defekte, Abnutzungserscheinungen oder Verschmutzungen begünstigt werden, die gegebenenfalls zu unidentifizierten, systematischen Messfehlern führen können.

Neben der Verwendung von Messdaten des Realsystems, lassen sich die Simulationsergebnisse aber auch mit anderen Daten vergleichen. Hierfür eignen sich zum Beispiel andere Theorien und Modelle, Herstellerangaben oder ähnliche Systeme [33, 36]. Unter Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses sollte daher individuell entschieden werden, wann eine Messwertaufnahme am Realsystem notwendig ist. Im speziellen Fall der Komponentenmodelle in Jarvis kann es sinnvoll sein, Herstellerangaben anstelle von eigenen Messungen zu verwenden. Da die Planung beim Bau von Wärmenetzen ohnehin auf Herstellerangaben beruht, ist zu erwarten, dass sie als Validierungsdaten in der praktischen Anwendung sogar eher akzeptiert werden.

In nahezu jeder Literatur zur V&V wird die Anwendung statistischer Tests als Techniken der EOv beschrieben. Dies sind beliebte Techniken, weil hierdurch eine mathematisch klare Bewertung möglich ist. Speziell Konfidenzintervalle und Hypothesen-Tests werden ausführlich diskutiert [5, 33] und ihre Anwendungsmöglichkeiten weiterhin erforscht [34]. Die Anwendung statistischer Tests stellt jedoch strenge Anforderungen an die Datengrundlage, welche nicht immer

erfüllt sind. In der Praxis sind die statistischen Voraussetzungen der Daten sogar sehr selten erfüllt [33], sodass nur ein subjektiver, meist grafischer Ansatz möglich ist.

Für die EOV der Komponentenmodelle wird ebenfalls ein subjektiver, grafischer Ansatz gewählt. Erstens ist dies der am weitesten verbreitete und gebräuchlichste Ansatz [33], zweitens ist ein objektiver Ansatz ohne einen zuvor definierten zulässigen Unterschied zwischen Simulations- und Validierungsdaten gar nicht möglich. Um zu bewerten, ob die identifizierten Unterschiede auch praktisch einen Unterschied machen, ist umfangreiche Fachkenntnis entscheidend [40]. Hierfür wird eine Beurteilung durch Fachexperten mit entsprechender praktischer Erfahrung durchgeführt. Zur Vorbereitung für diese Beurteilung werden die Ergebnisse grafisch aufbereitet und zusammen mit allen verfügbaren Informationen der verwendeten Daten in einem kurzen Bericht zur operationalen Validierung dargestellt. Je mehr Informationen über die Daten bekannt sind, desto genauer sollte auch die Darstellung der Daten erfolgen. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 3.6 nach [28].

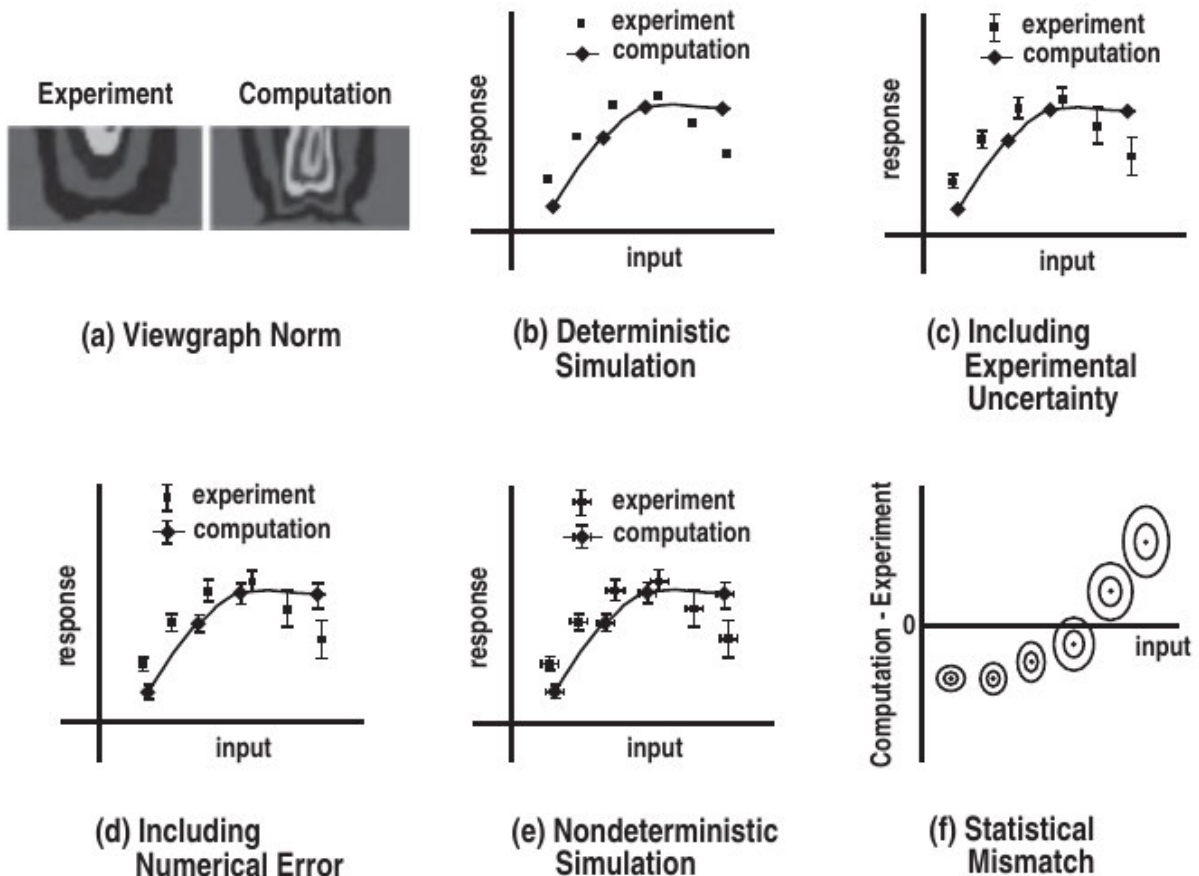


Abbildung 3.6: Erhöhen der Präzision bei der Darstellung von Simulations- und Validierungsdaten [28]

Validierungsdaten besitzen stets eine Messungenauigkeit, deren Information bekannt und in der Darstellung ersichtlich sein sollte (siehe Abbildung 3.6 (b) zu (c)). Deterministische Simulationsergebnisse besitzen auch eine Unsicherheit - den numerischen Fehler. Dieser sollte ebenfalls bekannt und falls notwendig in der Darstellung erkenntlich gemacht werden (siehe Abbildung 3.6 (c) zu (d)).

Zusätzlich zum grafischen Ansatz sollten geeignete Kennzahlen angegeben werden, welche die Unterschiede zwischen Simulations- und Validierungsdaten quantifizieren. Eine häufig angewandte Kennzahl ist der quadratische Mittelwert [22], jedoch gehen hierbei die Information der Messunsicherheit der Validierungsdaten verloren. Eine ähnliche Kennzahl, speziell für den Vergleich von deterministischen Simulationsdaten und Validierungsdaten mit Messunsicherheit, ist die Normalized Euclidean Metric [22]. Hierbei wird der euklidische Abstand zwischen Simulations- und Validierungsdaten ermittelt und durch die Standardabweichung der Validierungsdaten normalisiert [22]. Der hieraus resultierende dimensionslose Abstand wird Normalized Euclidean Distance genannt und mit d_{ne} abgekürzt.

Die Berechnung der Normalized Euclidean Distance wird als wertvoller Zusatz zur grafischen, subjektiven Bewertung, für jeden Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten der Komponentenmodelle empfohlen. Die grafische Bewertung alleine hat den Nachteil, dass der Einfluss unterschiedlicher Skalierungen schwer zu erkennen ist. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3.7 die fiktiven Ergebnisse der EOv zweier Pumpenkennlinien dargestellt.

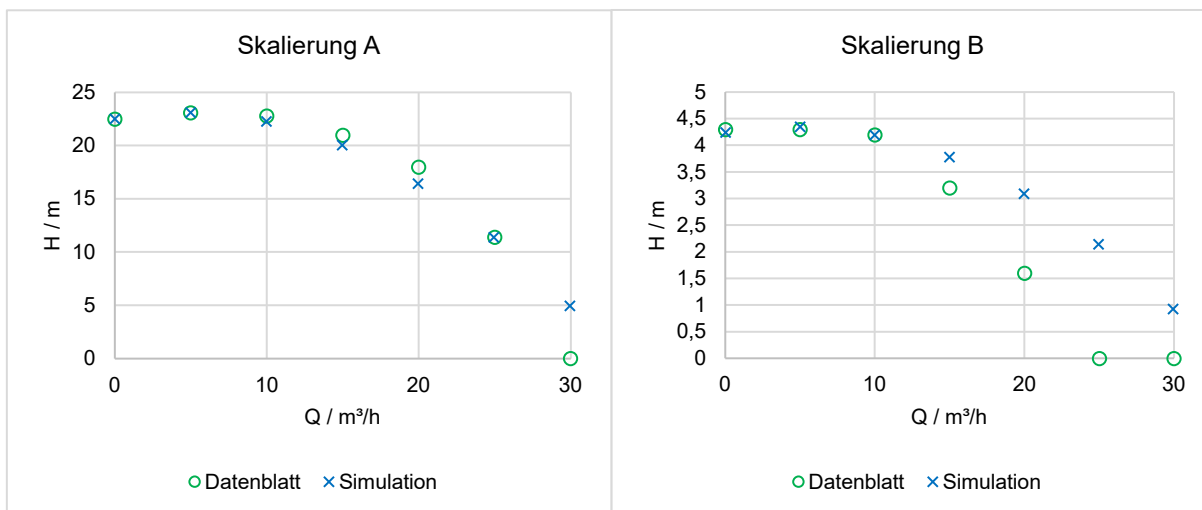


Abbildung 3.7: Fiktive Ergebnisse der EOv zweier Pumpenkennlinien zur Erklärung des Nutzens der Normalized Euclidean Distance

Augenscheinlich entsprechen die Simulationsergebnisse in Skalierung A besser den Werten aus dem Datenblatt als in Skalierung B. Die Berechnung der Normalized Euclidean Distance

offenbart jedoch den quantitativen Einfluss. Bei Annahme einer Standardunsicherheit durch das Ablesen der Förderhöhe beider Diagramme von $u(H) = 0.04 \text{ m}$ (der Volumenstrom kann ohne Unsicherheit abgelesen werden) ergibt sich $d_{ne}(A) \approx 130$ und $d_{ne}(B) \approx 70$.

Das Ergebnis der Normalized Euclidean Distance lässt sich im Allgemeinen jedoch schwer deuten und für Validierungsdaten mit sehr geringer Standardunsicherheit nimmt sie große Werte an. Generell ist ein Wert von $d_{ne} \leq 2$ akzeptabel, wobei diese Aussage statistisch begründet ist (für nähere Informationen vgl. [22]). Sie sollte daher eher als Anhaltspunkt oder unterstützender Hinweis für die / den Fachexpert*in dienen, die / der über die Validität des Komponentenmodells entscheidet. Ein exemplarischer Anwendungsfall wird in Abschnitt 4.2.5 dargestellt.

Ein Komponentenmodell wird immer für das zu Beginn festgelegte formale Problem validiert. Es muss neu validiert werden, wenn das Komponentenmodell verändert wird, oder das Komponentenmodell für einen neuen Zweck verwendet werden soll.

Nachdem die Ergebnisse für die praktischen Anwendung als valide befunden wurden, wird in einer ausführlichen Dokumentation zum jeweiligen Komponentenmodell dargelegt, welche Techniken angewandt wurden, um die Glaubwürdigkeit zu gewährleisten. Hinweise zur Erstellung der Dokumentation werden im folgenden Abschnitt gegeben.

3.6. Dokumentation der Ergebnisse des V&V-Prozesses

Die Dokumentation des Modellbildungsprozesses wird in der Literatur zur V&V meist nur kurz, oder gar nicht beschrieben. Ein Grund hierfür ist, dass keine allgemein akzeptierten Dokumentationsstandards für Simulationsmodelle verfügbar sind [29]. Für die Transparenz und die damit verbundene Vertrauenswürdigkeit in das Simulationsmodell ist die Dokumentation jedoch essenziell [29]. Liebl beschreibt eine „klägliche Präsentation der Ergebnisse“ gar als letzte der „sieben Todsünden der Simulation“ [20].

Prinzipiell lassen sich drei übergeordnete Ziele der Dokumentation definieren [29]. Der Anwender soll in der Lage sein,

1. die Qualität des Simulationsmodells selbst zu bewerten.
2. die Experimente zu reproduzieren und eigene Experimente durchzuführen.
3. das Simulationsmodell nach eigenen Wünschen weiterzuentwickeln.

Der erste Punkt entspricht dem zentralen Ziel der OV, zu dessen Erfüllung die entsprechenden Techniken im vorherigen Abschnitt 3.5 ausgewählt wurden. Weiterhin sollten zur Erfüllung des zweiten Punktes alle verwendeten Daten und Rahmenbedingungen übersichtlich in der

Dokumentation aufgeführt werden. Die Möglichkeit zur Weiterentwicklung des Komponentenmodells durch die Anwender*innen wird nicht als essenzieller Bestandteil der hier entwickelten Methodik betrachtet.

Entsprechend der Liste von Mindestanforderungen an die Dokumentation nach Page et al. [29] und weiteren Hinweisen [33], wurden für die Dokumentation des V&V-Prozesses von Komponentenmodellen die folgenden Inhalte herausgearbeitet.

Inhalt der Titelseite:

- Modellname / Realsystem
- Ansprechpartner / Konstrukteur
- Auftraggeber
- Hardware
- Betriebssystem
- Python-Version
- Jarvis-Version

Inhalt der Dokumentation:

- Formales Problem
- Datengrundlage zur Erstellung des Modells inklusive Quellenangabe
- Darstellung des konzeptuellen Modells
- Quelltext inklusive Kommentaren
- Liste der verwendeten V&V-Techniken inklusive ausführlicher Ergebnisse
- Bewertung der V&V-Ergebnisse hinsichtlich des formalen Problems
- Literaturliste für weitere Hintergrundinformationen

Die Dokumentation zur Entwicklung des Komponentenmodells ist der letzte Schritt, bevor das Komponentenmodell für den Feldtest freigegeben wird.

3.7. Feldtest

Der Feldtest wurde entwickelt, um Fehler zu identifizieren, die unter Laborbedingungen nur schwer oder gar nicht getestet werden können. Eine Untersuchung [12] hat ergeben, dass in ca. 50 % der Fälle eine sehr spezielle Kombination verschiedener Faktoren zum Fehler führte. Hierbei wird eine Überprüfung im Labor aufgrund der Vielzahl an Kombinationen als unrealistisch angesehen. In ca. 30 % der Fälle konnten die Fehler jedoch auf unzuverlässige V&V-Prozesse zurückgeführt werden. Aus dieser Untersuchung lassen sich zwei Potentiale für die Anwendung des Feldtests auf Komponentenmodelle ableiten.

1. Der V&V-Prozess kann verbessert werden: Erkenntnisse aus Fehlern, die auf einen unzuverlässigen V&V-Prozess zurückführbar sind, können genutzt werden, um die entsprechenden Prozesse zu verbessern.
2. Aufgrund der großen Anzahl an Parametern lassen sich einige Komponentenmodelle nur unvollständig im Labor testen. Die Methoden der DoE bieten hier zwar Möglichkeiten zur Optimierung, jedoch wird die Untersuchung stets unvollständig bleiben. Durch die Verwendung der Komponentenmodelle im Feld werden viele Kombinationen der Parameter durch die Anwender*innen getestet.

Die Entwicklung und Realisierung gezielter Feldtests ist zwar extrem aufwendig. Aufgrund der engen Zusammenarbeit zwischen Entwickler*innen und Anwender*innen im Team von Jarvis ist es jedoch möglich, Feldtests unter Verwendung der bereits vorhandenen Infrastruktur durchzuführen. Hierfür werden die identifizierten Fehler durch die Anwender*innen konsequent und detailliert dokumentiert. Sollte Jarvis durch Externe verwendet werden, so sollten diese ebenfalls die Möglichkeit haben so komfortabel wie möglich einen Fehler zu melden (bsp. über ein kurzes, prägnantes Formular).

Aus zwei Gründen ist es dabei sehr wichtig, dass das Komponentenmodell erst nach Abschluss aller vorherigen Schritte der V&V-Methodik für den Feldtest freigegeben wird.

Erstens sollte die Anzahl der Fehler während des Feldtests bestmöglich minimiert werden, da die Akzeptanz zur Anwendung mit jedem Fehler sinkt. Dies erhöht das Risiko, dass versierte Anwender*innen „Workarounds“ finden oder kleinere Fehler einfach akzeptieren. Infolgedessen kann weder ein Beitrag zur Validierung des Komponentenmodells, noch zur Verbesserung des V&V-Prozesses geleistet werden.

Zweitens sollte die vollständige Dokumentation des V&V-Prozesses für die Teilnehmer*innen des Feldtests verfügbar sein. Aus der Dokumentation können im Vorfeld detaillierte Informationen zur Funktionsweise des Komponentenmodells und dessen definierten Anwendungsbereich entnommen werden, wodurch bereits viele Anwendungsfehler vermieden und die Dokumentation überprüft werden kann.

4. Darstellung der entwickelten V&V-Methodik

Im vorherigen Abschnitt wurde der Entwicklungsprozess der V&V-Methodik detailliert dargelegt. In diesem Abschnitt werden zunächst im Abschnitt 4.1 diejenigen Inhalte zusammengefasst, die zur Anwendung der V&V-Methodik identifiziert wurden. Im Abschnitt 4.2 wird die Anwendbarkeit ausgewählter Inhalte der V&V-Methodik auf ein exemplarisches Komponentenmodell getestet. Im Abschnitt 4.3 findet eine kritische Bewertung der Ergebnisse statt und im Abschnitt 4.4 wird ein kurzer Ausblick auf mögliche weitere Schritte gegeben.

4.1. Zusammenfassung der Teilschritte

Die folgende Zusammenfassung der V&V-Methodik basiert auf dem Entwicklungsprozess des vorangegangenen Abschnitts. Auf Wiederholungen von Details und Entscheidungsprozesse zur Auswahl spezifischer Techniken und Vorgehensweisen wird dabei verzichtet. Bei der Anwendung der V&V-Methodik sollten zusätzliche Informationen einzelner Inhalte gegebenenfalls aus Abschnitt 3 entnommen werden.

Zur übersichtlichen Darstellung werden die übergeordneten Abschnitte der entwickelten Methodik in Abbildung 4.1 in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

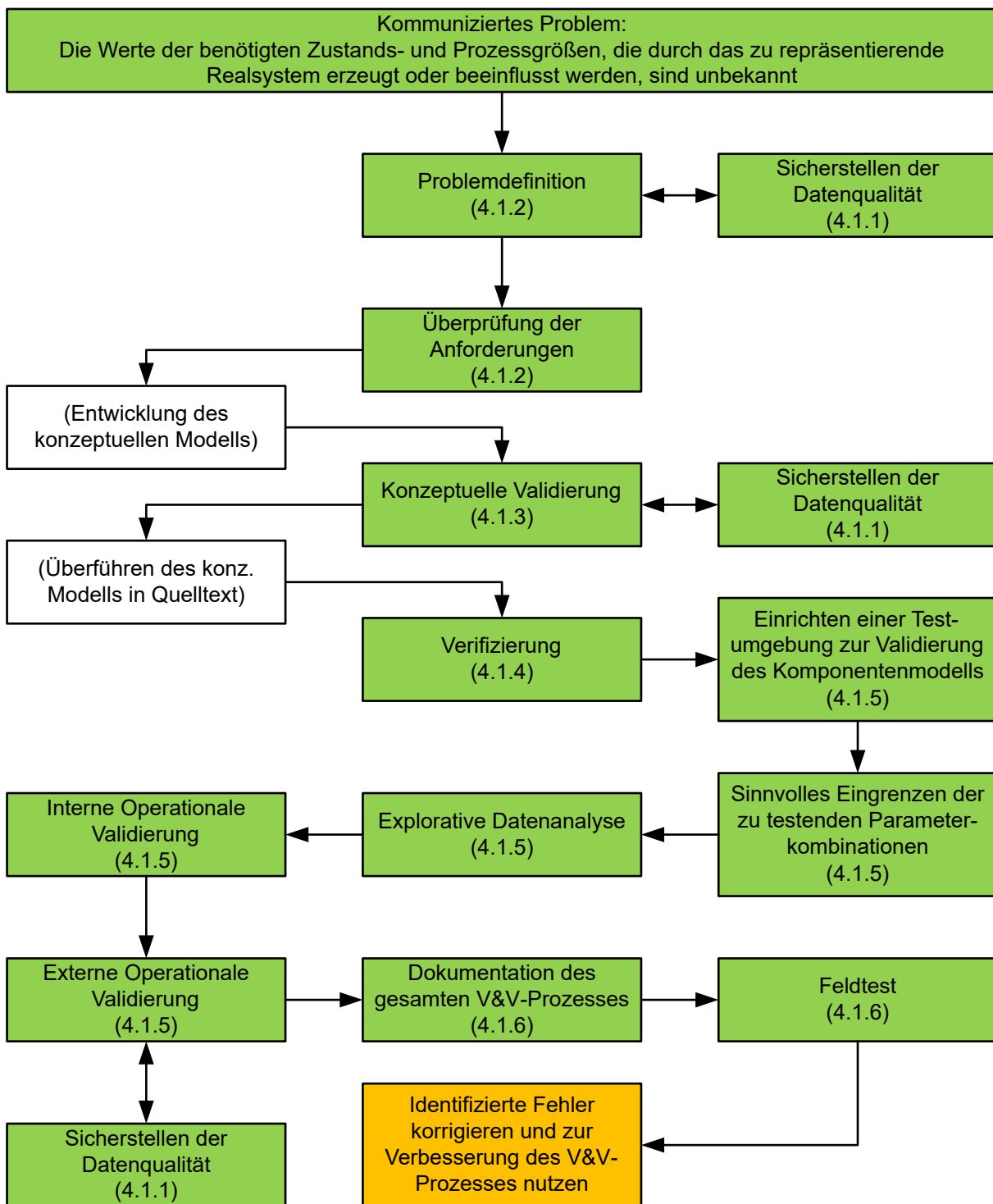


Abbildung 4.1: Zusammenfassende Darstellung der V&V-Methodik als Flussdiagramm

Grün hinterlegt sind die Aktivitäten der V&V-Methodik. Farblose Aktivitäten sind notwendiger Bestandteil des Entwicklungsprozesses der Komponentenmodelle, jedoch nicht Teil des V&V-

Prozesses. Zusätzlich wird in Klammern der Unterabschnitt angegeben, in dem die Aktivität behandelt wird.

Zur Präsentation der einzelnen Inhalte werden die übergeordneten Abschnitte des Flussdiagramms aus Abbildung 4.1 in den nachfolgenden Unterabschnitten in weiteren Flussdiagrammen dargestellt.

4.1.1. Sicherstellen der Datenqualität

Abweichend zur Reihenfolge in Abbildung 4.1 wird im ersten Unterabschnitt zunächst die Sicherstellung der Datenqualität behandelt, da diese wiederholt in den weiteren Schritten vorkommt.

Datenerhebung. Im Laufe des V&V-Prozesses der entwickelten Methodik werden an verschiedenen Stellen Daten benötigt, um bestimmte Techniken durchführen zu können. Es ist essenziell, dass alle Daten auf ihre Qualität hin gesichert werden, bevor sie zur Anwendung kommen. Gute Prozesse zur Datenerhebung bilden die Grundlage der Qualitätssicherung. Die passenden Techniken müssen dabei für den konkreten Fall jeweils individuell ausgewählt werden. Viele Möglichkeiten der Datenerhebung, -verifizierung und -validierung werden erst durch praktische Erfahrungen entwickelt. Die gesammelten Erfahrungen sollen genutzt werden, um entsprechende Prozesse zu implementieren und diese stetig zu verbessern. Wenn eine neue Methode zur Datenerhebung genutzt wird, so sollten die Methode und die generierten Daten mindestens mithilfe des GUM auf ihre Unsicherheit hin überprüft werden. Anschließend wird für den Prozess eine Dokumentation angelegt, um ihn bei zukünftigen Datenerhebungen nachvollziehen und wiederverwenden zu können.

Datenüberprüfung. Wann immer erhobene Daten verwendet werden sollen, wird der in Abbildung 4.2 dargestellte Prozess zur Sicherstellung der Datenqualität durchlaufen.

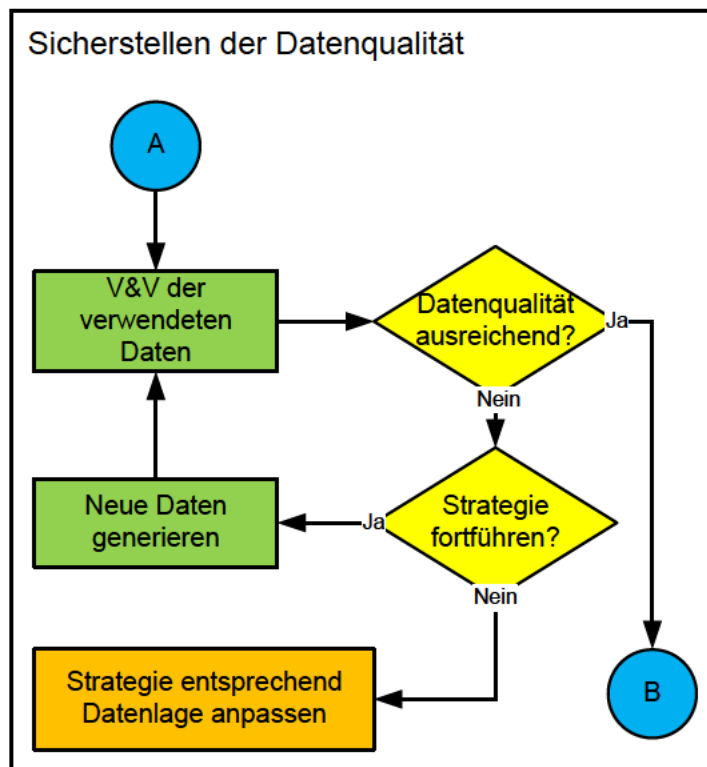


Abbildung 4.2: Flussdiagramm zur Datenqualität von Komponentenmodellen

Die Qualität der Daten beinhaltet, dass sie (1) passend zur Verwendung in Jarvis aufbereitet sind (Verifizierung der Daten) und (2) hinreichend genau der Realität entsprechen (Validierung der Daten). Hierfür können Datenanalysemethoden und Glättungsmethoden, aber auch Expertenbefragungen verwendet werden. Weiterhin muss stets eine Angabe zur Unsicherheit der Daten vorhanden sein.

Wenn sich herausstellt, dass die erhobenen Daten nicht den benötigten Anforderungen entsprechen, so sollte hinterfragt werden, ob die Strategie fortgeführt und neue Daten generiert werden sollen. Ein Strategiewechsel kann sinnvoll sein, wenn valide Daten für einen bestimmten Prozess nicht unter vertretbarem Aufwand generiert werden können.

4.1.2. Formulierung und Überprüfung des formalen Problems

Der eigentliche V&V-Prozess der Komponentenmodelle beginnt mit der Überprüfung des formalen Problems. Dieses muss jedoch zunächst in einer ausführlichen Problemdefinition entwickelt und dokumentiert werden (Abbildung 4.3). Die darin enthaltenen Anforderungen bilden das Fundament der Entwicklung des Komponentenmodells und dienen als Maßstab bei der Validierung des konzeptuellen Modells und des Simulationsmodells.

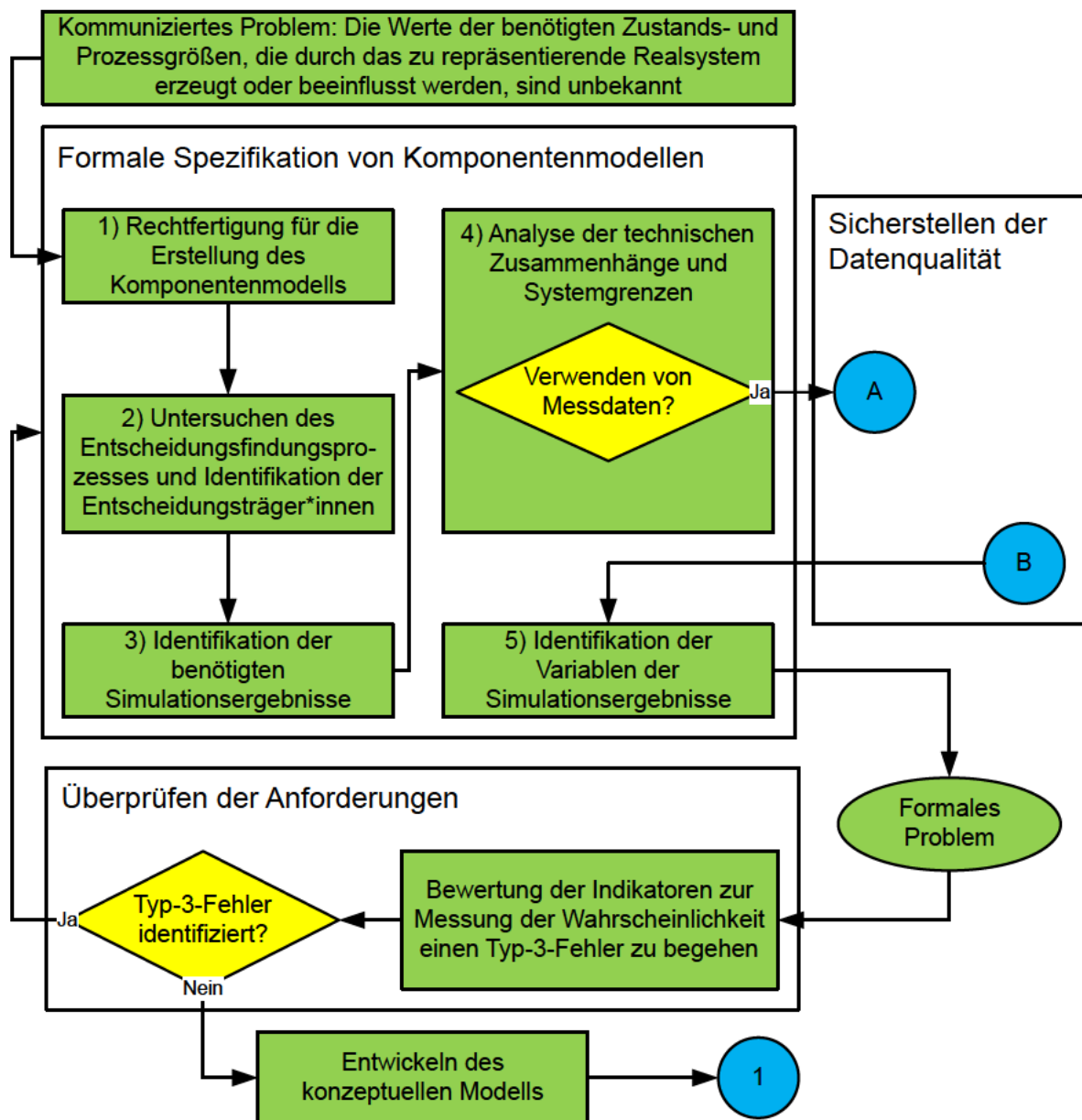


Abbildung 4.3: Flussdiagramm zur formalen Spezifikation von Komponentenmodellen

Allem voran steht das kommunizierte Problem, welches mithilfe des Komponentenmodells gelöst werden soll:

„Die Werte der benötigten Zustands- und Prozessgrößen, die durch das zu repräsentierende Realsystem erzeugt oder beeinflusst werden, sind unbekannt.“

Hiervon ausgehend wird das kommunizierte Problem in das formale Problem überführt, welches eine hinreichend genaue Spezifikation der Anforderungen an das Komponentenmodell

darstellt. Zur Unterstützung dieses Vorgangs wurde ein Prozess aus fünf Schritten entwickelt (siehe in Abbildung 4.3), die in Teamarbeit mehrerer Fachexperten diskutiert und durchgeführt werden. Leitfragen zur Bearbeitung dieser Schritte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Die fünf Schritte zur Problemdefinition

Schritte	Leitfragen
Schritt 1: Rechtfertigung für die Erstellung des Komponentenmodells	<ul style="list-style-type: none"> • Könnten die Werte der Zustands- und Prozessgrößen auch anders beschafft werden? • Gibt es bereits andere (externe) Programme hierfür? • Muss es ein neues Komponentenmodell sein? • Können die Informationen auch durch ein bereits bestehendes (leicht modifiziertes) Komponentenmodell bereitgestellt werden? • Kann das Komponentenmodell auch zukünftig für andere Projekte hilfreich sein, oder wird es für eine sehr spezielle Fragestellung benötigt?
Schritt 2: Untersuchung des Entscheidungsfin- dungsprozesses und Identifikation der Entscheidungssträ- ger*innen	<ul style="list-style-type: none"> • Wird das Komponentenmodell für einen konkreten Fall benötigt? • Für welche (zukünftigen) anderen Fälle könnte das Komponentenmodell benötigt werden? • Welche Aspekte des Realsystems sind in diesen Fällen besonders relevant? • Welche Eigenschaften müssen die Simulationsergebnisse aufweisen, damit sie zur Unterstützung weiterer Entscheidungen akzeptabel sind? • Welche Personen(gruppen) entscheiden, ob ein Simulationsergebnis akzeptabel ist? • Wodurch wird diese Entscheidung beeinflusst? Wie Stark ist der Einfluss?
Schritt 3: Identifikation der benötigten Simulationsergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Simulationsergebnisse müssen bereitgestellt werden, um konkrete Entscheidungen ableiten zu können? • Sind die geforderten Simulationsergebnisse objektiv begründet? • Für welchen Anwendungsbereich müssen die Simulationsergebnisse gelten?

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 4.1: (fortgesetzt)

Schritte	Leitfragen
Schritt 4: Analyse der technischen Zusammenhänge und Systemgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche kausalen Zusammenhänge bestehen zwischen den Simulationsergebnissen und den ursächlichen physikalischen Effekten? • Werden an dieser Stelle bereits Messdaten benötigt, um die kausalen Zusammenhänge hinreichend zu verstehen? • Welche Einflussgrößen charakterisieren die Systemgrenzen des Komponentenmodells?
Schritt 5: Identifikation der Variablen der Simulationsergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Eigenschaften des Komponentenmodells sind für die Entscheidungsträger*innen relevant und variabel, und müssen durch Parameter realisiert werden? • Welche Eigenschaften hängen voneinander ab und werden durch andere Eigenschaften indirekt festgelegt?

Der Entwicklungsprozess dieser Schritte kann im Abschnitt 3.2.1 nachvollzogen werden, wo auch Beispiele zu finden sind.

Formale Problemstellungen anderer Komponentenmodelle können und sollten bei der Bearbeitung dieser Schritte unterstützend herangezogen werden. Insbesondere in den ersten zwei Schritten sind erhebliche Überschneidungen mit anderen Komponentenmodellen zu erwarten.

Die Überprüfung der Anforderungen wird entsprechend den modifizierten Indikatoren zur Messung der Wahrscheinlichkeit einen Typ-3-Fehler zu begehen durchgeführt, welche in Tabelle 4.2 dargestellt sind.

Tabelle 4.2: Checkliste zur Identifikation eines Typ-3-Fehlers

Indikator	Indikation
1	Werden Probleme personalisiert?
2	Sind die Zusammenhänge zu komplex?
3	Werden Meinungen als Fakten akzeptiert?
4	Ist die Abstraktionsebene der Zusammenhänge ausreichend detailliert?
5	Beinhalten die Systemgrenzen das gesamte Problem?

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 4.2: (fortgesetzt)

Indikator	Indikation
6	Ist die Informationsgrundlage ausreichend?
7	Wird das Problem unter dem Einfluss eines bestimmten Lösungsansatzes formuliert?
8	Ist das Problem aktuell?

Eine kurze Erklärung der Indikatoren ist im Abschnitt 3.2.2 gegeben. Die Indikatoren sollten bereits während der Problemdefinition präsent sein und fortlaufend geprüft werden. Fachexpert*innen des Entwicklerteams, die nicht an der Definition beteiligt waren, sollten das formale Problem im Nachgang ebenfalls mithilfe der Indikatoren prüfen.

4.1.3. Konzeptuelle Validierung von Komponentenmodellen

Das konzeptuelle Modell dient als Grundlage zur Erstellung des Quelltextes des Komponentenmodells. Bevor dieser jedoch mit entsprechendem Aufwand umgesetzt wird, sollte das konzeptuelle Modell auf bestimmte Aspekte hin überprüft werden (Abbildung 4.4).

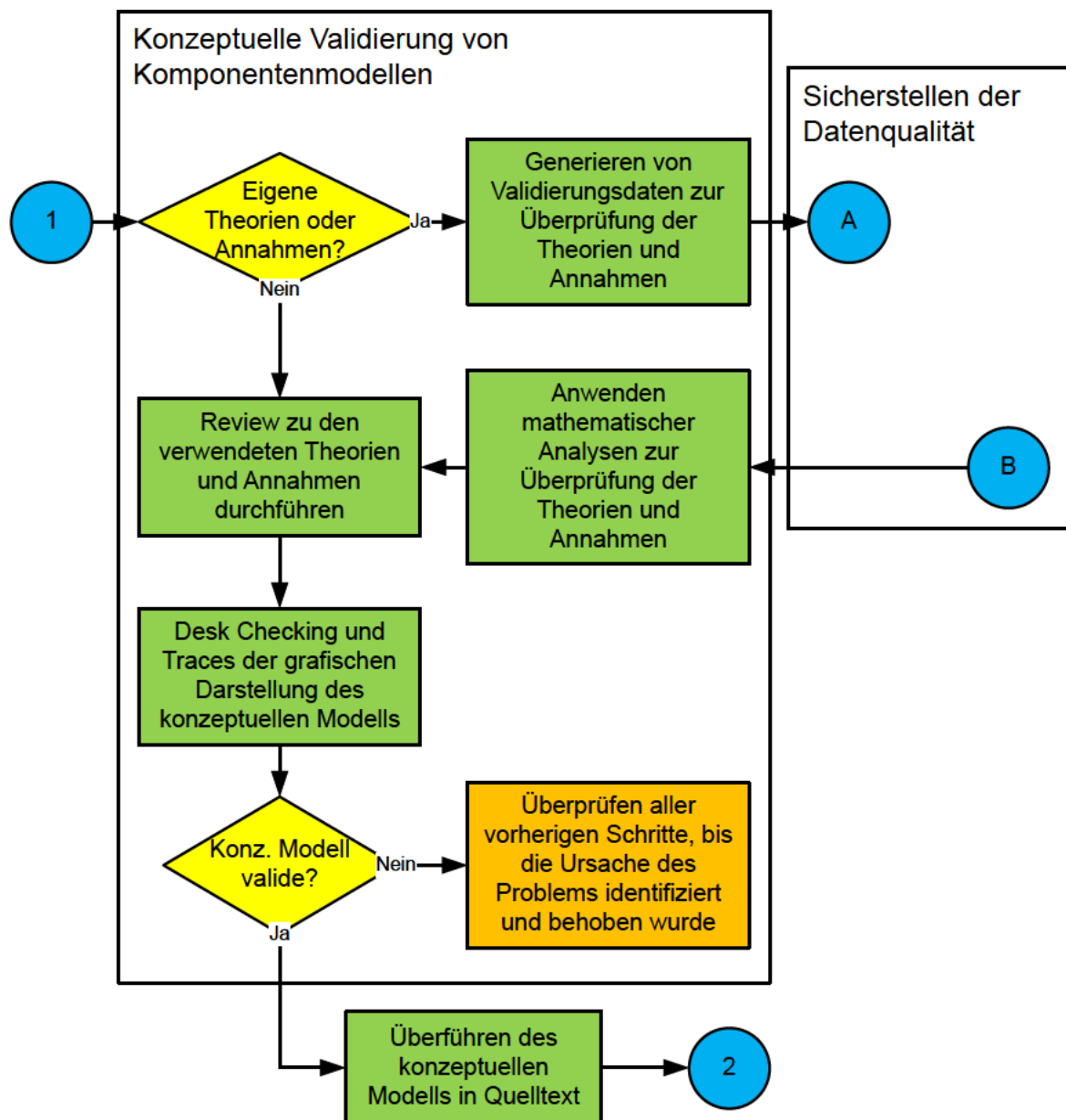


Abbildung 4.4: Flussdiagramm zur konzeptuellen Validierung von Komponentenmodellen

Für technische Komponenten des Fernwärmenetzes existieren in vielen Fällen bereits validierte und anerkannte Theorien, woraus das konzeptuelle Komponentenmodell abgeleitet werden kann. Wenn eigene Theorien und Annahmen entwickelt werden, so müssen diese auf Basis von Validierungsdaten geprüft werden. In beiden Fällen wird anschließend ein Review durchgeführt, um die korrekte Anwendung der Theorien und Annahmen, bzw. deren Entwicklung zu prüfen (siehe Abschnitt 3.3).

Auf Basis der geprüften Theorien und Annahmen sollte ein grafisches Modell des Konzeptes (z.B. ein Programmablaufplan) erstellt werden, woraus später der Quelltext abgeleitet wird.

Das grafische Modell wird mithilfe eines Desk Checks, der auch Traces beinhaltet, auf korrekte Struktur und Logik überprüft. Der beispielhafte Ablauf eines Desk Checks mit Traces ist in Abschnitt 3.3 illustriert.

4.1.4. Verifizierung von Komponentenmodellen

Bei der Verifizierung wird der Quelltext überprüft, der auf Basis des konzeptuellen Modells geschrieben wurde. Hierfür stehen eine Reihe verschiedener Techniken zur Verfügung (Abbildung 4.5), welche je nach Komplexität des Quelltextes und nach vorhandenen Mitteln individuell ausgewählt werden können.

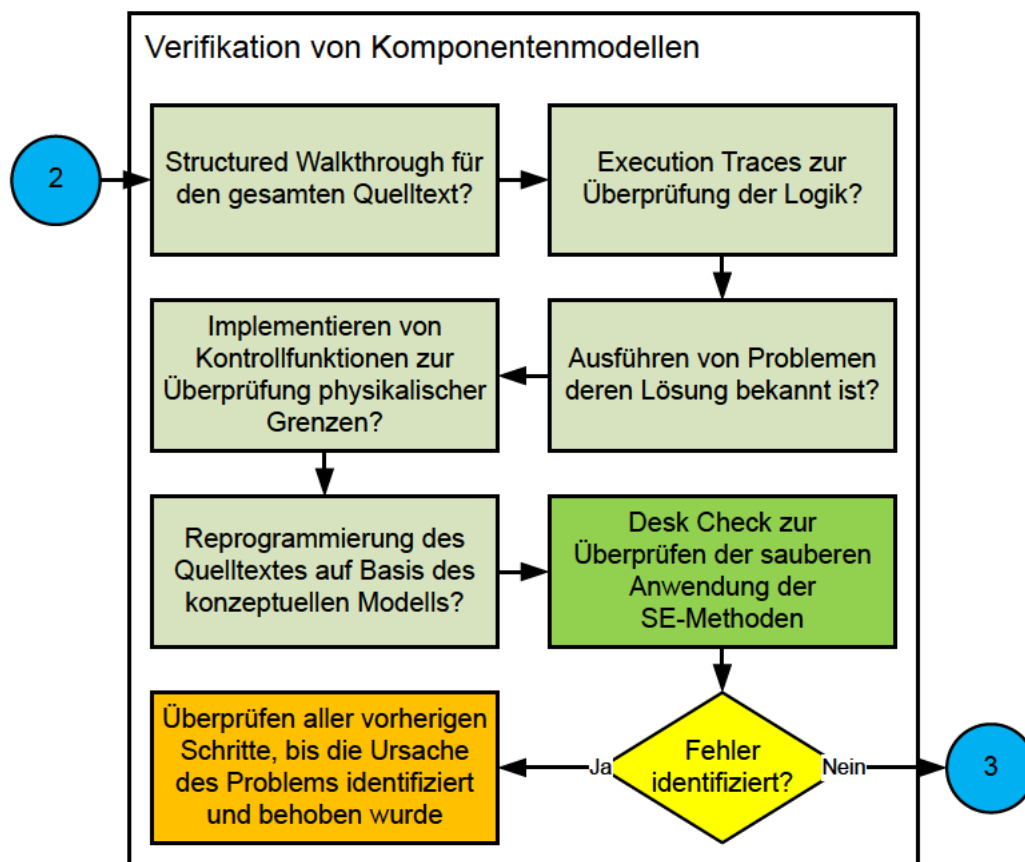


Abbildung 4.5: Flussdiagramm zur Verifizierung von Komponentenmodellen

Für jede Technik sollte geprüft werden, ob ihre Anwendung im individuellen Fall sinnvoll ist. Hierbei kann sequenziell vorgegangen werden, der Structured walkthrough sollte jedoch wenn, dann als erstes durchgeführt werden. Die entsprechende Argumentation und Hinweise zu anderen Techniken finden sich in Abschnitt 3.4. Wichtigstes Hilfsmittel zur Qualitätssicherung des Quelltextes ist die präventive Anwendung bewährter SE-Methoden bei der Erstellung des

Quelltextes. Die Einhaltung dieser Methoden wird als letzter Schritt der Verifizierung in Form eines Desk Checks (Merge Request) überprüft, bevor das Komponentenmodell zur operativen Validierung freigegeben wird. Der Desk Check ist, anders als die anderen Techniken, nicht optional.

Bei der Auswahl der geeigneten Techniken kann Abbildung 4.6 genutzt werden, die aus der Tabelle 3.13 in Abschnitt 3.4 abgeleitet wurde.

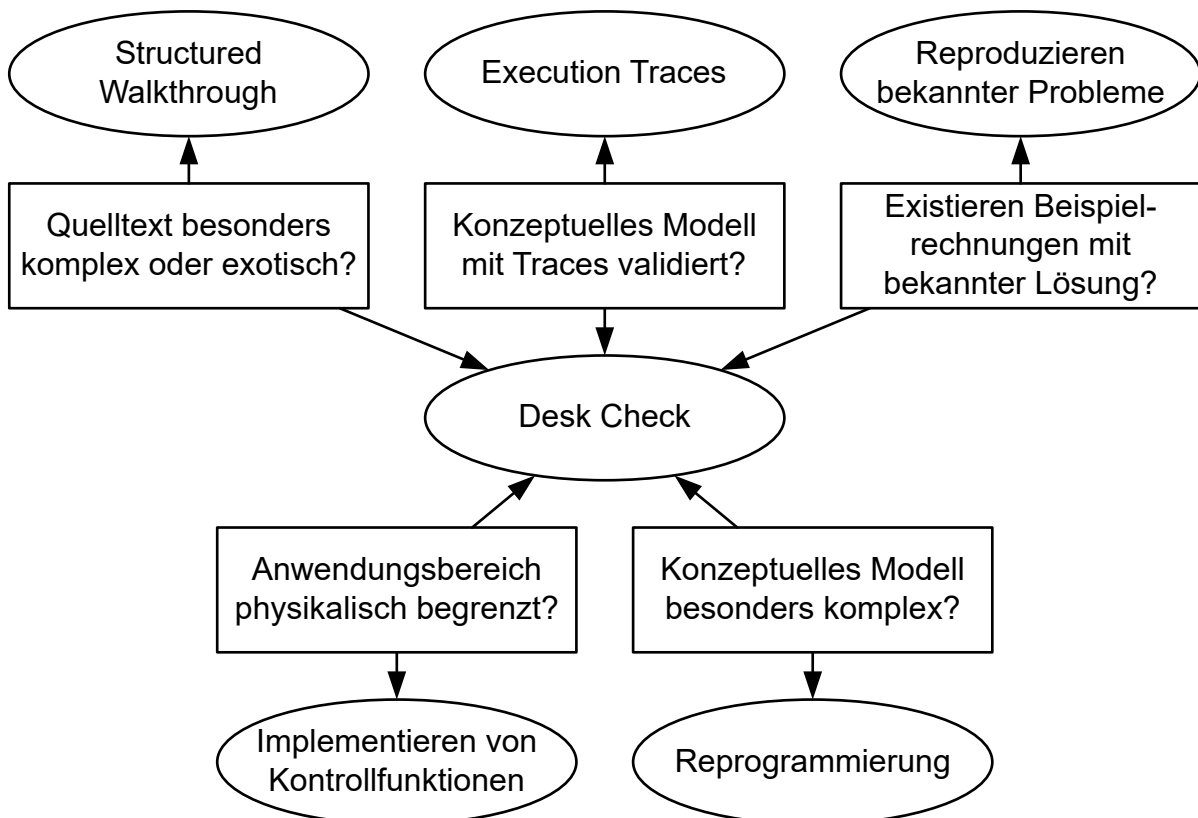


Abbildung 4.6: Entscheidungshilfe zur Auswahl geeigneter Techniken bei der Verifizierung von Komponentenmodellen

Hierbei handelt es sich um Empfehlungen, in welchem Fall eine bestimmte Technik besonders gut geeignet ist. Es können auch mehrere Fälle zutreffen. Trifft keiner der Fälle zu, so ist trotzdem ein Desk Check erforderlich.

4.1.5. Operationale Validierung

Allgemeine Voraussetzung für die Validierung der Komponentenmodelle ist die Einrichtung einer entsprechenden Testumgebung. Aufgrund der damit verbundenen Wechselwirkung mit anderen Komponentenmodellen und der Architektur, muss bei der Simulation stets die Möglichkeit

eines Einschwingvorgangs und dessen Einfluss auf die Untersuchung bedacht werden. Weiterhin gilt speziell für die operationale Validierung zu bedenken, dass identifizierte Fehler ihren Ursprung auch in der Architektur, sowie in den anderen Komponentenmodellen der Testumgebung haben können. Konkrete Hinweise zur Realisierung einer verbesserten Testumgebung sind in Abschnitt 4.4 dargestellt.

Als zweite Voraussetzung zur Untersuchung eines Komponentenmodells wird empfohlen, die Parameter sinnvoll einzugrenzen (siehe Abschnitt 3.5.1). Dadurch lässt sich die Anzahl der Versuchspunkte bereits im Vorfeld reduzieren.

Explorative Datenanalyse. Die ersten Versuche mit dem Komponentenmodell, werden im Rahmen der EDA (Abbildung 4.7) durchgeführt.

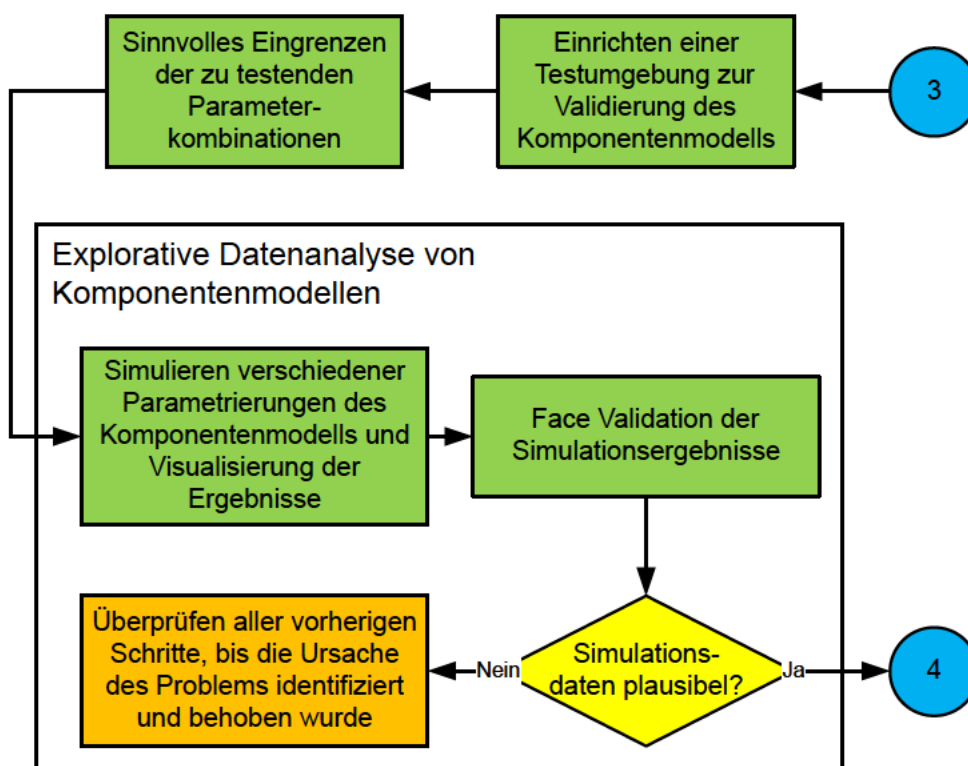


Abbildung 4.7: Flussdiagramm zur explorativen Datenanalyse von Komponentenmodellen

Ziel der EDA ist es, die Simulationsdaten grob auf Plausibilität zu prüfen. Hierfür wird das Komponentenmodell in einem formlosen kreativen Prozess unter Verwendung verschiedener Parametrierungen simuliert und die Ergebnisse per Face Validation plausibilisiert. Sinnvollerweise sollte das Komponentenmodell so parametriert werden, dass schon vor der Durchführung der Versuche eine gute Vorstellung der zu erwartenden Simulationsergebnisse vorhanden ist. Durch die Verwendung von Zeitreihen können Inputparameter bereits zum Status Quo mit geringem Aufwand im Rahmen eines einzelnen Simulationsdurchlaufs variiert werden. Mit der

Realisierung einer speziellen Testumgebung wäre dies auch für Real- und Hilfsparameter möglich. Hinweise hierzu sind in Abschnitt 4.4 zusammengefasst.

Interne Operationale Validierung. Die Interne Operationale Validierung dient dazu, allgemein interessante Eigenschaften des Komponentenmodells zu untersuchen (Abbildung 24).

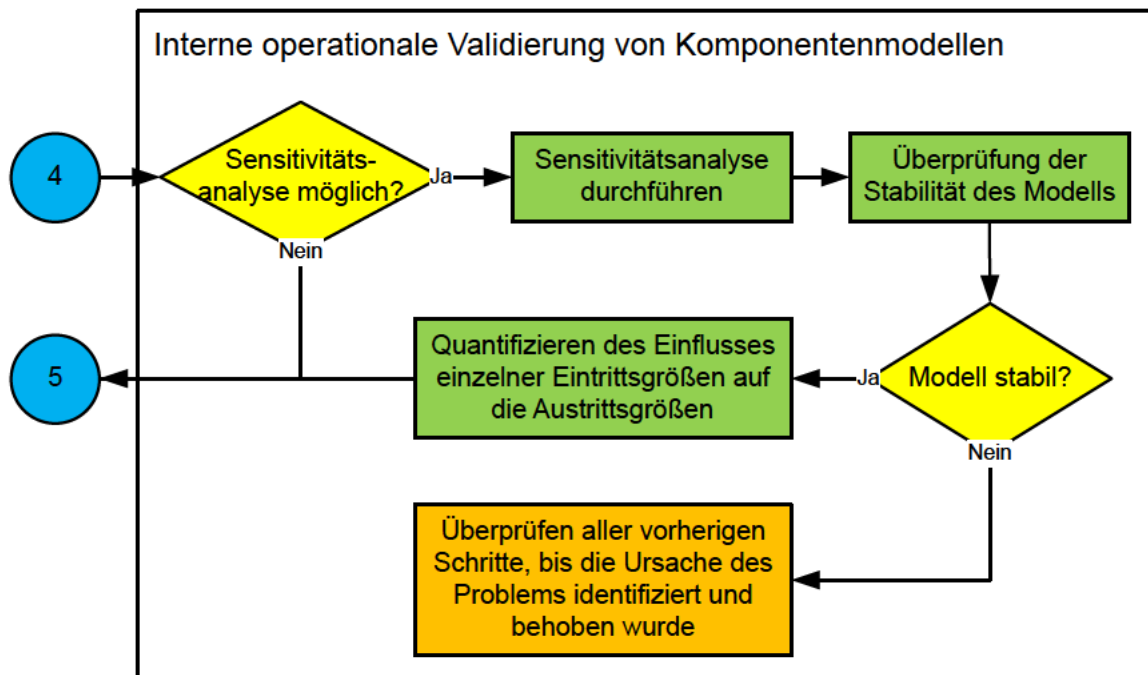


Abbildung 4.8: Flussdiagramm zur internen operationalen Validierung von Komponentenmodellen

Hierfür wurde die Sensitivitätsanalyse als hilfreiche Technik identifiziert. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse lässt sich der Einfluss einzelner Parameter auf die Austrittsdaten eines Komponentenmodells untersuchen. Dabei kann überprüft werden, ob kleine Änderungen einzelner Parameter bereits starken Einfluss auf das Verhalten des Komponentenmodells haben. In diesem Fall müsste die Stabilität des Systems infrage gestellt werden. Die Einflüsse der Parameter werden für stabile Systeme quantitativ dokumentiert. Auf diese Weise wird den Anwender*innen ein Eindruck dafür ermöglicht, welche Parameter besonders genau ermittelt werden sollten, um ein realitätsnahes Simulationsergebnis zu erhalten.

Externe operationale Validierung. Die EOv befasst sich mit dem Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten. Die grundlegenden Schritte dafür sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

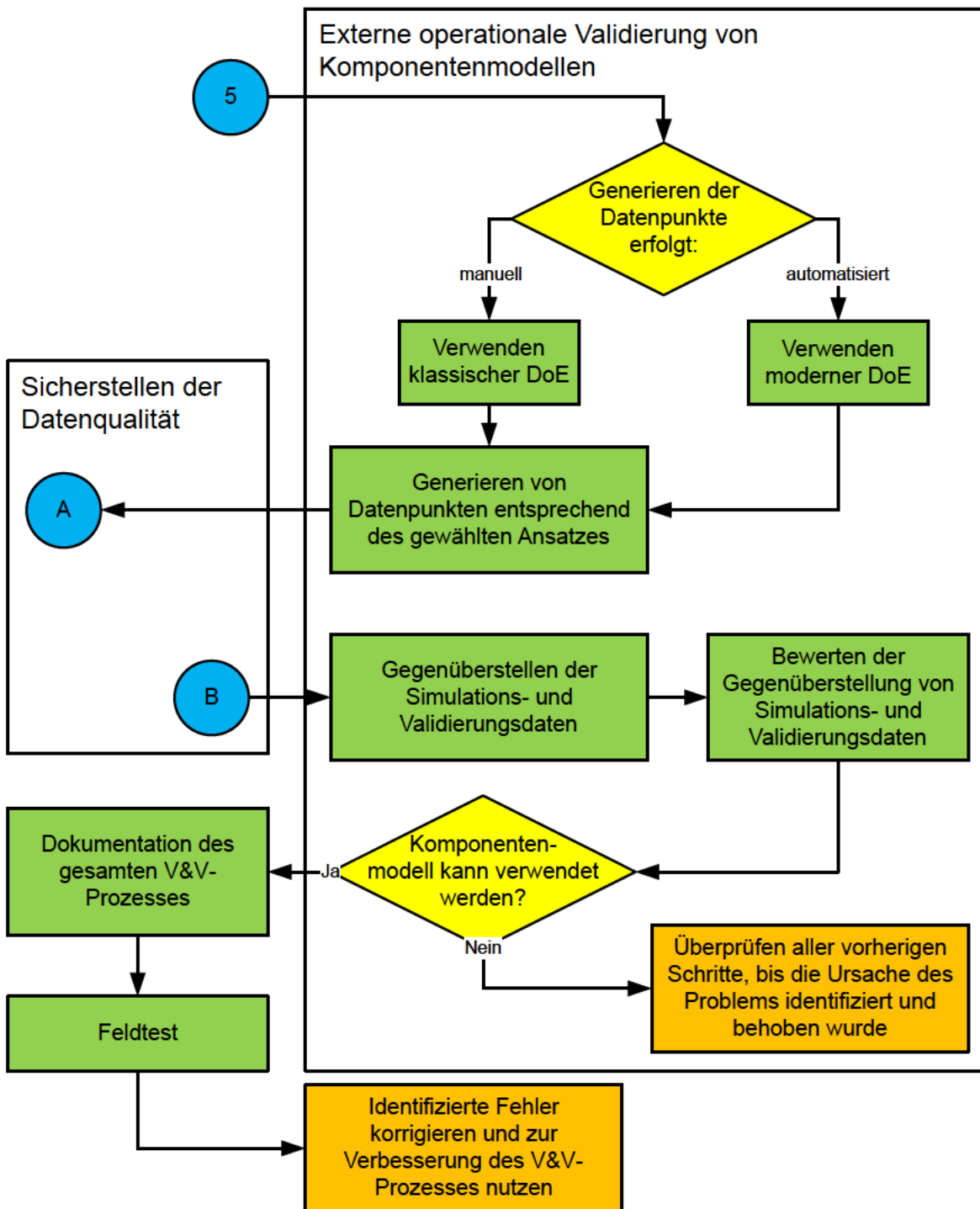


Abbildung 4.9: Flussdiagramm zur externen operationalen Validierung von Komponentenmodellen

Im ersten Schritt der EOv wird unter Abwägung aller Vor- und Nachteile entschieden, aus welcher Quelle die Validierungsdaten generiert werden sollen. Diese Auswahl hat Einfluss darauf, mit welchen Techniken der DoE der Versuchsplan erstellt werden sollte.

Auf Basis des Versuchsplans werden die Simulations- und Validierungsdaten erhoben und auf ihre Qualität hin überprüft. Die anschließende Gegenüberstellung der Daten erfolgt grafisch. Zusätzlich wird die Normalized Euclidean Distance zwischen Simulations- und Validierungsdaten als quantitativer Maßstab ermittelt. Ein Fachexperte mit entsprechend praktischer Erfahrung beurteilt dann, ob die identifizierten Unterschiede für eine praktische Anwendung im akzeptablen Bereich liegen.

Mit der Entscheidung, dass das Komponentenmodell für die praktische Anwendung freigegeben wird, endet die EOv des Komponentenmodells. Es folgen die Dokumentation des erfolgreichen V&V-Prozesses und der Feldtest.

4.1.6. Dokumentation und Feldtest

Die Ergebnisse aller durchgeführten Schritte zur Gewährleistung der Glaubwürdigkeit des Komponentenmodells werden in einer Dokumentation festgehalten. Hinweise zu den Inhalten der Dokumentation sind unter Abschnitt 3.6 gegeben. Die Dokumentation sollte als separates Dokument verfügbar sein. Zusätzlich sollten für die Anwendung besonders relevante Informationen direkt im GUI des Komponentenmodells abrufbar sein. Diese Informationen sind mit kurzer Beschreibung und Beispielen in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Informationen über ein Komponentenmodell, die im GUI abrufbar sein sollten

Information im GUI	Beschreibung	Beispiele
Name des Modells / des Realsystems	Welches System wird durch das Komponentenmodell abgebildet? Wenn mehrere Systeme abgebildet werden, dann sollten sie als Liste angegeben werden.	<ul style="list-style-type: none"> • Modell für gerade Rohre • Modell für Kreiselpumpen, abgebildete Systeme sind: <ul style="list-style-type: none"> – Wilo-Stratos 50/1-12 – Grundfos XY – Kreiselpumpen mit ähnlichen Kennlinienfeldern
Formales Problem	Das formale Problem sollte in Gänze direkt verfügbar sein. Speziell die Möglichkeiten und Grenzen des Komponentenmodells sollten im Detail aufgelistet werden.	Rohrmodell: <ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit des Rohres im Bereich von (0.1 - 430) W/(m*K) • Wärmeleitfähigkeit der Isolierung im Bereich von (0.004 - 0.2) W/(m*K)

Fortsetzung nächste Seite . . .

Tabelle 4.3: (fortgesetzt)

Information im GUI	Beschreibung	Beispiele
Konzeptuelles Modell	Das konzeptuelle Modell beinhaltet alle Annahmen und Vereinfachungen die getroffen wurden. Diese Informationen sind besonders in der Anwendung relevant.	<ul style="list-style-type: none"> • Flussdiagramm des konzeptuellen Modells • Berechnungsgrundlagen • Quellen zur verwendeten Literatur

Sobald die Dokumentation verfügbar ist und die Informationen aus Tabelle 4.3 im GUI abrufbar sind, wird das Komponentenmodell für den Feldtest freigegeben. In der beschriebenen Form unter Abschnitt 3.7 erfordert der Feldtest nur geringfügig zusätzliche Ressourcen, liefert jedoch wertvolle Informationen zur Verbesserung des Komponentenmodells und der V&V-Methodik.

4.2. Testweise Anwendung ausgewählter Techniken

In diesem Abschnitt wird die Anwendbarkeit bestimmter Teile der entwickelten Methodik getestet. Viele der Techniken aus Abschnitt 4.1 basieren auf der Analyse von Konzepten und des Quelltextes. Die Anwendbarkeit solcher Techniken lässt sich im Rahmen dieser Arbeit schlecht bewerten, weil erstens die Voraussetzung teilweise nicht gegeben sind (fehlende Problemdefinition / fehlendes konzeptuelles Modell) und zweitens das Ergebnis schwierig zu quantifizieren ist. Aus diesem Grund werden diese Techniken hier nicht getestet.

Die Techniken der operationalen Validierung, in denen Simulationen durchgeführt werden, lassen sich hingegen sehr gut auf ihre Anwendbarkeit testen. Zu diesem Zweck wird exemplarisch das Komponentenmodell **Pump_mTp** (nachfolgend mit Pumpenmodell bezeichnet) mit den Techniken der operationalen Validierung (Abschnitt 4.1.5) untersucht. Hierzu wird der Zusammenhang von Druckerhöhung, Drehzahl und Volumenstrom des Pumpenmodells untersucht. Zum besseren Verständnis der weiteren Ausführungen wird an dieser Stelle kurz die prinzipielle Funktionsweise des Pumpenmodells vorgestellt.

Kernelement ist ein Algorithmus, der in Abhängigkeit von der Parametrierung und dem Zustand des umgebenen hydraulischen Systems, die Druckerhöhung durch die Pumpe berechnet. Die Zusammenhänge sind in vereinfachter Form in Abbildung 4.10 dargestellt.

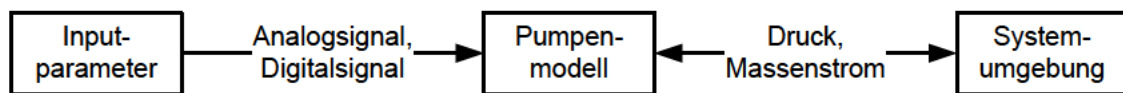


Abbildung 4.10: Vereinfachte Zusammenhänge zwischen Pumpenmodell, Inputparameter und Systemumgebung

Inputparameter. Das Digitalsignal kann als binärer Parameter betrachtet werden und gibt an ob die Pumpe ein- oder ausgeschaltet ist. Das Analogsignal repräsentiert ein (4 - 20) mA Signal, das die Drehzahl der Pumpe steuert.

Pumpenmodell. Die Zusammenhänge von Druck, Massenstrom und Drehzahl des Realsystems werden mit der Pumpenkennlinie beschrieben, die im Komponentenmodell durch ein Polynom angenähert wird.

Systemumgebung. Die Systemumgebung beinhaltet weitere Komponentenmodelle, die Druckänderungen verursachen können. Die Wechselwirkung dieser Komponenten mit dem Pumpenmodell resultiert in Massenströmen, welche durch die Architektur von Jarvis mithilfe komplexer Algorithmen berechnet werden.

4.2.1. Aufbau der Testumgebung

Im ersten Schritt der operationalen Validierung wird eine Testumgebung aufgebaut, worin Versuche mit dem Pumpenmodell durchgeführt werden können. Die hier entwickelte Testumgebung für das Pumpenmodell ist in Abbildung 4.11 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

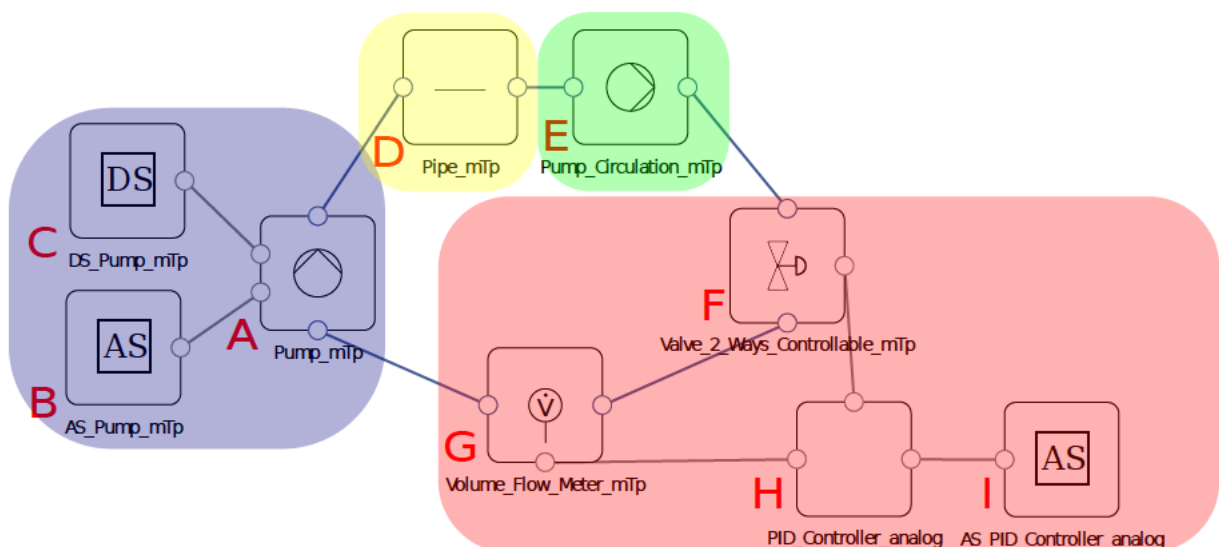


Abbildung 4.11: Testumgebung zur operationalen Validierung des Pumpenmodells

Das Pumpenmodell (**A**) befindet sich auf der linken Seite der Grafik. Zur Steuerung ist es mit dem Modell eines Analogsignals (**B**), sowie eines Digitalsignals (**C**) verbunden. Im Uhrzeigersinn folgen für das hydraulische System ein Rohrmodell (**D**), ein zweites spezielles Pumpenmodell (**E**), ein Regelventil (**F**) und ein Volumenstromsensor (**G**).

Jedes hydraulische System in Jarvis muss mindestens ein Rohrmodell beinhalten, da für andere Komponentenmodelle die vereinfachende Annahme gilt, dass sie kein Volumen besitzen (gelb hinterlegt). Das spezielle Pumpenmodell (**E**) prägt eine konstante, parametrierbare Druckdifferenz auf (grün hinterlegt). Das Regelventil wird mithilfe eines PID-Reglers (**H**) so geregelt, dass sich der gewünschte Volumenstrom einstellen lässt. Der Sollwert wird durch das Analogsignal (**I**) vorgegeben, der Istwert vom Volumenstromsensor (**G**) gemessen (rot hinterlegt). Das untersuchte Pumpenmodell ist blau hinterlegt.

Die zusätzliche Komponente zur Druckerhöhung im Punkt (**E**) mag auf den ersten Blick widersprüchlich sein, denn prinzipiell sollten so wenig weitere Komponentenmodelle wie möglich verwendet werden. Jede zusätzliche Komponente stellt eine potentielle Fehlerquelle dar. Die Druckdifferenz des untersuchten Pumpenmodells (**A**) soll jedoch bei der Durchführung der Versuche als Zielgröße definiert werden, Volumenstrom und Drehzahl als Einflussgrößen. Die Einflussgrößen sollten im besten Fall völlig unabhängig von der Zielgröße sein. Hierfür müssten Drehzahl und Volumenstrom explizit vorgegeben werden. Da dies für den Volumenstrom nicht möglich ist, wird er implizit mithilfe der vorgestellten Regelung erzeugt. Ohne die zusätzliche Komponente (**E**) wäre die Druckdifferenz des Pumpenmodells (**A**) (Zielgröße) alleinige Ursache des Volumenstroms (Einflussgröße). Selbst kleine Fehler der anderen Komponenten, sowie in der Architektur zur Berechnung des Massenstroms, könnten zu Problemen in der Versuchsdurchführung führen. Mithilfe der zusätzlichen, definierten Druckerhöhung (**E**), lässt sich die Auswirkung der Zielgröße (Druckerhöhung des Pumpenmodells (**A**)) auf die Einflussgröße Volumenstrom reduzieren.

4.2.2. Sinnvolle Eingrenzung der Parameter

Entsprechend Abschnitt 3.5.1 werden die Parameter zur Untersuchung des Komponentenmodells auf sinnvolle Kombinationen begrenzt. Die Parameterkombinationen sollten so gewählt werden, dass das Komponentenmodell ein System repräsentiert, für das Validierungsdaten verfügbar sind. Das Komponentenmodell ist dafür konzipiert, dass die Parametrierung immer genau ein spezifisches Realsystem abbildet. In diesem Beispiel wird es entsprechend der Umwälzpumpe „Wilo-Stratos 50/1-12“ parametriert, da diese bereits vielfach bei der Simulation mit Jarvis zur Anwendung kam [11]. Die Parameter des Komponentenmodells sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Übersicht der Parameter des Pumpenmodells

Name des Parameters	Bedeutung	Art des Parameters	Parametrierung
ACCELERATION-_TIME	Zeit zur Beschleunigung von minimaler auf maximale Drehzahl	Realparameter	1 s
ANALOG_INPUT-_SIGNAL_INIT	Startwert für das Analogsignal, falls Zeitreihen verwendet werden	Architekturparameter	0.012 A
CURVE_PARAMETER_A	Parameter zur Beschreibung der Pumpenkennlinie	Hilfsparameter	ca. $-9.2E-4$
CURVE_PARAMETER_B	Parameter zur Beschreibung der Pumpenkennlinie	Hilfsparameter	ca. $8.4E-3$
DIGITAL_INPUT-_SIGNAL_INIT	Startwert für das Digitalsignal, falls Zeitreihen verwendet werden	Architekturparameter	24 V
EFFICIENCY_TOTAL	Wirkungsgrad	Realparameter	60 %
ROTATIONAL-_SPEED_MAX	Maximale Drehzahl	Realparameter	ca. 61.4 1/s
ROTATIONAL-_SPEED_MIN	Minimale Drehzahl	Realparameter	ca. 23.3 1/s
SHUT_OFF_HEAD	Druckerhöhung bei maximaler Drehzahl und null Volumenstrom ²	Realparameter / Hilfsparameter	73676 Pa
USE_INIT_INPUT-_SIGNALS	Gibt an, ob Startwerte für Analog- und Digitalsignal benötigt werden	Architekturparameter	variabel

Fortsetzung nächste Seite ...

²Wird auch als Hilfsparameter zur Beschreibung der Pumpenkennlinie verwendet

Tabelle 4.4: (fortgesetzt)

Name des Parameters	Bedeutung	Art des Parameters	Parametrierung
VOLUME_FLOW_MAX	Maximaler Volumenstrom	Realparameter	ca. $7.9E-3$ m ³ /s
Digitalsignal	Gibt an, ob die Pumpe ein- oder ausgeschaltet ist.	Inputparameter	24 V
Analogsignal	Steuert die Drehzahl der Pumpe	Inputparameter	variabel

Die Realparameter werden dabei Herstellerangaben entnommen, die Hilfsparameter entsprechend einer Tabelle [2] berechnet. Als Quelle dient das Datenblatt des Realsystems [39], woraus die meisten Parameter entnommen, oder abgeleitet werden können. Der Parameter ACCELERATION_TIME gibt an, wie viele Sekunden die Pumpe zur Beschleunigung von minimaler auf maximale Drehzahl braucht. Da dies nicht Teil der geplanten Untersuchung ist, wurde der Parameter willkürlich auf 1 s festgelegt. Die Inputparameter werden indirekt durch zwei zusätzliche Komponenten Analogsignal und Digitalsignal realisiert (siehe Abbildung 4.11). Da der Fokus der Untersuchung auf dem Zusammenhang von Druckerhöhung, Drehzahl und Volumenstrom liegt, werden zwei dieser Größen als Einflussgröße definiert, die dritte als Zielgröße.

Die Drehzahl ist in diesem Fall als Einflussgröße prädestiniert, da sie im Kennlinienfeld der Pumpe (Abbildung 4.12) als Isolinien dargestellt ist und sich sehr genau ablesen lässt. Als zweite Einflussgröße wird der Volumenstrom gewählt. Dieser lässt sich mithilfe des Regelkreises der Testumgebung (Abbildung 4.11) gezielt einstellen. Die zu messende Zielgröße ist die Druckerhöhung.

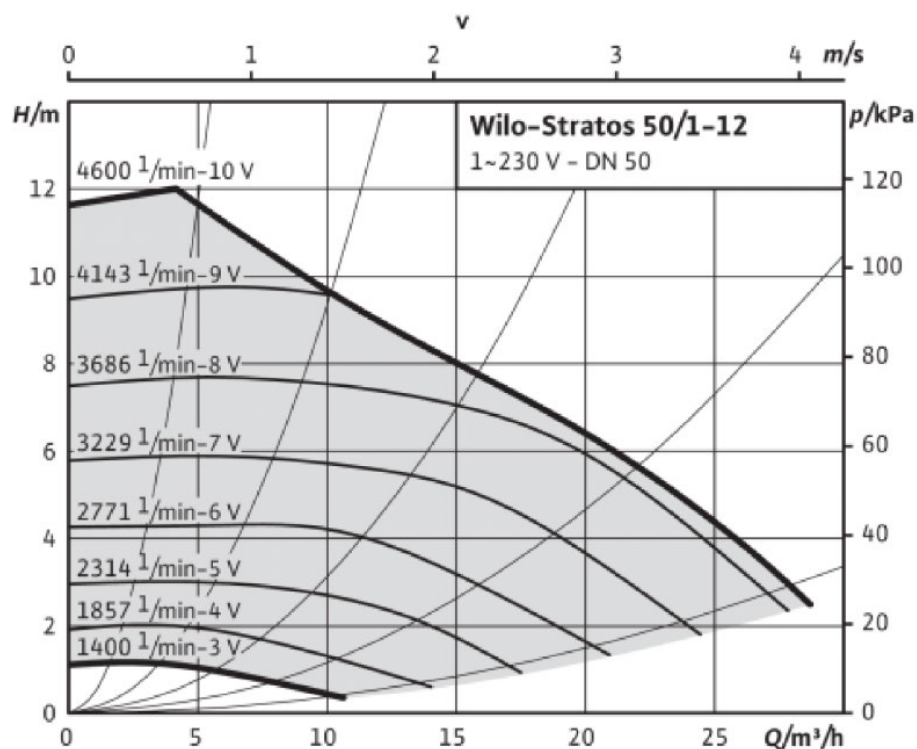


Abbildung 4.12: Kennlinienfeld der Pumpe Wilo-Stratos 50/1-12

Für die Auswahl der Parameter bedeutet dies, dass aus Sicht des Komponentenmodells, nur das Analogsignal zur Steuerung der Drehzahl variabel ist. Die restlichen Parameter des Komponentenmodells sind fest, da sie zur Abbildung des speziell zu untersuchenden Realsystems benötigt werden. Der zweite variable Parameter (Volumenstrom) wird durch die Testumgebung realisiert.

4.2.3. EDA des Pumpenmodells

Im Rahmen der explorativen Datenanalyse soll ein erster Eindruck der Simulationsergebnisse ermöglicht werden und eine Plausibilisierung stattfinden. Hierfür wurden Versuchspunkte gewählt, die aus dem Kennlinienfeld (Abbildung 4.12) bekannt sind. Da sowohl die Drehzahl, als auch der Volumenstrom durch Inputparameter gesteuert werden, konnten alle Zustände mithilfe von Zeitreihen in einer einzigen Simulation realisiert werden. Der Versuchsplan setzt sich aus zwei einzelnen Versuchsplänen zusammen - einem für die Drehzahl und einem für den Volumenstrom. Die Drehzahl wird auf 6 Stufen variiert, der Volumenstrom auf 7. Daraus ergibt sich ein Versuchsplan mit $6^1 \cdot 7^1 = 42$ Versuchspunkten. Der entsprechend vollfaktorielle Versuchsplan ist in vereinfachter Form in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Versuchsplan zur EDA des Pumpenmodells

Versuchspunkte	Drehzahl in 1/min	Volumenströme in m³/h
1 bis 7	1400	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
8 bis 14	1875	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
15 bis 21	2314	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
22 bis 28	2771	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
29 bis 35	3229	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
36 bis 42	3686	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30

Im oberen Drehzahlbereich (4143 1/min und 4600 1/min, siehe Abbildung 4.12) werden die ansonsten glatten Verläufe durch Unregelmäßigkeiten begrenzt. Da es sich in diesem Abschnitt nur um die Anwendbarkeit der entwickelten V&V-Methodik handelt und nicht um eine tatsächliche Validierung des Komponentenmodells, bleiben diese Drehzahlbereiche vereinfachend unberücksichtigt.

Jeder Versuchspunkt wurde 60 Zeitschritte lang simuliert, um ein mögliches Einschwingverhalten erkenntlich zu machen. Die relevanten Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.13 grafisch aufbereitet.

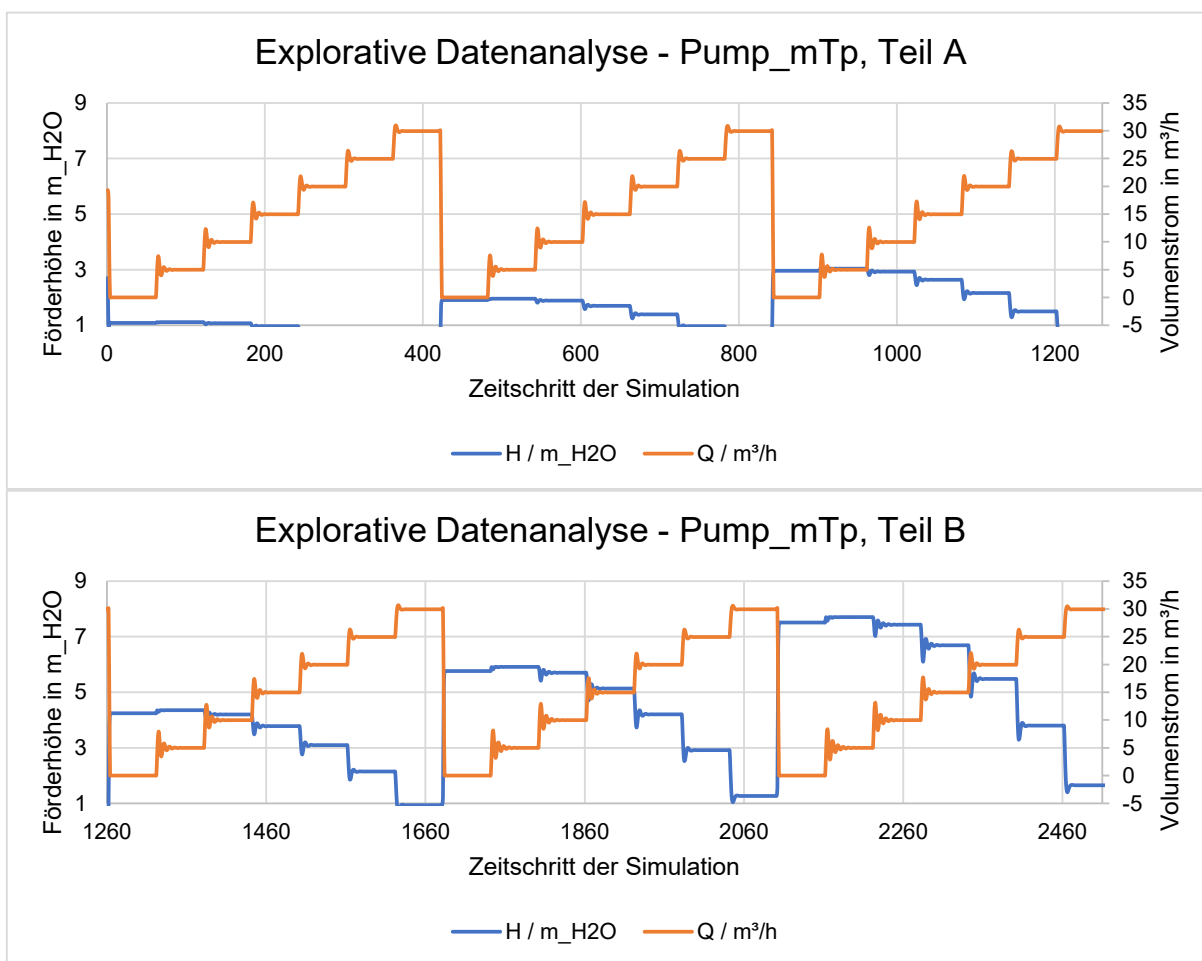


Abbildung 4.13: Ergebnisse der explorativen Datenanalyse des Pumpenmodells

Über die gesamte Simulationszeit verteilt sind deutlich die sechs Drehzahlbereiche zu erkennen. In jedem Drehzahlbereich werden nacheinander die sieben Volumenströme eingestellt, woraus die Druckdifferenz der Pumpe resultiert. Die Verläufe in Abbildung 4.13 zeigen, dass sich die Werte im erwarteten Bereich befinden: Die Volumenströme werden augenscheinlich exakt durch den Regelkreis der Testumgebung eingestellt und die Förderhöhe entspricht der Größenordnung des Kennlinienfeldes (siehe Abbildung 4.12). Weiterhin lässt sich für jeden Versuchspunkt ein kurzes Einschwingverhalten erkennen, das sich durch die Regelung innerhalb der Teststrecke erklären lässt.

4.2.4. IOV des Pumpenmodells

Im Anschluss an die EDA können in der IOV bestimmte Eigenschaften des Komponentenmodells untersucht werden. Als konkrete Technik wurde hierfür die Sensitivitätsanalyse identifi-

ziert. Da Jarvis derzeit keine Testumgebung für die Sensitivitätsanalyse bietet und Simulationsergebnisse einer großen Anzahl verschiedener Parametrierungen benötigt werden, kann sie an dieser Stelle nicht direkt am Pumpenmodell durchgeführt werden. Um die Anwendbarkeit dieser Technik dennoch zu prüfen, wurde ein kleiner Teil des Pumpenmodells in ein automatisiert ausführbares Ersatzmodell überführt.

Das Konzept des Pumpenmodells beinhaltet, dass die Pumpenkennlinie durch ein Polynom zweiten Grades angenähert wird. Die Koeffizienten des Polynoms werden mit Hilfe von drei Messwerten aus der Pumpenkennlinie erstellt und entsprechen den zuständigen Parametern des Pumpenmodells (siehe Tabelle 4.4). Mithilfe der Koeffizienten kann aus einem Wert des Volumenstroms der entsprechende Wert der Förderhöhe berechnet werden. Diese Funktionalität ist automatisiert mit dem Ersatzmodell möglich. Der Quelltext des Ersatzmodells ist in Quelltext 1 dargestellt und wird anschließend kurz erläutert.

Quelltext 1: Prinzipielle Funktionsweise des Ersatzmodells für die Pumpenkomponente

```
1 import numpy as np
2
3 H = [7.5, 7.7, 2.4]
4 Q = [0, 5.5, 26.6]
5
6 p = np.polyfit(Q, H, 2)
7
8 CURVE_PARAMETER_A = p[0]
9 CURVE_PARAMETER_B = p[1]
10 SHUT_OFF_HEAD = p[2]
11
12
13 def ersatzmodell(q):
14     h = CURVE_PARAMETER_A * q ** 2 + \
15         CURVE_PARAMETER_B * q + \
16         SHUT_OFF_HEAD
17     return h
18
19
20 q1 = 15
21 h1 = ersatzmodell(q1)
```

In Zeile 1 wird die Bibliothek „Numpy“ [14] importiert.

In Zeile 3 und 4 werden die Messwerte für die Förderhöhe (H) und den Volumenstrom (Q) bereitgestellt.

In Zeile 6 werden die Koeffizienten des Polynoms berechnet.

In den Zeilen 8 bis 10 werden die Koeffizienten den Parametern des Pumpenmodells zugeordnet.

In den Zeilen 13 bis 17 wird eine Funktion definiert, womit die automatisierte Umrechnung von Volumenstrom q in Förderhöhe h möglich ist.

4 Darstellung der entwickelten V&V-Methodik

In den Zeilen 20 und 21 wird die Funktion testweise für einen Volumenstrom von $q_1 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ angewandt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.14 visualisiert.

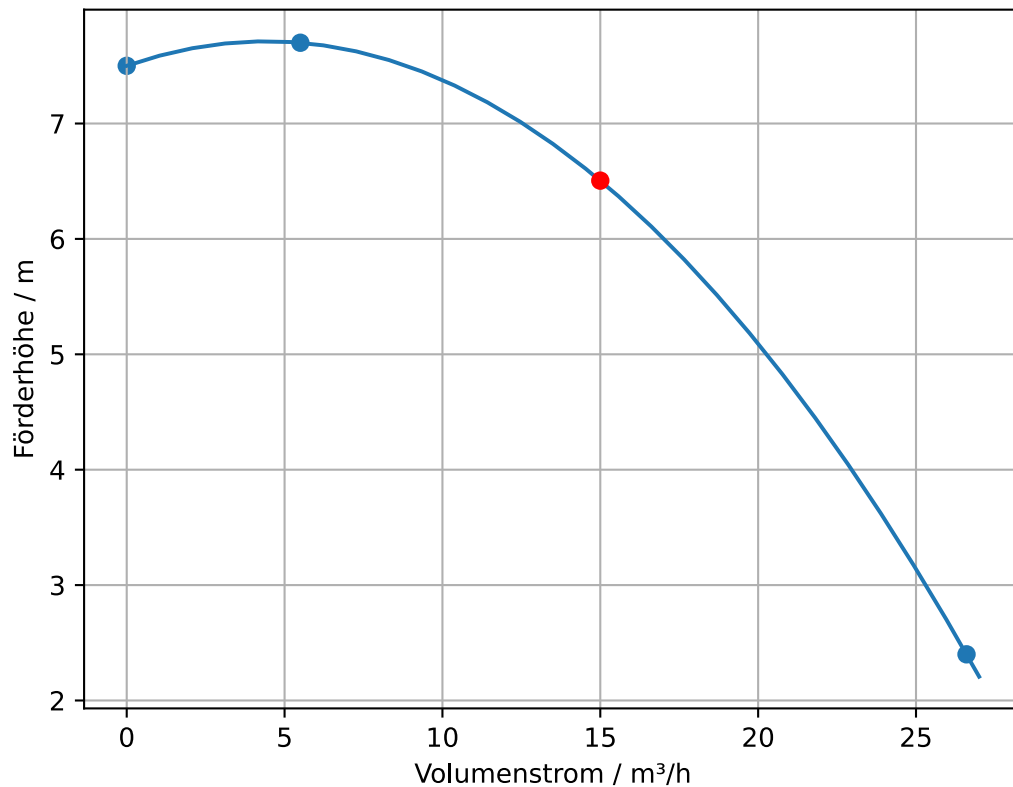


Abbildung 4.14: Zur Funktionsweise des Pumpenersatzmodells

Die blauen Punkte zeigen die Messwerte mit denen die Koeffizienten des Polynoms erstellt wurden. Der rote Punkt zeigt das Ergebnis der testweisen Anwendung der Funktion für $q_1 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$. Mithilfe dieses Ersatzmodells wird im Folgenden die Anwendbarkeit einer Sensitivitätsanalyse mithilfe von SALib getestet. SALib steht für *Sensitivity Analysis Library in Python* und ist eine Python Bibliothek zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen [16].

Für dieses Beispiel wird als Sensitivitätsanalyse die Varianzanalyse nach Sobol gewählt. Der dafür verwendete Quelltext ist in Quelltext 2 dargestellt.

Quelltext 2: Sensitivitätsanalyse für das Ersatzmodell der Pumpenkomponente mit SALib

```

1  from SALib.sample import saltelli
2  from SALib.analyze import sobol
3  import numpy as np
4
5  problem = {
6      'num_vars': 3,
7      'names': ['H1', 'H2', 'H3'],
8      'bounds': [[7.5-1, 7.5+1], [7.7-1, 7.7+1], [2.4-1, 2.4+1]],
9      'dists': ['unif', 'unif', 'unif']
10 }
11 X = saltelli.sample(problem, 1000)
12
13 Q = [0, 5.5, 26.6]
14 q = 26.6
15 h = np.zeros([X.shape[0]])
16 for i, x in enumerate(X):
17     H1 = X[i, 0]
18     H2 = X[i, 1]
19     H3 = X[i, 2]
20     H = [H1, H2, H3]
21     p = np.polyfit(Q, H, 2)
22     CURVE_PARAMETER_A = p[0]
23     CURVE_PARAMETER_B = p[1]
24     SHUT_OFF_HEAD = p[2]
25     h[i] = CURVE_PARAMETER_A * q ** 2 + \
26           CURVE_PARAMETER_B * q + \
27           SHUT_OFF_HEAD
28
29 ans = sobol.analyze(problem, h, print_to_console=True)

```

In den Zeilen 5 bis 10 wird das Problem definiert, das untersucht werden soll. Hierfür müssen zunächst die Anzahl und die Bezeichnungen der zu untersuchenden Variablen definiert werden. Anschließend muss der Bereich definiert werden, in dem der Einfluss der Variablen untersucht werden soll. Für dieses Beispiel soll der Einfluss der Ablesegenauigkeit der Förderhöhe aus dem Datenblatt auf den berechneten Volumenstrom untersucht werden. Für diesen Zweck wurden die Grenzen der jeweils abgelesenen Werte der Förderhöhe auf $H_i \pm 1 \text{ m}$ festgelegt. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb der Grenzen wurde einfachheitshalber eine Gleichverteilung angenommen. Es kann also jeder Wert für H_i mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Je nach Anwendungsfall können andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen passender sein.

In Zeile 11 wird der Versuchsplan erstellt. In diesem Beispiel wird die Methode von Saltelli gewählt, der die ursprüngliche Methode von Sobol verbessert hat [18]. In SALib steht hierfür eine Funktion bereit, die als Eingangsparameter das Problem und einen Proportionalitätsfaktor N (hier $N = 1000$) benötigt. Mit der Anzahl der Parameter $D = 3$ ergibt sich für den Versuchsplan nach Saltelli $N * (2D + 2) = 8000$ Versuchspunkte [18]. Das Ergebnis X ist ein ndarray: (8000, 3) mit einer Spalte pro Parameter.

In Zeile 13 werden die Werte Q_i für die abgelesenen Volumenströme angegeben, die zu den Werten von H_i gehören und zur Berechnung der Polynomkoeffizienten benötigt werden. Diese Werte werden in diesem Beispiel als fest angenommen.

In Zeile 14 wird derjenige Volumenstrom definiert, der mithilfe des fertigen Ersatzmodells berechnet wird. Die Sensitivitätsanalyse gibt dann Aufschluss über den Einfluss der Parameter H_i bei der Berechnung des Volumenstroms q .

In den Zeilen 16 bis 27 wird das Ersatzmodell aus Quelltext 1 für jede Zeile des Versuchsplans ausgeführt und gespeichert (Zeile 25).

In der Zeile 29 findet die eigentliche Sensitivitätsanalyse nach Sobol statt (vgl. [17]). Hierfür werden das ursprünglich definierte Problem und die Simulationsergebnisse benötigt.

Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse ist in Tabelle 4.6 dargestellt. Wie für eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse üblich [13] werden die sogenannten Haupteffekte (S1 oder SH) und Totaleffekte (ST) berechnet.

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Varianzbasierten Sensitivitätsanalyse für das Ersatzmodell bei $q=15 \text{ m}^3/\text{h}$

Parameter	S1	S1_conf	ST	ST_conf
H1	0.198413	0.033812	0.196993	0.016854
H2	0.780674	0.061495	0.782505	0.062029
H3	0.021750	0.012786	0.022443	0.001846

Zu den Eigenschaften der Effekte lässt sich sagen [13], dass

1. die gesamte Varianz des Modells vom Parameter X_i direkt verursacht wird, wenn $SH_i = 1$ beträgt
2. die $\sum SH_i \leq 1$ ist
3. das Modell additiv ist, wenn die $\sum SH_i = 1$ ist
4. Wechselwirkungseffekte existieren, wenn $1 - \sum SH_i \gg 0$ ist
5. keine Wechselwirkungseffekte existieren, wenn $ST_i \approx SH_i$ ist
6. der Parameter X_i einen zu vernachlässigenden Einfluss hat, wenn $ST_i \approx 0$ ist
7. die $\sum ST_i \geq 1$ ist.

Nähere Informationen zu den mathematischen Hintergründen der Effekte sind beispielsweise in [13, 31] zu finden.

Zunächst zeigen die Ergebnisse der Varianzanalyse mit $SH_{H1} + SH_{H2} + SH_{H3} \approx 1$ den additiven Zusammenhang der Parameter (siehe Quelltext 2, Zeile 25 bis 27).

Weiterhin zeigen die Haupteffekte, dass der direkte Einfluss des Parameters H2 auf die Berechnung der Förderhöhe bei einem Volumenstrom von 15 m³/h mit ca. 78 % deutlich dominiert. Der Parameter H1 hat ca. 20 % Einfluss und H3 nur ca. 2 %. Wenn die Varianzanalyse jedoch jeweils für die drei Volumenströme der Messwerte (Quelltext 2, Zeile 13) durchgeführt wird, dann ergeben sich die Haupteffekte entsprechend Tabelle 4.7.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse für das Ersatzmodell bei $q=(0, 5.5, 26.6)$ m³/h

Parameter	S1	S1_conf	ST	ST_conf
H1(q=0)	0.999092	0.077050	0.999164	0.062856
H2(q=0)	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H3(q=0)	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H1(q=5.5)	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H2(q=5.5)	1.001608	0.072336	1.001586	0.059523
H3(q=5.5)	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H1(q=26.6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H2(q=26.6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
H3(q=26.6)	1.001799	0.069534	1.001824	0.053450

Das Ergebnis lässt sich leicht plausibilisieren. Da die Polynomfunktion durch die Messpunkte definiert wird, kann der berechnete Wert der Förderhöhe an der Stelle eines der Messwerte nur durch eine Variation des Messwertes selbst beeinflusst werden (siehe Abbildung 4.15).

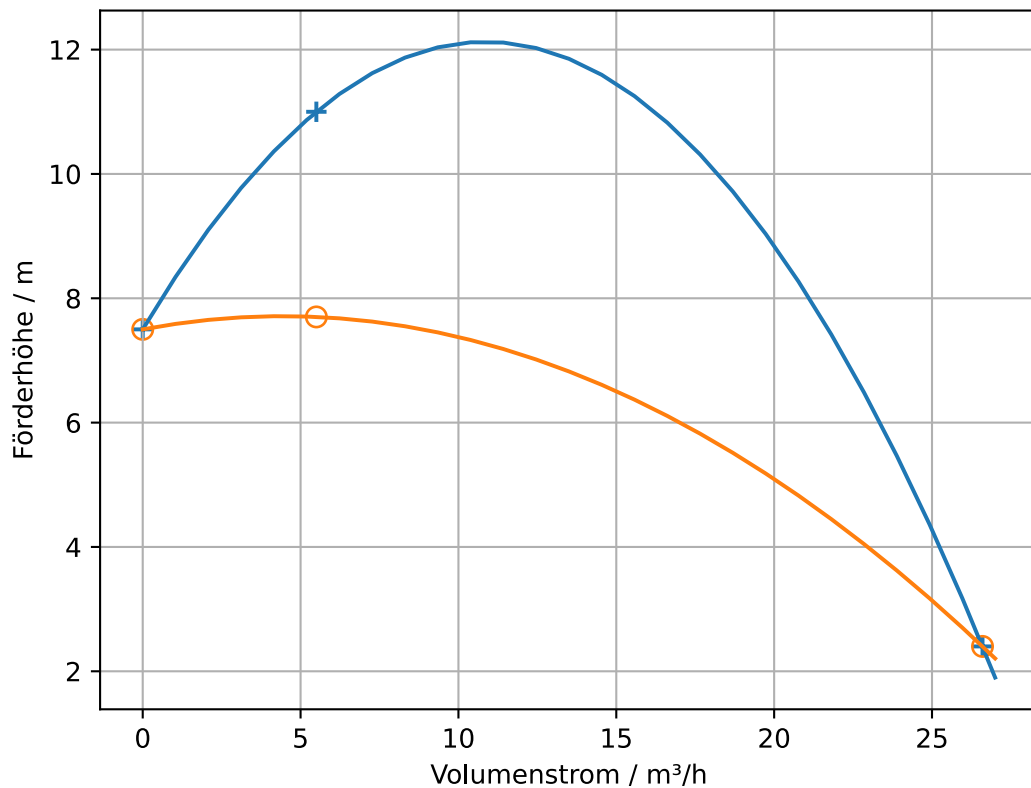


Abbildung 4.15: Zur Plausibilisierung der Ergebnisse der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse

Die Abbildung zeigt eine Variation des Messwertes der Förderhöhe zur Erstellung des Polynoms beim Volumenstrom von $5.5 \text{ m}^3/\text{h}$. Die hierdurch bedingt Änderung des Polynoms hat jedoch keinen Einfluss auf die Berechnung der Förderhöhe an den anderen zwei Messpunkten. Die Ablesegenauigkeit eines Messwertes gewinnt also an Einfluss, je näher die zu berechnende Förderhöhe an diesem Messwert liegt.

4.2.5. EOV des Pumpenmodells

Nachdem die Simulationsergebnisse der EDA plausibilisiert wurden, können bei der externen operationalen Validierung zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden, um die Simulationsergebnisse mit Validierungsdaten zu vergleichen. Die Validierungsdaten und ihre Unsicherheit werden nach einer Typ-B-Methode [8] aus dem vom Hersteller angegebenen Kennlinienfeld der Pumpe ermittelt. Eine Ermittlung nach Typ-A-Methode ist nicht möglich, da die

Schätzwerte der Messgrößen nicht durch das arithmetische Mittel mehrerer Messwerte gebildet werden, sondern durch das Ablesen einer Skala. Hierbei werden für den Volumenstrom und die Drehzahl Werte ausgewählt, welche den Schnittpunkt beider Isolinien bilden, wodurch ihre Ableseunsicherheit vernachlässigbar ist. Die dazugehörige Förderhöhe wird von der Ordinate abgelesen. Um die Unsicherheit beim Ablesen zu verringern, wurde dem Kennlinienfeld ein Gitter hinterlegt (Abbildung 4.16).

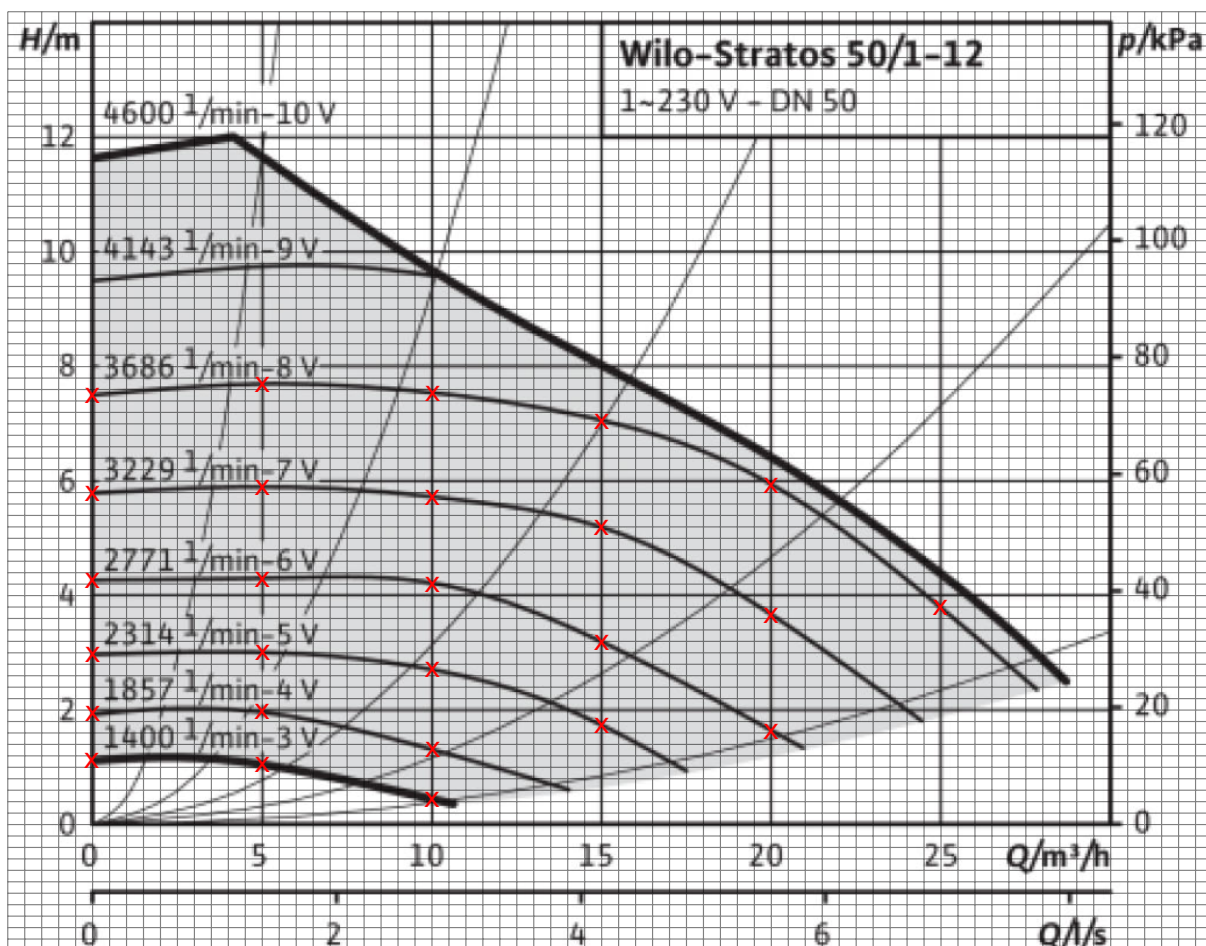


Abbildung 4.16: Kennlinienfeld der Pumpe Wilo-Stratos 50/1-12 mit hinterlegtem Gitter

Mithilfe des hinterlegten Gitters lässt sich die Auflösung der Skala zum Ablesen der Förderhöhe auf $\Delta H = 0.2 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$ verfeinern, mit H = der gesuchten Messgröße. Beim Ablesen einer Förderhöhe lässt sich also mit Sicherheit sagen, dass der gesuchte Messwert H im Bereich $h \pm 0.1 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$ liegt, mit h = dem Schätzwert für H . Weiterhin lässt sich beim Ablesen beurteilen, ob der Messwert eher in der Mitte zweier ablesbarer Werte liegt, oder am Rand. Um dies zu berücksichtigen wird für die Wahrscheinlichkeitsverteilung beim Ablesen eine symmetrische Dreieckverteilung angenommen. Die resultierende Standardunsicherheit $u(h_i)$ beim Ablesen

4 Darstellung der entwickelten V&V-Methodik

einer Förderhöhe am Messpunkt i nach Abbildung 4.16 ergibt sich aus der Wurzel der Varianz $u^2(h)$ der symmetrischen Dreieckverteilung, die sich nach

$$u^2(h_i) = \frac{a^2}{6} \quad (4.1)$$

berechnet. Entsprechend der Auflösung der Skala aus Abbildung 4.16 ergibt sich mit

$$a = 0.1 \text{ m}_{H_2O} \quad (4.2)$$

die Varianz

$$u^2(h_i) = \frac{(0.1 \text{ m}_{H_2O})^2}{6} = \frac{1}{600} \text{ m}_{H_2O}^2 \quad (4.3)$$

und die Standardunsicherheit

$$u(h_i) = \sqrt{u^2(h_i)} = \sqrt{1/600 \text{ m}_{H_2O}^2} \approx 0.041 \text{ m}_{H_2O} \quad (4.4)$$

Die aus Abbildung 4.16 abgelesenen Werte für die Förderhöhe sind in der folgenden Tabelle 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.8: Validierungsdaten durch Ablesen einer analogen Skala

n / 1/min	3686	3229	2771	2314	1857	1400
Q / m3/h	Förderhöhe H / m_H2O					
0	7,5	5,8	4,3	3	1,9	1,1
5	7,7	5,9	4,3	3	2	1
10	7,6	5,7	4,2	2,7	1,3	0,4
15	7	5,2	3,2	1,7	/	/
20	6	3,6	1,6	/	/	/
25	3,8	/	/	/	/	/
30	/	/	/	/	/	/

Um die Unterschiede zwischen Simulations- und Validierungsdaten besser beurteilen zu können, werden die Daten grafisch gegenübergestellt. Auf die Darstellung der Standardunsicherheit wird dabei verzichtet, da sie aufgrund ihres kleinen Wertes ohnehin nicht erkennbar wäre. Weiterhin wird auf interpolierende Linien verzichtet, da sie Werte vortäuschen würden, die so nicht gemessen wurden. Aus diesen Gründen werden die Versuchspunkte für jede Drehzahl in

einem separaten Diagramm, zusammenfassend in Abbildung 4.17 dargestellt.

4 Darstellung der entwickelten V&V-Methodik

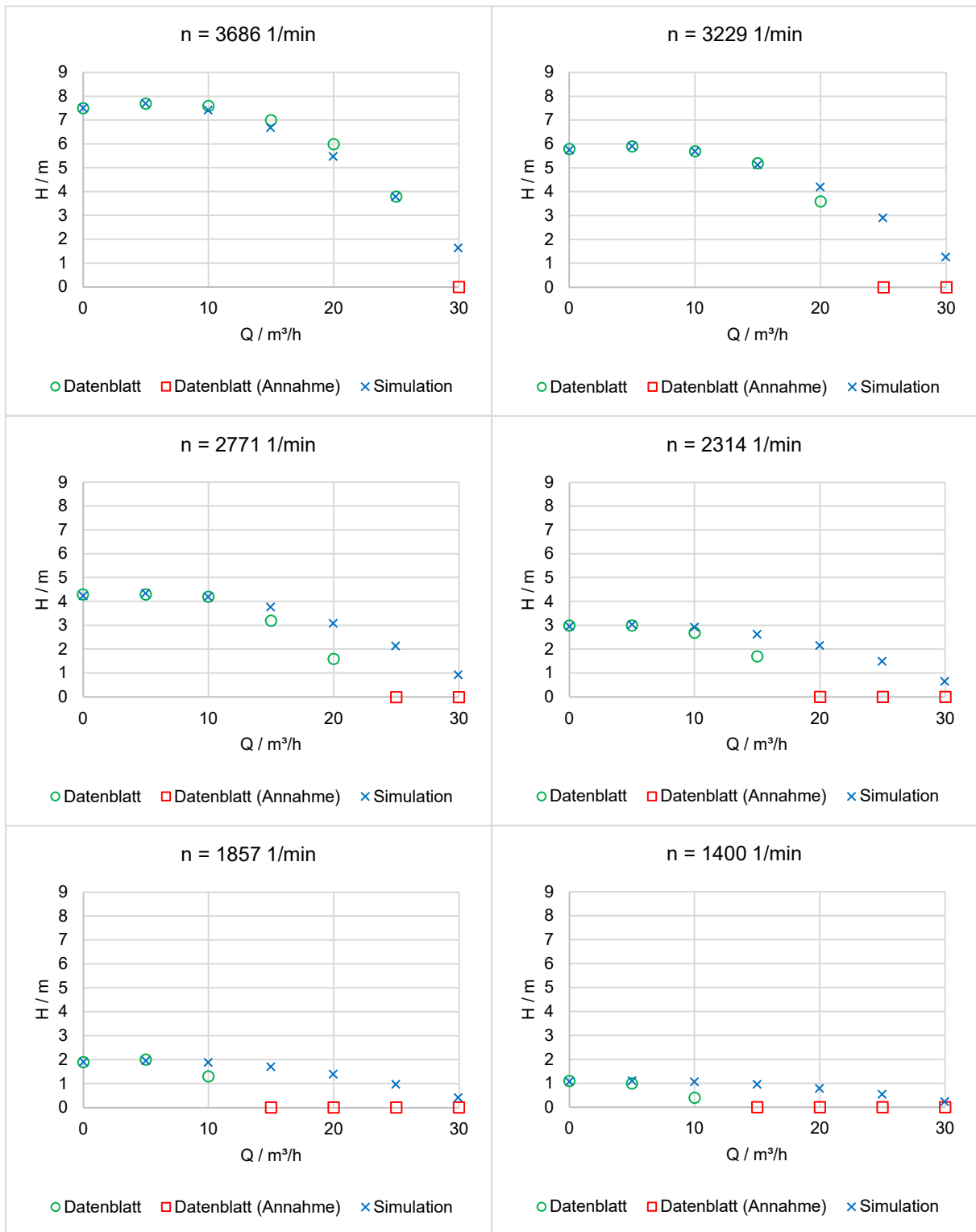


Abbildung 4.17: Grafische Gegenüberstellung von Simulations- und Validierungsdaten für das Pumpenmodell

Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass bei der Simulation mit sinkender Drehzahl zunehmend Volumenströme erreicht werden, für die das Kennlinienfeld keine Informationen aufweist (Abbildung 4.16). Hier treten niedrige Drücke in Kombination mit hohen Fließgeschwindigkeiten auf, wodurch Kavitation begünstigt wird. Ab einer gewissen Intensität geht Kavitation mit einem Einbruch der Pumpleistung einher, weshalb für diese Bereiche eine Förderhöhe von 0 angenommen wurde (siehe rote Quadrate in Abbildung 4.17). Der Grund, weshalb in der Simulation auch bei niedrigen Drehzahlen hohe Volumenströme erreicht werden, liegt in der vereinfachenden Annahme, dass eine Druckänderung durch die Gleichung

$$p_2 = p_1 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{-2} \quad (4.5)$$

beschrieben werden kann. Die Auswirkungen dieser Annahme sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Wenn für p_1 die Drücke der blauen Kurve verwendet werden, dann führt dies dazu, dass die Isolinien der Drehzahlen nicht wie im Kennlinienfeld (Abbildung 4.16) nahezu parallel verlaufen, sondern „platt gedrückt“ werden (Abbildung 4.18).

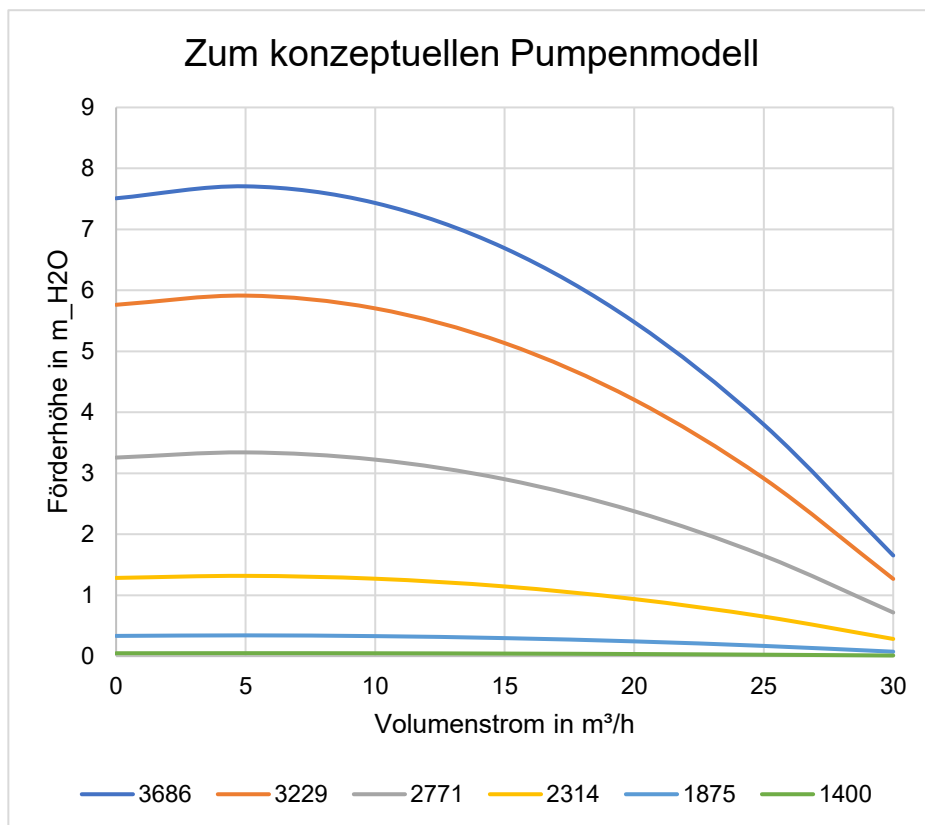


Abbildung 4.18: Zum konzeptuellen Modell des Pumpenmodells

Zusätzlich zur grafischen Gegenüberstellung wurde entsprechend Abschnitt 3.5.4 auch die

4 Darstellung der entwickelten V&V-Methodik

Normalized Euclidean Distance d_{ne} ermittelt. Sie wurde unter der Annahme berechnet, dass die Druckerhöhung der Pumpe für fehlende Validierungsdaten null ist (siehe Abbildung 4.17). Die Normalized Euclidean Distance ist separat für jeden Drehzahlbereich in Abbildung 4.19 dargestellt.

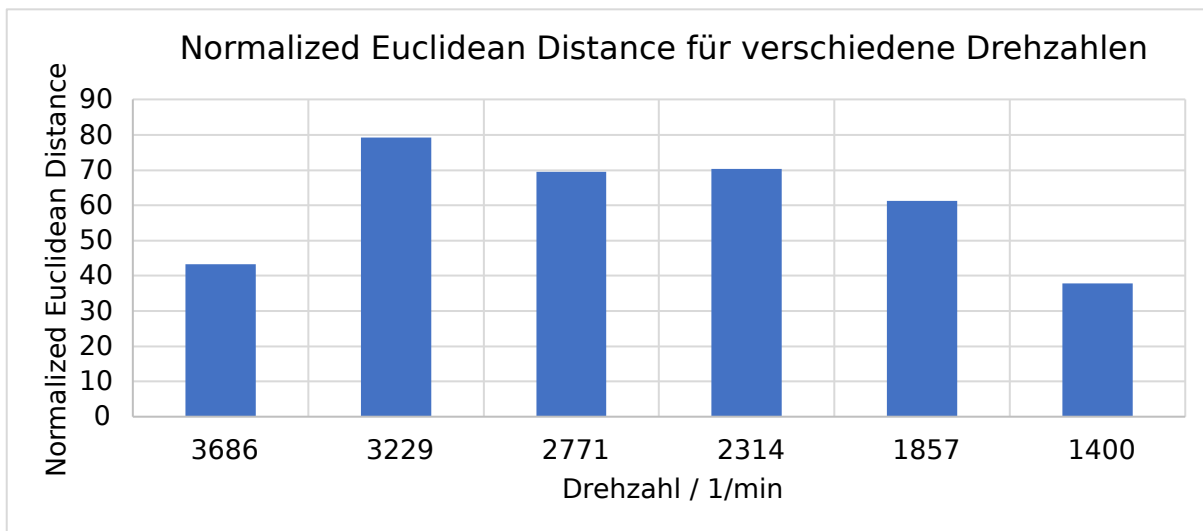


Abbildung 4.19: Darstellung der Normalized Euclidean Distance für verschiedene Drehzahlen

Statistisch begründet sollte die Normalized Euclidean Distance für ein valides Simulationsmodell $d_{ne} \leq 2$ sein [22]. Nach der hier entwickelten V&V-Methodik wird die Validität jedoch auf subjektiver Basis von Fachexperten bewertet. Die Ergebnisse der Normalized Euclidean Distance können dennoch einen Beitrag zu dieser Beurteilung leisten. Werden beispielsweise ihre Werte für die einzelnen Drehzahlbereiche gegenübergestellt (siehe Abbildung 4.19), so lässt sich erkennen, dass die quantitativen Unterschiede zwischen Simulations- und Validierungsdaten bei geringen Drehzahlen nicht am größten sind, obwohl die Form der Isodrehzahllinie hier am meisten abweicht (siehe Abbildung 4.17).

Dieses Phänomen ist damit zu erklären, dass die Druckerhöhung bei kleinen Drehzahlen ohnehin sehr gering ist. Der Unterschied dieser geringen Druckerhöhung zu null, wie es für den Kavitationsbereich des Pumpenkennfeldes angenommen wurde, ist daher ebenfalls gering. Diese Quantifizierung der Unterschiede durch die Normalized Euclidean Distance kann vom Fachexperten bei der Bewertung genutzt werden, ob die vereinfachende Annahme aus Gleichung 4.5 eine akzeptable Repräsentation der Realität darstellt.

4.2.6. Fazit zur testweisen Anwendung der Techniken

Aus den vorangegangenen Anwendungsfällen verschiedener Techniken lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen, die nachfolgend dargestellt sind.

Versuchsumgebung. Im ersten Schritt dieses Abschnitts findet die Entwicklung und der Aufbau einer Testumgebung statt. Hierfür war unter anderem ein Regelkreis notwendig, um den Volumenstrom auf den gewünschten Wert zu bringen. Der Regelkreis wurde entsprechend Abbildung 4.11 realisiert, wobei der gewünschte Volumenstrom die Führungsgröße darstellt und die sich ändernde Druckdifferenz der Pumpe als Störgröße wirkt.

Die Qualität einer Regelung (Regelgüte) wird hinsichtlich der Sollwertfolge oder hinsichtlich der Störgrößenkompensation optimieren. Hierbei muss jedoch stets ein Kompromiss geschlossen werden. Eine perfekte Sollwertfolge und eine perfekte Störgrößenkompensation schließen sich (bei linearer Regelung und konstanten Regelparametern) nach dem Gleichgewichtstheorem (vgl. [21], S. 381) prinzipiell aus.

Das bedeutet für die Realisierung der Testumgebung, dass entweder bei der Variation des Volumenstroms oder der Variation der Druckdifferenz, ein Einschwingverhalten nicht ausgeschlossen werden kann. Das Einschwingverhalten erschwert vor Allem automatisierte Versuchsdurchführungen, da eine zuverlässige Überwachung von Einschwingvorgängen eher unzuverlässig ist. Weiterhin stellt jede zusätzliche Software auch eine zusätzliche Fehlerquelle dar. Fehler bei der Untersuchung des Pumpenmodells können auch durch die anderen Komponentenmodelle, ihre Parametrierung, dem Konzept der Testumgebung und durch die Architektur von Jarvis verursacht werden.

Eine grundsätzliche Neuentwicklung der Versuchsumgebung ist empfehlenswert, damit das Fehlerpotential bei der Untersuchung eines Komponentenmodells minimiert werden kann und eine automatisierte Versuchsdurchführung ermöglicht wird. Die sinnvolle Eingrenzung der Parameter ist ein wichtiger Schritt bei der Versuchsplanung. Falls jedoch nur Validierungsdaten eines spezifischen Realsystems verfügbar sind, so wird die Aussagekraft des Validierungsergebnisses erheblich eingeschränkt. Im konkreten Fall sollte dann geprüft werden, ob und mit welcher Begründung sich die Ergebnisse auf ähnliche Realsysteme übertragen lassen und welche Einschränkungen dafür gelten.

Parametrierung. Im zweiten Schritt wurden die Parameter des Pumpenmodells sinnvoll begrenzt. Da es für das Pumpenmodell kein frei parametrierbares Vergleichsmodell gibt, musste die Parametrierung entsprechend eines messbaren Realsystems (in diesem Fall der Umwälzpumpe „Wilo-Stratos 50/1-12“) durchgeführt werden.

Das bedeutet für die Validierung des Pumpenmodells, dass durch die Untersuchung nur eine Aussage gegenüber der Umwälzpumpe „Wilo-Stratus 50/1-12“ getroffen werden kann. Es lässt

sich jedoch argumentieren, dass die Ergebnisse auf Pumpen mit ähnlichen Kennlinienfeldern übertragbar sind. Im speziellen Fall der durchgeführten Untersuchung bedeutet dies vor Allem eine ähnliche Form der Isodrehzahllinien der Pumpenkennfelder.

EDA. Zur exemplarischen Anwendung der explorativen Datenanalyse wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt und automatisiert mithilfe von Zeitreihen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse wurden visualisiert, wodurch eine Plausibilisierung möglich war und das Einschwingverhalten identifiziert werden konnte.

Die EDA ist grundsätzlich mit relativ geringem Aufwand möglich und bringt wichtige Erkenntnisse. Da die EDA ein kreativer, formloser Prozess ist, können wichtige Voruntersuchung individuell angepasst werden.

IOV. Die Sensitivitätsanalyse wurde mithilfe der Python Bibliothek SALib durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss der Ablesegenauigkeit der Förderhöhe aus dem Kennlinienfeld zur Erstellung des Pumpenmodells untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Ablesegenauigkeit eines Messwertes zur Erstellung des Polynoms bei der Berechnung der Förderhöhe an Einfluss gewinnt, je näher die zu berechnende Förderhöhe an diesem Messwert liegt.

Hieraus lässt sich eine wichtige Konsequenz zur prinzipiellen Anwendbarkeit der Sensitivitätsanalyse auf ein Komponentenmodell ziehen: Die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse in der hier dargestellten Form sind nur für den speziell betrachteten Fall gültig. Weiterhin lässt sich schließen, dass die Grenzen der Komponentenparameter im Vorfeld bestmöglich, das heißt so realistisch wie möglich definiert werden sollten, damit die Sensitivitätsanalyse einen sinnvollen Beitrag leisten kann.

Beispiel: Wenn der Einfluss verschiedener Parameter eines Rohrmodells auf die Wärmeverluste berechnet wird, so würde der Einfluss der Rohrlänge in den Grenzen 0 bis unendlich (bei Gleichverteilung und endlichen Grenzen der restlichen Parameter) gegen 100 % streben. Dieses Problem kann natürlich behoben werden, indem die Wärmeverluste pro Längeneinheit berechnet werden. Es soll jedoch die Problematik verdeutlichen.

Unter Zuhilfenahme verschiedener Wahrscheinlichkeitsverteilungen lässt sich der Anwendungsbereich der Komponentenparameter noch genauer beschreiben.

Aus technischer Sicht ist eine Sensitivitätsanalyse problemlos anwendbar, wenn das Komponentenmodell automatisiert ausgeführt werden kann und die verwendete Software mit dem Komponentenmodell kompatibel ist.

EOV. Auf Basis von Herstellerangaben wurden manuell Validierungsdaten ermittelt und eine Berechnung der Messunsicherheit nach GUM durchgeführt. Die Ermittlung der Validierungsdaten konnte durch Ablesen des Kennlinienfeldes aus dem Datenblatt erfolgen. Zur Unsicherheitsberechnung durch Ablesen wurde die Typ-B-Methode nach GUM angewandt. Die

Versuchspunkte wurden grafisch gegenübergestellt, wodurch ein qualitativer Unterschied zwischen Simulations- und Validierungsdaten identifiziert werden konnte. Als zusätzliches Maß für die Unterschiede wurde für jeden Drehzahlbereich die Normalized Euclidean Distance ermittelt.

Bei manueller Messwertaufnahme konnte ein technisches Datenblatt als wirkungsvolle Quelle für Validierungsdaten bestätigt werden. Die Berechnung der Messunsicherheit beim Ablesen aus einem Diagramm lässt sich nach der Typ-B-Methode des GUM durchführen. Der grafisch-subjektive Ansatz zum Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten ermöglicht einen guten Eindruck der Unterschiede, wobei die Normalized Euclidean Distance als zusätzliches quantitatives Maß einen wertvollen Beitrag leisten kann.

Die Teilschritte der V&V-Methodik in diesem Abschnitt wurden exemplarisch ausgewählt, um die Anwendbarkeit einzelner Techniken zu prüfen. Obgleich bereits einige Schlussfolgerungen gezogen wurden, ersetzen sie nicht den notwendigen V&V-Prozess, beginnend bei der sorgfältigen Formulierung des formalen Problems, um das Pumpenmodell vollumfänglich zu validieren.

In den verbleibenden Abschnitten dieses Kapitels wird die entwickelte Methodik einer kritischen Bewertung unterzogen und ein Ausblick auf die möglichen nächsten Schritte gegeben.

4.3. Kritische Bewertung der V&V-Methodik

Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits die Anwendbarkeit einiger essenzieller Techniken der operationalen Validierung auf das Komponentenmodell einer Kreiselpumpe überprüft. Die geprüften Techniken stellen jedoch nur einen Bruchteil der entwickelten Methodik dar. Viele Empfehlungen wurden auf Basis von Literaturrecherche und logischer Schlussfolgerungen erarbeitet. Die Wirksamkeit dieser Techniken lässt sich daher erst langfristig durch konsequente Anwendung bewerten. Nachfolgend wird auf ausgewählte Aspekte der entwickelten Methodik näher Bezug genommen.

Bestandskomponenten. Die Darstellung der entwickelten V&V-Methodik behandelt die Neuentwicklung von Komponentenmodellen, von der Problemdefinition bis zum Feldtest. Der Grund für die schrittweise Überprüfung ist die frühzeitige Identifikation von Fehlern. Für Bestandskomponenten existiert bereits ein Simulationsmodell, das direkt mit Techniken der OV gegenüber dem formalen Problem geprüft werden kann. Dadurch kann eventuell auf eine zusätzliche Überprüfung des konzeptuellen Modells verzichtet werden. Die Verifizierung des Quelltextes muss jedoch unabhängig davon durchgeführt werden.

Testumgebung. Die Testumgebung stellt zum Status Quo einen Großteil der am Versuch beteiligten Software dar. Diese Software ist zwar Teil des Tests, aber nicht Ziel der Untersuchung. Im

folgenden Abschnitt 4.4 werden konkrete Hinweise für eine verbesserte Testumgebung gegeben. Sie wird jedoch stets eine Fehlerquelle bei der Durchführung der operationalen Validierung bleiben.

Validierungsdaten. Die Ermittlung von Validierungsdaten muss in den meisten Fällen manuell durchgeführt werden. Das ist zwar für einzelne spezifische Komponenten realisierbar, eine Validierung für alle Parametrierungen ist damit jedoch unrealistisch.

Moderne DoE. Wenn Validierungsdaten automatisch generiert werden können (beispielsweise auf Basis anderer Computermodelle), dann können hierfür ggf. Methoden der modernen DoE genutzt werden. Beim Generieren von Simulationsdaten führt jedoch wiederum die Testumgebung zu starken Einschränkungen. Erstens ist die Wahrscheinlichkeit von Einschwingvorgängen durch die anderen Komponentenmodelle sehr hoch. Dieser Einfluss von Einschwingvorgängen beim Generieren der Simulationsdaten muss unbedingt vermieden werden, was sich jedoch nur schwer automatisiert überprüfen lässt. Eine visuelle Kontrolle ist wiederum nicht mit moderner DoE vereinbar. Zweitens lassen sich während der laufenden Simulation nur Inputparameter variieren, was eine automatisierte Versuchsdurchführung mindestens erheblich verkompliziert. Diese Einschränkungen führen dazu, dass Techniken im Zusammenhang mit moderner DoE derzeit kaum realistisch sind (z.B. Sensitivitätsanalyse). Wenn aber die Probleme rund um die Testumgebung gelöst werden können, bieten die Techniken der modernen DoE großes Potential.

Subjektiver Ansatz. Die entwickelte V&V-Methodik stellt keine Technik zur Verfügung, mit der eine mathematisch eindeutige Aussage über die Validität eines Komponentenmodells getroffen werden kann. Hierfür wäre eine Quantifizierung der zulässigen Abweichung zwischen Simulations- und Validierungsdaten bereits im Rahmen der Problemdefinition notwendig, was für Jarvis nicht unbedingt zielführend wäre, da es sich um ein modulares System für verschiedenste Anwendungsfälle handelt. Ob die Simulationsergebnisse im jeweiligen Fall hinreichend genau der Realität entsprechend, entscheiden die Anwender*innen selbst. Für diese Entscheidung ein möglichst überzeugendes Fundament zu erstellen, war das Ziel der entwickelten Methodik.

Fazit. Derzeit ist die operationale Validierung nur mithilfe klassischer DoE realistisch. Für einzelne Konfigurationen lassen sich Komponentenmodelle dennoch unter vertretbarem Aufwand validieren. Wenn ein Komponentenmodell für einige Konfigurationen gegenüber dem Realsystem getestet wurde, dann kann dies auch zu einem erhöhten Vertrauen gegenüber anderen Konfigurationen führen.

Der Vergleich von Simulations- und Validierungsdaten mag zwar der eindrucksvollste Beleg für die Glaubwürdigkeit eines Komponentenmodells sein, jedoch ist letztendlich der Gesamteindruck entscheidend: Die wohldefinierten Möglichkeiten und Grenzen eines Komponentenmodells durch das formale Problem bieten den Anwender*innen wichtige Anhaltspunkte dafür, ob

es den individuellen Anforderungen entspricht. Durch die detaillierte und transparente Darstellung des erfolgreichen V&V-Prozesses in der Dokumentation wird die strukturierte Arbeitsweise des Entwicklerteams belegt, was ein Grundvertrauen in die entwickelte Software unterstützt.

Die entwickelte V&V-Methodik bleibt nur der erste große Schritt im kontinuierlichen Prozess zur Verifizierung und Validierung der Komponentenmodelle und sollte keinesfalls als ultimativer Leitfaden angesehen werden. Sargent schreibt, dass es aufgrund der Komplexität von Simulationssoftware keine allgemeingültigen Algorithmen zur Festlegung bestimmter V&V-Techniken und Prozeduren gibt [33]. Hierauf bezogen lässt sich zusammenfassen, dass zwar alle Komponentenmodelle eine gewisse Ähnlichkeit aufweisen, jedoch jedes von ihnen eine individuelle Herausforderung darstellt. Die entwickelte V&V-Methodik sollte daher stets mit höchster Konzentration und Weitblick angewandt werden.

4.4. Ausblick auf die nächsten Schritte

Durch die vorangegangenen Analysen konnten bereits kritische Elemente der V&V-Methodik identifiziert werden. Hierauf aufbauend werden in diesem Abschnitt konkrete Schritte vorgestellt, die bei der Anwendung und Weiterentwicklung der entwickelten V&V-Methodik hilfreich sind.

Vorbereitung. Für jedes Komponentenmodell muss eine ausführliche Problemdefinition erfolgen, damit ein formales Problem vorliegt, auf dessen Basis die Verifizierung und Validierung durchgeführt werden kann. Ohne diesen Maßstab können die Komponentenmodelle nicht gezielt getestet werden. Erstens werden Anhaltspunkt benötigt, um die zu testenden Eigenschaften zu erfassen. Zweitens müssen die Grenzen eines Komponentenmodells genau beschrieben werden, damit Anwender*innen im Vorfeld entscheiden können, unter welchen Voraussetzungen die Anwendung möglich ist.

V&V-Prozess. Die entwickelte V&V-Methodik bietet eine umfangreiche Basis zur Prüfung vorhandener und zukünftiger Komponentenmodelle. Die vorgestellten Techniken müssen nun jedoch konsequent in der Praxis angewandt werden. Es ist zu erwarten, dass viele Techniken anfangs ungewohnt und aufwendig erscheinen. Erst durch die wiederholte Anwendung lässt sich das Potential einer Technik vollständig entfalten und die Wirksamkeit langfristig beurteilen.

Testumgebung. Komponentenmodelle können nicht als alleinstehende Simulation ausgeführt werden, weshalb eine Testumgebung für den V&V-Prozess unerlässlich ist. Die Form der Testumgebung aus Abschnitt 4.2 bringt jedoch erhebliche Nachteile mit sich, sodass einer der nächsten Schritte die Entwicklung einer verbesserten Testumgebung sein sollte. Im Rahmen

dieser Arbeit konnten bereits einige Anforderungen identifiziert werden, die von der Testumgebung erfüllt werden sollten. Diese Anforderungen werden mit entsprechender Begründung in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9: Einige Anforderungen an die Testumgebung für Komponentenmodelle

	Anforderung	Begründung
1	Die Testumgebung sollte unabhängig von anderen Komponentenmodellen anwendbar sein.	Zusätzliche Komponentenmodelle führen zu zusätzlichen Fehlerquellen. Dazu zählt das Konzept und der Quelltext des Komponentenmodells selbst, aber auch ihre Parametrierung und das Konzept der Testumgebung.
2	Die Testumgebung sollte unabhängig von der Architektur von Jarvis anwendbar sein.	Hier gilt die gleiche Begründung wie bei den zusätzlichen Komponentenmodellen. Die Architektur von Jarvis beinhaltet teils sehr komplexe Zusammenhänge mit hohem Fehlerpotential, die ebenfalls von der Untersuchung des Komponentenmodells ausgeschlossen werden sollten.
3	Einschwingvorgänge der Simulationsergebnisse sollten vermieden werden.	Einschwingvorgänge verzögern die Messung der Versuchspunkte und bringen ein zusätzliches Fehlerpotential mit sich. Eine zuverlässige automatisierte Überprüfung des Einschwingverhaltens ist sehr schwierig. Visuelle Kontrollen sind eine sicherere Lösung, womit moderne Versuchspläne von mehreren tausend Versuchspunkten jedoch nicht realistisch durchführbar sind.

Fortsetzung nächste Seite . . .

Tabelle 4.9: (fortgesetzt)

	Anforderung	Begründung
4	Falls Einschwingvorgänge nicht vermieden werden können, so sollten sie kompensiert werden können.	Als Einschwingvorgang kann auch die verzögerte Wirkung auf eine Änderung der Eintrittsgrößen interpretiert werden. Dies kann beispielsweise bei der Untersuchung eines Rohrmodells auftreten. Die Auswirkung einer Temperaturänderung am Eintritt zeigt sich erst verzögert am Austritt. Da alle Parameter bekannt sind, kann jedoch die Zeitdifferenz berechnet und durch eine verzögerte Messwertaufnahme am Austritt kompensiert werden.
5	Die Existenz von Einschwingvorgängen sollte überprüfbar sein.	Da Einschwingvorgänge eine erhebliche Fehlerquelle darstellen und nicht immer vermieden werden können, sollte es die Option einer stichprobenartigen, automatisierten Kontrollfunktion geben.
6	Versuchspläne können oft durch bereits vorhandene Software erstellt werden. Die Versuchsumgebung sollte automatisiert mit dieser Software kompatibel sein.	Die gängige Form der tabellarischen Darstellung von Versuchsplänen wird auch von Software wie DOEPy (siehe Beispiel in Anhang A) verwendet. Jede Zeile repräsentiert einen Versuchspunkt, jede Spalte eine Einflussgröße (Parameter des Komponentenmodells). Durch die Kompatibilität der Versuchsumgebung mit vorhandener Software kann diese direkt verwendet werden oder die Ergebnisse selbst erstellter Software damit verglichen werden.
7	Die Testumgebung sollte mit bereits vorhandener Software für Sensitivitätsanalysen kompatibel sein.	Hier gilt die gleiche Begründung wie für Punkt 6. Die in dieser Arbeit verwendete Software SALib stellt dabei nur eine Möglichkeit dar. Im Rahmen der Problemdefinition für die Versuchsumgebung sollte weitere Software zur Sensitivitätsanalyse in Betracht gezogen werden.

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 4.9: (fortgesetzt)

	Anforderung	Begründung
8	Die Ergebnismatrix sollte in geeigneten Diagrammen visualisiert werden können.	Im Rahmen der EDA sollten die Simulationsergebnisse in geeigneten Diagrammen visuell plausibilisiert werden können (siehe Abbildung 4.13).
9	Die Ergebnismatrix der Simulationsdaten sollte mit einer Ergebnismatrix von Validierungsdaten verglichen werden können.	Im Rahmen der EOv werden die Simulationsergebnisse mit Validierungsdaten verglichen. Die Darstellungsform sollte entsprechend Abbildung 4.17 möglich sein.

Die Anforderungen an die Testumgebung aus Tabelle 4.9 sind als Anhaltspunkte zu verstehen. Sie sollten im Rahmen einer gründlichen Problemdefinition vervollständigt und überprüft werden.

Validierungsdaten. Validierungsdaten bilden die Grundlage der objektivsten und damit eindrucksvollsten V&V-Techniken. Zur Datenerhebung wurde jedoch kein detaillierter Prozess erarbeitet. Prozesse zur Datenerhebung, -verifizierung und -validierung müssen während des V&V-Prozesses erarbeitet, dokumentiert und weiterentwickelt werden.

Zusammenschlüsse. Die Validität der Komponentenmodelle führt nicht automatisch zu einem validen Zusammenschluss aus mehreren Komponentenmodellen, denn „[...] die Summe korrekter Einzelentscheidungen muss nicht zwangsläufig zu einem korrekten Simulator führen“ [36]. Ursachen hierfür kann beispielsweise die vielfache Verwendung eines leicht fehlerhaften Komponentenmodells innerhalb eines Zusammenschlusses sein, was aufsummiert zu einem großen Fehler führt. Auch eine fehlerhafte Parametrierung und unzulässige Annahmen bei der Entwicklung des Zusammenschlusses können zu invaliden Simulationsergebnissen führen. Ein zukünftiger Schritt sollte daher die Validierung von Zusammenschlüssen sein, um die Anwendbarkeit und Wirksamkeit von Jarvis als Wärmenetzsimulationsbaukasten zu überprüfen.

Stochastik. Ein großer Teil der Literatur zur V&V setzt stochastische Simulationsmodelle voraus. Stochastische Simulationen sind in technischen Bereichen zwar nicht sehr weit verbreitet, da Ursache und Wirkung meist gut erforscht sind. Im speziellen Fall von Jarvis wäre eine Anwendung jedoch im Rahmen der Parameterauswahl denkbar. Wenn Anwender*innen die Möglichkeit hätten, bei der Angabe von Parametern zusätzlich die Unsicherheit der Angabe zu quantifizieren, dann könnte der Einfluss der Unsicherheit auf das Ergebnis der Simulation berechnet werden. Techniken zur Validierung solcher Simulationen sind zwar verfügbar, jedoch wird die Komplexität dadurch deutlich erhöht.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Verifizierung und Validierung der Komponentenmodelle von Jarvis entwickelt. Das Fundament der Arbeit bildet eine ausführliche Literaturrecherche auf dem Gebiet der V&V. Ein Ergebnis der Recherche sind zwei aktuelle Studien, aus denen ein Modellbildungsprozess herausgearbeitet wurde, der die Rahmenbedingungen des V&V-Prozesses definiert. Weiterhin wurden bewährte sowie innovative V&V-Techniken herausgearbeitet und zur Anwendung in der entwickelten Methodik modifiziert.

Der erste Schritt des Modellbildungsprozesses ist die Problemdefinition eines Komponentenmodells. Da die Problemdefinition den Grundstein des V&V-Prozesses legt, wurde sie in Form eines Leitfadens in die entwickelte Methodik aufgenommen. Unter Einbezug gegenwärtiger und zukünftiger Szenarien werden hierin die Anforderungen an ein Komponentenmodell definiert. Mithilfe einer Checkliste von acht Indikatoren wird als erster eigentlicher V&V-Schritt das Ergebnis der Problemdefinition überprüft.

Hierauf aufbauend findet im Modellbildungsprozess die konzeptuelle Modellierung statt, worin Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden, um die komplexen realen Systeme unter vertretbarem Aufwand abzubilden. In der entwickelten Methodik werden Techniken bereitgestellt, mit denen das konzeptuelle Modell validiert werden kann. Hierbei wird unterschieden, ob in der Entwicklung eigene Annahmen oder bereits validierte Konzepte verwendet werden.

Nachdem das konzeptuelle Modell validiert ist, wird es in Quelltext überführt. Zur Verifizierung des Quelltextes werden in der entwickelten Methodik sechs Techniken identifiziert und eine Empfehlung für die jeweiligen Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Sobald das Komponentenmodell als Quelltext vorliegt, kann es innerhalb der Simulationsumgebung Jarvis ausgeführt werden. Dies bietet grundsätzlich neue Möglichkeiten zur Validierung, die unter dem Begriff der Operationalen Validierung zusammengefasst werden. In dieser Methodik wurde die Operationale Validierung in drei Teilbereiche unterteilt: (1) Die Explorative Datenanalyse ermöglicht auf Basis eines kreativen Prozesses einen ersten Eindruck der Simulationsergebnisse. (2) In der Internen Operationalen Validierung können die Komponentenmodelle mithilfe einer Sensitivitätsanalyse auf Stabilität überprüft und hinsichtlich interessanter Eigenschaften untersucht werden. (3) Im Rahmen der Externen Operationalen Validierung wird das Komponentenmodell schließlich mit Validierungsdaten verglichen.

Die entwickelte V&V-Methodik schließt neben den eigentlichen V&V-Prozessen noch die Dokumentation und die Datenqualität ein, welche für die erfolgreiche Validierung der Komponentenmodelle relevant sind. Im Anschluss an die Dokumentation des V&V-Prozesses, dient ein kontinuierlicher Feldtest der ständigen Verbesserung der Komponentenmodelle und der V&V-Methodik.

Ausgewählte Techniken der entwickelten Methodik werden zur Überprüfung der Anwendbarkeit am Beispiel einer Pumpenkomponente getestet und bewertet. Hierbei konnte die Wirksamkeit einiger Techniken bestätigt, aber auch Einschränkungen durch die Architektur der Simulationsumgebung identifiziert werden. Aus den identifizierten Problemen werden konkrete Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Simulationsplattform Jarvis abgeleitet. Diese werden in einem Ausblick auf die nächsten Schritte auf dem Weg zu einer vertrauenswürdigen Simulationsumgebung zusammenfassend dargestellt.

Quellenangaben

- [1] Mario Adam. *Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments)*. Hochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2. Okt. 2017.
- [2] Anhang Daten-CD. *pump_characteristics.xlsx*. 2021.
- [3] Jiju Antony. *Design of experiments for engineers and scientists*. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN: 9780080994178.
- [4] Osman Balci und Richard E. Nance. "Formulated problem verification as an explicit requirement of model credibility". In: *SIMULATION* 45.2 (Aug. 1985), S. 76–86. DOI: 10.1177/003754978504500204.
- [5] Osman Balci und Robert G. Sargent. "Validation of Simulation Models via Simultaneous Confidence Intervals". In: *American Journal of Mathematical and Management Sciences* 4.3-4 (Feb. 1984), S. 375–406. DOI: 10.1080/01966324.1984.10737151.
- [6] James Bellinger. *Structured Walkthroughs by Edward Yourdon*. 2021. URL: https://pages.hep.wisc.edu/~jnb/structured_walkthroughs.html.
- [7] Bureau International des Poids et Mesures. *The role and objectives of the BIPM*. 2021. URL: <https://www.bipm.org/en/about-us/role.html>.
- [8] Bureau International des Poids et Mesures and Commission électrotechnique internationale and Organisation internationale de normalisation. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. International Organization for Standardization, 1993.
- [9] S. W. Doebling u. a. "A metamodel-based approach to model validation for nonlinear finite element simulations". In: *IMAC XX, Los Angeles, CA* (4.–7. Feb. 2002).
- [10] Michael Eisermann. *Höhere Mathematik 3 (vertieft): Der zentrale Grenzwertsatz*. 21. März 2020.
- [11] Malte Fuhrmann. *Smart Heat Grid Hamburg: Modellierung des Umbaus des Energiebunkers in Hamburg-Wilhelmsburg*. Masterprojekt. Center for Demand Side Integration, 31. Jan. 2020.
- [12] Luca Gazzola. "Field Testing of Software Applications". In: *2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE-C)* (Mai 2017).
- [13] Soong Oh Han. "Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse als Beitrag zur Bewertung der Zuverlässigkeit adaptiver Struktursysteme". Diss. Darmstadt: Technische Universität, Mai 2011.
- [14] Charles R. Harris u. a. "Array programming with NumPy". In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

- [15] Per Heiselberg u. a. "Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings". In: *Renewable Energy* 34.9 (2009). Special Issue: Building and Urban Sustainability, S. 2030–2036. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000640>.
- [16] Jon Herman, Will Usher u. a. *Sensitivity Analysis Library in Python*. 2019. URL: <https://github.com/SALib/SALib>.
- [17] Jon Herman, Will Usher u. a. *Source code for SALib.analyze.sobol*. 2019. URL: https://salib.readthedocs.io/en/latest/_modules/SALib/analyze/sobol.html.
- [18] Jon Herman, Will Usher u. a. *Source code for SALib.sample.saltelli*. 2019. URL: https://salib.readthedocs.io/en/latest/_modules/SALib/sample/saltelli.html.
- [19] Jack P. C. Kleijnen. *Design and Analysis of Simulation Experiments*. Springer-Verlag GmbH, 1. Juli 2015. ISBN: 3-319-18087-8. URL: https://www.ebook.de/de/product/25041641/jack_p_c_kleijnen_design_and_analysis_of_simulation_experiments.html.
- [20] Franz Liebl. *Simulation*. De Gruyter Oldenbourg, 17. Mai 1995. 292 S. ISBN: 3-486-23373-4. URL: https://www.ebook.de/de/product/1375322/franz_liebl_simulation.html.
- [21] Jan Lunze. *Regelungstechnik 1*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-52678-1.
- [22] Kathryn Maupin und Laura Painton Swiler. *Validation Metrics for Deterministic and Probabilistic Data*. Techn. Ber. 1. Feb. 2017. DOI: 10.2172/1494178.
- [23] Modeling and Simulation Enterprise. *Data Verification and Validation for New Simulations*. 15. Sep. 2006. URL: https://vva.msco.mil/Special_Topics/DataVV-New/DataVV-New-pr.pdf.
- [24] Modeling and Simulation Enterprise. *V&V Technique Taxonomy*. 15. Aug. 2001. URL: https://vva.msco.mil/default.htm?Ref_Docs/VVTechniques/default.htm.
- [25] Modeling and Simulation Enterprise. *VV&A Recommended Practices Guide Glossary*. 15. Okt. 2001. URL: <https://vva.msco.mil/Glossary/Glossary-pr.pdf>.
- [26] Katherine L. Morse u. a. *Best Practices for Development of Models and Simulations - Final Report*. Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory, 1. Juni 2010.
- [27] National Institute of Standards and Technology. *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*. 1. Dez. 2017. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/international1.html>.
- [28] William L. Oberkampf und Christopher J. Roy. *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2010. DOI: 10.1017/cbo9780511760396.

- [29] Bernd Page. *Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula-2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. ISBN: 978-3-642-76862-0.
- [30] Dan Pilone. *Softwareentwicklung von Kopf bis Fuss*. Köln: O'Reilly, 2008. ISBN: 978-3-89721-862-8.
- [31] Andrea Saltelli. *Global Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, 4. Feb. 2008. 306 S. ISBN: 978-0-470-05997-4. URL: https://www.ebook.de/de/product/6821380/saltelli_global_sensitivity_analysis.html.
- [32] Andrea Saltelli u. a. *Sensitivity Analysis in Practice*. John Wiley & Sons, 24. März 2004. 232 S. ISBN: 0-470-87093-1. URL: https://www.ebook.de/de/product/3615998/saltelli_campolongo_ratto_sensitivity_analysis_in_practice.html.
- [33] Robert G. Sargent. "Verification and validation of simulation models". In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. IEEE, Dez. 2010. DOI: 10.1109/wsc.2010.5679166.
- [34] Robert G. Sargent, David M. Goldsman und Tony Yaacoub. "Use of the interval statistical procedure for simulation model validation". In: *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, Dez. 2015. DOI: 10.1109/wsc.2015.7408153.
- [35] Tirthajyoti Sarkar. *Design of Experiment Generator in Python*. 2020. URL: <https://github.com/tirthajyoti/doepy>.
- [36] Thomas Sauerbier. *Theorie und Praxis von Simulationssystemen - Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1999. ISBN: 978-3-322-90773-8.
- [37] Wei Tian. "A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013), S. 411–419. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112007101>.
- [38] A. A. van der Meer u. a. "Design of experiments aided holistic testing of cyber-physical energy systems". In: *2018 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*. 2018, S. 1–7. DOI: 10.1109/MSCPES.2018.8405401.
- [39] WILO SE. *Datenblatt Wilo Stratos 50 1-12*. 8. Aug. 2019.
- [40] Heather Wojton u. a. *Handbook on Statistical Design & Analysis Techniques for Modeling & Simulation Validation*. Forschungsber. Institute for Defense Analysis, Feb. 2019.
- [41] Song Yang u. a. "Comparison of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Assessment". In: *Procedia Engineering* 146 (2016). The 8th international cold climate HVAC Conference, S. 174–181. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.369>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816308244>.

A. Beispiel für die Anwendung von DOEPy

Mit DOEPy können verschiedene Versuchspläne sehr einfach realisiert werden. DOEPy wurde im Rahmen dieser Arbeit beispielsweise für die exemplarischen Versuchspläne in Abschnitt 2.3 und Abschnitt 4.2 verwendet. Zur Demonstration der Anwendung ist der Quelltext für den Versuchsplan aus Abschnitt 4.2 in Quelltext 3 dargestellt.

Quelltext 3: Prinzipielle Funktionsweise des Ersatzmodells für die Pumpenkomponente

```

1  from doepy import build
2
3  # Parameter
4  volFlow_Vector = [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30]
5  rotSpeed_Vector = [1400, 1857, 2314, 2771, 3229, 3686]
6
7  # Design of Experiment
8  DoE = build.full_fact(
9      {
10         'volFlow': volFlow_Vector,
11         'rotSpeed': rotSpeed_Vector
12     }
13 )

```

In Zeile 4 und 5 werden die Parameter benannt und ihre Stufen definiert. In Zeile 8 wird der vollfaktorielle Versuchsplan erstellt. Das Ergebnis der Ausgabe ist ein {Dataframe: (42,2)}, der in abgekürzter Form in Tabelle A.1 dargestellt ist.

Tabelle A.1: Abgekürzte Darstellung des Versuchsplans durch DOEPy zur Demonstration der Ausgabeform

Versuchs- punkt	volFlow	rotSpeed
0	0.0	1400
1	5.0	1400
⋮	⋮	⋮
6	30.0	1400
7	0.0	1857
8	5.0	1857
⋮	⋮	⋮
13	30.0	1857
⋮	⋮	⋮
41	30	3686

Wenn DOEPy für die Erstellung von Versuchsplänen in der Testumgebung (Abschnitt 4.4) ver-

wendet werden soll, so sollte ein Versuchsplan in dieser Form eingelesen und vom Komponentenmodell durchgeführt werden können.

B. Indikatoren zur Messung der Wahrscheinlichkeit einen Typ-3-Fehler zu begehen

1. People personalize problems.

The root problems may be hidden by people who see them as personal failings. People may tend to distort information indicating the existence of a problem in order to protect their positions and pride or become defensive at the suggestion that a problem exists.

2. Information showing that a problem exists is not revealed.

Subordinates may hide information to keep their manager(s) happy or to avoid political disputes.

3. The problem context is too complex for the analyst to comprehend.

This indicator often occurs when the analyst is an external consultant or unfamiliar with the problem context. Under binding time pressure an analyst might forego the necessary time for distinguishing among causes and symptoms and treat the definition superficially.

4. Root problems arise in contexts with which people have had no experience. Root problems cannot be identified correctly when they occur under conditions that are unfamiliar to people. Due to the lack of experience, individuals may not even recognize the existence of a problem.

5. Cause and effect are not closely related within the problem context.

Determining the interactions present in Figure 3³ may not be easy; the problem context may be counterintuitive. Problems and their root causes may not be closely related in time or space. Problem recognition may surface long after the emergence of the primary root causes.

6. The analyst cannot distinguish between facts and opinions.

During the processes of observing, interviewing, analyzing, participating and examining documentations, the analyst may accept opinions as facts rather than only personal views. The analyst may also be biased by his/her own opinions and experience, leading to incorrect inferences or hasty conclusions.

³Figure 3 zeigt die kausalen Zusammenhänge eines Problems. Daraus resultieren die Grundursachen und die darauf „aufbauenden“ Ursachen

7. The analyst may be misguided deliberately or accidentally.

People may misguide the analyst believing the solution of the problem is not to their benefit. Inaccurate or incomplete knowledge can cause people accidentally to mislead the analyst.

8. The level of extraction of problem context is insufficiently detailed.

An artful balance is required in extracting the proper level of description of the problem context in formulating the problem. Extraction of unimportant elements may create unnecessary complications; while exclusion of a crucial element may hide a significant root problem.

9. The problem boundary is insufficient to include the entire problem.

An important root problem may be ignored through the analyst's inappropriate definition of problem boundary.

10. Inadequate standards or definition of desired conditions exist.

A root problem may not be identified when the deviation cannot be perceived due to inadequate documentation or inaccurate understanding of standards or the desired set of conditions.

11. The root causes are time dependent.

At the time the analyst is formulating the problem, the root causes may not be observable due to time dependencies.

12. A root cause is masked by the emphasis on another.

A root problem may be overemphasized because of political disputes, personal conflicts, conflicts of interests, etc. The analyst's attention may thus be diverted from a more significant problem.

13. Invalid information is used.

A root problem may not be identified because of incorrect inferences made from invalid information.

14. Invalid data is used.

Incorrect derivations, transformations, and conclusions can be caused by invalid data, which may also cause a root problem to be ignored.

15. Assumptions may conceal root causes.

Root causes may be hidden by assumptions, especially those justifying approximations and simplifications.

16. People suspicious of change may show resistance.

Strong resistance may come from individuals who oppose any changes or who perceive no benefit in solving the problem. Determined actions by such people complicate the identification of root causes.

17. The problem is formulated under the influence of a solution technique.

The problem formulation may be influenced by a solution technique familiar to the analyst, creating gross approximations resulting in a formulated problem somewhat removed from the real one. For example, under the influence of linear programming, a problem may be formulated by approximating all the constraints and the objective function as linear; while the nonlinear characteristics of some constraints may be crucial for solving the actual problem.

18. The real objectives are hidden accidentally, unconsciously, or deliberately.

The formulated problem may deviate substantially from the actual problem, if the real objectives are incorrectly identified. Different objectives result in different problem formulations.

19. Root causes arise in other unidentified systems, frameworks or structures.

The definition of the problem context may be too narrow. No matter how detailed the analysis of the problem context, root causes may not be recognized if their effects arise beyond the defined problem boundary.

20. The formulated problem is out of date.

The time interval between the problem formulation and the solution presentation may be several months or even years. Over such an extended period the problem context and objectives can change. Failure to incorporate these changes and revise the formulated problem accordingly may result in a solution to a past problem that is no longer applicable.

C. Modellbildungsprozess nach Page et al.

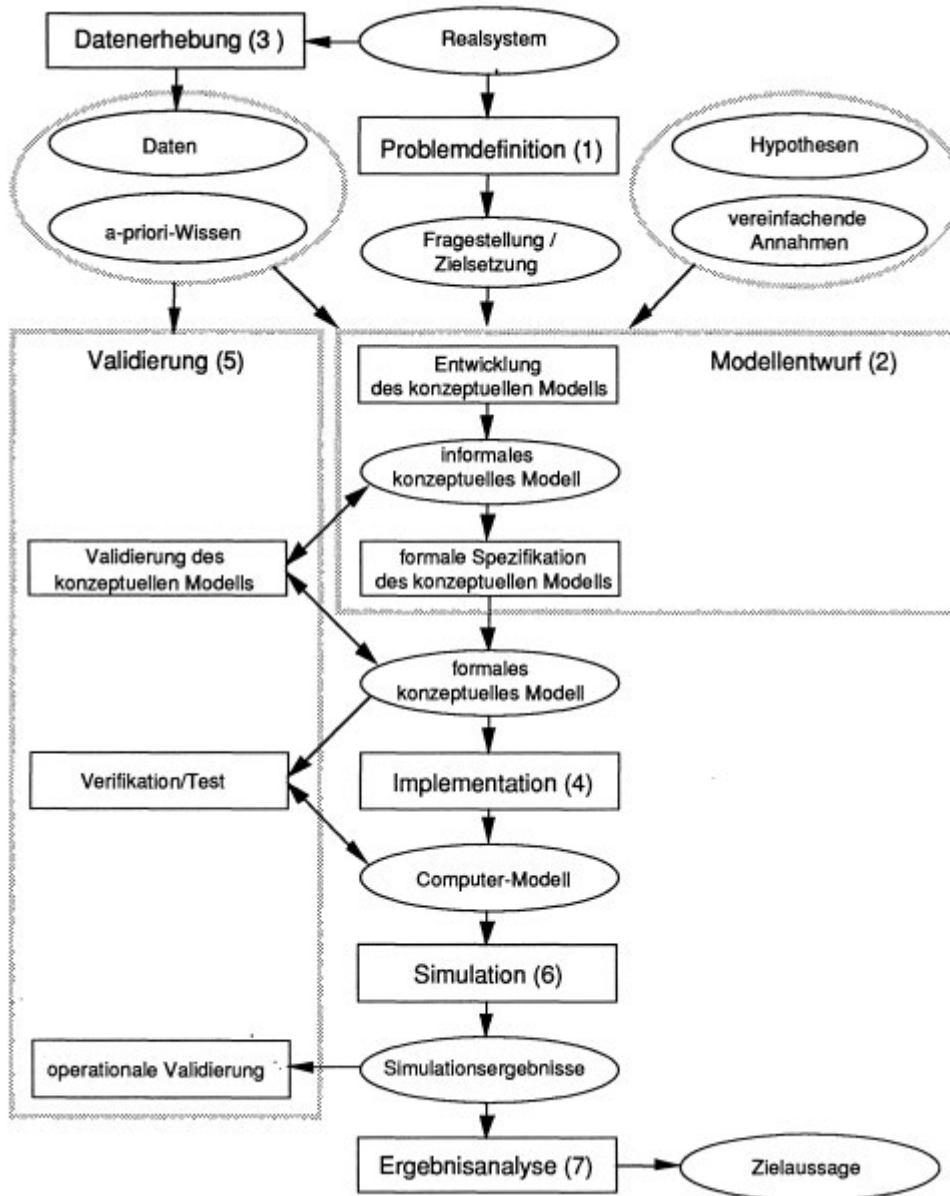


Abbildung C.1: Modellbildungsprozess von Page et al. [29]



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Fuhrmann

Vorname: Malte

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung einer Methodik zur Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware Jarvis

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

28.03.2021

Datum



Unterschrift im Original