

Schneller zum Ziel - Design, Implementierung und Evaluation eines neuen Ansatzes für die effiziente Materialflusssimulation

Getting there faster - Design, implementation and evaluation of a new approach for efficient material flow simulation

Svenja Bahnsen
Johannes Hinckeldeyn
Jochen Kreuzfeldt

Institut für Technische Logistik
Technische Universität Hamburg

Simulation ist ein etabliertes und unverzichtbares Mittel zur Unterstützung in der industriellen Planung von logistischen Systemen. Aufgrund des zunehmenden Automatisierungsgrades und der Dynamisierung der Kundenprozesse steigt die Komplexität dieser Systeme und es besteht ein erhöhter Bedarf nach Simulationsstudien. Dem gegenüber steht, dass die Durchführung von Simulationen zeitaufwändig und somit kostenintensiv ist. Dadurch werden in der Planungsphase weniger Systeme simuliert als technisch sinnvoll wäre. Um die Anzahl durchgeführter Simulationsprojekte im industriellen Umfeld zu erhöhen, muss daher der zeitliche Aufwand pro Projekt reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Schwächen und Verbesserungspotentiale der heute eingesetzten Simulationsmethoden und -tools aufgedeckt und Anforderungen an zukünftige Entwicklungen abgeleitet. Darauf aufbauend wurde ein neuer Simulationsansatz entwickelt und in einem Softwareprototypen realisiert. Ein erster Vergleich mit etablierten Softwaretools zeigt eine deutliche Verringerung des Simulationsaufwands bei Nutzung des Softwareprototypen.

[Schlüsselwörter: Simulation, Materialflusstechnik, Dimensionierung, Planung]

Simulation is an established and indispensable supporting tool in industrial logistics planning. Increasing automation and dynamization of customer processes results in increasing complexity of these systems and additional needs for simulation studies. In contrast to this, simulation is highly time consuming and therefore expensive. As a result, fewer systems than reasonable are simulated during the planning phase. Therefore, the aim of this work is to derive requirements for material flow simulation allowing its improvement and increasing the number of performed simulation studies in the industrial environment. For this purpose, weaknesses and possi-

ble improvements of currently used simulation methods and tools were collected and requirements for future developments were derived. Based on this, a new simulation approach was developed and implemented in a software prototype. A first comparison with established tools shows a reduction in the simulation effort when using the software prototype.

[Keywords: Simulation, material flow, dimensioning, planning]

1 EINLEITUNG

Simulation ist ein etabliertes Hilfsmittel zur Untersuchung des Systemverhaltens in der industriellen Planung von Materialflusssystemen. Durch die komplexer werdenden Logistik- und Produktionssysteme gewinnt sie dabei kontinuierlich an Bedeutung und führt zusätzlich zu abgesicherten Planungsergebnissen [Gut17]. Unter Simulation versteht dabei man das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI14, S. 3]. Gründe für die Nutzung von Simulationen sind (in Anlehnung an [Bos04]):

- Das Realsystem existiert oft noch nicht.
- Eine Untersuchung des Systemverhaltens ist ohne Risiken für das Realsystem möglich.
- Störungen und Spitzenlasten können im Realsystem nicht beliebig abgebildet werden.
- Die Beobachtungsdauer kann im Vergleich zur real ablaufenden Zeit verkürzt werden.

In der Anlagenplanung wird die Simulation meist als Strukturierungshilfe oder zur Funktionserprobung eingesetzt. Dabei werden zum Beispiel [VDI14]

- Untersuchungen von Ablauflogiken oder Durchsätzen von in der Planung befindlichen Anlagen durchgeführt,
- Systemgrenzen wie Pufferkapazitäten oder Produktionsmengen ermittelt,
- Systemanpassungen, wie z. B. Produktionspläne untersucht
- oder Steuerungssoftware erprobt.

Da Simulationsprojekte zeitaufwändig sind und Expertenwissen benötigen, sind sie im industriellen Umfeld mit hohen Kosten verbunden. Aus diesem Grund wird häufig auf die Durchführung einer Simulation im Rahmen der Anlagenplanung verzichtet und das Risiko für nachträgliche Änderungskosten in Kauf genommen. Dies gilt insbesondere während der Auftragsakquisition, wenn es noch unsicher ist, ob die Erstellung der Anlage tatsächlich beauftragt werden wird. In diesem Beitrag werden daher die Ursachen für den Simulationsaufwand untersucht und ein Konzept zu dessen Reduktion entwickelt.

2 GRUNDLAGEN DER SIMULATION

Die Simulation basiert auf der Abbildung eines Systems in einem Modell. Modell bedeutet hier die „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. [...] Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ [VDI14, S. 3]. Ein Modell kann dabei durch die folgenden Eigenschaften charakterisiert werden:

- **Modellzweck:** Die Motivation für ein Simulationsmodell kann in der Beschreibung, Erklärung, Klassifikation, Theoriebildung, Prognose, Bewertung, Optimierung, Vermittlung und Demonstration liegen. [Sch08]
- **Abstraktionsgrad:** Zur Verringerung der Komplexität bei der Modellerstellung kann ein vereinfachtes Modell, das für den Untersuchungszweck irrelevante Details vernachlässigt, erstellt werden. Im Kontrast dazu stehen maßstabsgetreue Modelle, die jedes Detail des realen Systems enthalten. [Gut17]
- **Informationsart:** Modelle mit einem Fokus auf der mathematischen Beschreibung der Systemzusammenhänge werden quantitativ genannt. Daneben enthalten qualitative Modelle auch oder ausschließlich verbale Problembeschreibungen. [Sch08]

Die Art der Überführung eines realen Systems und seiner Bestandteile in ein Modell wird durch ein zugrun-

deliegendes Modellierungskonzept bestimmt. Diese können theoretischer oder anwendungsbezogener Natur sein [Wen18]. Analytische Modelle basieren beispielsweise auf theoretischen Modellierungskonzepten und beschreiben einen kompletten Lösungsraum für ein Problem, z. B. Differentialgleichungen [Gut17]. Da allerdings die analytische Lösung eines Problems sehr schwer zu ermitteln oder gar nicht existent sein kann, kommt in diesen Fällen die Simulation zum Einsatz [Bor04].

2.1 SIMULATIONSMETHODEN

Zur Simulation dynamischer Systeme stehen dabei heute eine Vielzahl an Simulationsmethoden und eine größere Anzahl darauf aufbauender Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Im Folgenden werden zunächst die Simulationsmethoden ereignisorientierte, kontinuierliche, hybride und agentenbasierte Simulation beschrieben. Diese stellen die am weitesten verbreiteten Simulationsmethoden dar.

2.1.1 EREIGNISORIENTIERTE SIMULATION

Bei der ereignisorientierten Simulation werden die Systemzustände bei jeder Zustandsänderung (Ereignis) erfasst. Der zeitliche Abstand dieser Änderungen ist in der Regel nicht äquidistant, vgl. Abb. 1. Aktivitäten und Prozesse ergänzen die Ereignisse als systemcharakterisierende Größen in der ereignisorientierten Simulation. Aktivitäten beschreiben eine Zeitspanne zwischen einem Start- und Endereignis während der sich der Zustand einer Systemvariablen ändert. Prozesse beschreiben fest definierte Abfolgen von Ereignissen. [Wen18]

Für die ereignisorientierte Simulation eingesetzte Modellierungskonzepte sind zum Beispiel [Wen18]:

- **Sprachkonzepte:** Mithilfe von Standardprogrammiersprachen oder domänenspezifischen Simulationssprachen werden ganze Simulationsmodelle entwickelt. Vorteilhaft ist hierbei die Möglichkeit Systeme sehr flexibel abbilden zu können.
- **Generische Konzepte:** Anpassbare, wiederverwendbare und anwendungsneutrale Modellbestandteile haben Grundfähigkeiten und werden in der Modellierung durch die Zuweisung von Attributen charakterisiert.
- **Theoretische bzw. mathematische Konzepte:** Modelle werden durch formale mathematische Zusammenhänge dargestellt. Beispiele sind Warteschlangennetze oder automatentheoretische Konzepte.

In den Simulationswerkzeugen (vgl. Abschnitt 2.3) werden häufig auch Kombinationen der Konzepte eingesetzt [Wen18].

In der Intralogistikplanung wird am häufigsten die ereignisorientierte Simulation durchgeführt [Wen18]. Diese erlaubt eine hinreichend genaue Modellierung, um die in den Systemen vorliegende Dynamik abzubilden. Weitere Informationen zur ereignisdiskreten Simulation finden sich in [Law15] und [Ban98].

2.1.2 KONTINUIERLICHE SIMULATION

Die kontinuierliche Simulation ist durch eine abstrahierte, aggregierte Sichtweise gekennzeichnet [Bor04]. Dabei werden nicht einzelne Ereignisse betrachtet, sondern kontinuierlich alle Systemzustände bestimmt. Häufig kommen hierfür Differentialgleichungen zum Einsatz. Diese können analytisch oder numerisch gelöst werden. [Law15]

In der System Dynamics, welche den bekanntesten Vertreter der kontinuierlichen Simulation darstellt, werden als zentrale Elemente Bestand, Fluss und Rückkopplung zur Modellierung verwendet. Der Bestand stellt variable Systemgrößen dar, der Fluss beschreibt die Änderungsrate eines Bestands und Rückkopplungen bewirken Änderungen des Systemverhaltens basierend auf bereits eingetretenen Verhalten. [For61]

Ein typisches Anwendungsgebiet für kontinuierliche Simulationen stellt die Strömungssimulation dar. Weitere Informationen zur kontinuierlichen Simulation finden sich in [Ste00], [For61], [Dom05], [Cam11] und [Law15].

2.1.3 HYBRIDE SIMULATION

Die Kombination aus ereignisorientierter und kontinuierlicher Simulation wird als hybride Simulation bezeichnet. Dabei werden die Modelle aus Objekten, globalen Variablen und Zustandsvariablen aufgebaut. Objektattribute und globale Variablen werden ereignisorientiert ausgewertet und die Zustandsvariablen werden im Abstand kleiner Zeitschritte also nahezu kontinuierlich bestimmt. [Pri98]

Die hybride Simulation wird vor Allem angewandt, wenn das abzubildende System sowohl kontinuierliche als auch ereignisdiskrete Eigenschaften aufweist. Weitere Informationen zur hybriden Simulation finden sich in [Law15] und [Pri98].

2.1.4 AGENTENBASIERTE SIMULATION

Eine Variation der ereignisorientierten Simulation stellt die agentenbasierte Simulation dar [Law15]. Charakteristisch für diese Simulationsmethode sind autonom handelnde, lernfähige Agenten, Interaktionen und die simulierte Umwelt [Law15]. Interaktionen können zwischen Agenten oder mit der Umwelt stattfinden [Klu12]. Die simulierte Umwelt enthält Objekte ohne eigene Interaktionen oder andere Umwelteigenschaften [Klu12]. Eingesetzt wird die agentenbasierte Simulationsmethode,

wenn Systeme aus interagierenden, lernfähigen Objekten bestehen, deren Verhalten situationsabhängig und anpassbar sein soll. Oft wird die agentenbasierte Simulationsmethode im Bereich der Supply Chain Simulation verwendet.

2.1.5 VERGLEICH DER SIMULATIONSMETHODEN

In Abb. 1 sind die resultierenden, simulierten Systemzustände unter Anwendung der verschiedenen Simulationsmethoden am Beispiel einer zeitabhängigen Systemvariablen dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass Zustandsänderungen außer bei der numerisch gelösten (diskret ausgewerteten) kontinuierlichen Simulation unmittelbar bei ihrem Eintreten erfasst werden. Zusätzlich wird erkennbar, dass bei der diskret ausgewerteten kontinuierlichen Simulation der Simulationsaufwand von der gewählten Größe des Zeitschritts für die Auswertung abhängt. Je größer dieser Zeitschritt ist, desto geringer wird der Aufwand, allerdings sinkt damit die Häufigkeit der Auswertung und somit auch die zeitliche Genauigkeit der Simulationsergebnisse.

Neben den genannten Auswahlkriterien für eine geeignete Simulationsmethode stellt auch der mögliche oder angestrebte Abstraktionsgrad eine Randbedingung dar. Die kontinuierliche Simulationsmethode eignet sich vor allem für Modelle, die eine starke Aggregation und hohe Abstraktion erlauben. Wohingegen die ereignisdiskrete Simulation besonders für detailgetreue Abbildungen mit wenig Abstraktion geeignet ist. Für Produktion und Intralogistik liegt der Abstraktionsgrad im Bereich der schwachen Abstraktion, mit individuellen Objekten und vielen Details [Bor04]. Daher wird, wie bereits in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, ereignisorientierte Simulation in der Intralogistikplanung eingesetzt.

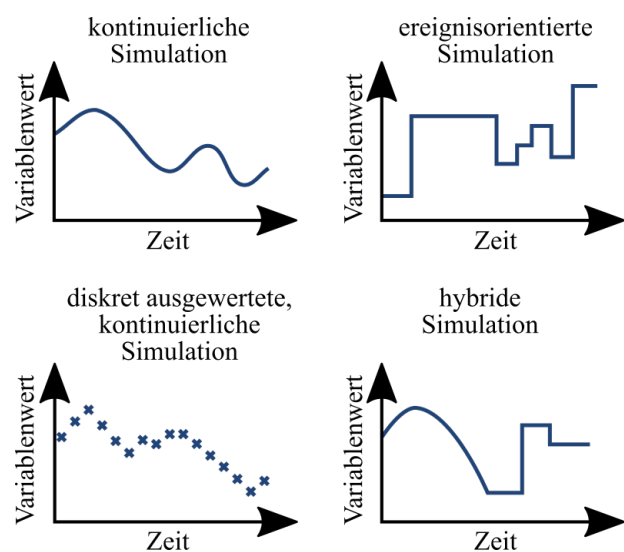


Abb. 1: Vergleich der ermittelten Systemzustände verschiedener Simulationsmethoden in Abhängigkeit von der Zeit (in Anlehnung an [Wen18, S. 11]).

2.2 VORGEHEN IN EINEM SIMULATIONSPROJEKT

Wird die Simulationsstudie als unterstützendes Hilfsmittel in einem Logistikplanungsprojekt gewählt, so werden typischerweise die folgenden Aufgaben abgearbeitet [VDI14]:

- **Datenbeschaffung & Datenaufbereitung:** Diese beiden Aufgaben laufen primär zu Beginn der Simulationsstudie aber ggf. auch noch parallel zu den darauf folgenden Aufgaben ab.
- **Aufgabendefinition:** Zunächst wird die genaue Aufgabe des Simulationsprojektes definiert. Daraus resultiert eine Aufgabenspezifikation.
- **Systemanalyse:** In dieser Phase wird das Real-system analysiert, strukturiert und abstrahiert. Es entsteht ein Konzept für das Simulationsmodell.
- **Modellformalisierung & Implementierung:** Für die Umsetzung des Modells in ein Softwaremodell wird ein Konzept entwickelt und anschließend implementiert.
- **Experimente und Analyse:** Mit den aufbereiteten Daten können Simulationsexperimente durchgeführt und das Systemverhalten analysiert werden.

Parallel werden alle Teilergebnisse verifiziert und validiert.

In [Rei97] und [Hub11] wurden Expertenbefragungen analysiert, die unter anderem den Aufwand bei der Durchführung von Simulationsprojekten auf die verschiedenen Aufgaben verteilt betrachtet haben. Dabei hat sich ergeben, dass die Modellerstellung sowie die Datenbeschaffung und –aufbereitung als aufwändigste Aufgaben eingeschätzt werden. Im zeitlichen Verlauf bis 2010 betrachtet, nimmt dabei der prozentuale Anteil der Modellierung am Gesamtaufwand kontinuierlich zu und macht im Jahre 2010 ca. 35 % aus [Hub11]. Die Datenbeschaffung und –analyse wird auf ca. 25 % des Gesamtaufwandes geschätzt.

2.3 SIMULATIONSWERKZEUGE

Basierend auf den Simulationsmethoden werden Simulationswerkzeuge entwickelt, mit denen die Implementierung von Simulationsmodellen unterstützt wird. Simulationswerkzeuge bestehen aus einem Simulationskern, einer Benutzeroberfläche, einer Datenverwaltung und einer oder mehreren Schnittstellen zu externen Programmen [VDI14]. Der Simulationskern stellt die Modellwelt für die Implementierung des Modells bereit und realisiert die Ablaufsteuerung der Simulation. Die Benutzeroberfläche ermöglicht den Modellaufbau, die Dateneingabe und die Ergebnisdarstellung für den Anwender. Zur Vereinfachung wird der Modellaufbau meist graphisch gelöst und

erlaubt eine Drag & Drop-Anordnung der Modellbestandteile. Die Datenverwaltung enthält sowohl die Eingangsdaten der Simulation als auch Laufzeitdaten, die während eines Simulationslaufes entstehen. Für die Speicherung dieser Daten kann beispielsweise eine Datenbank verwendet werden. Mit der Schnittstelle zu externen Programmen werden zum einen externe Daten für die Simulation als auch die Simulationsergebnisse für die anderen Programme zugänglich gemacht. [VDI14]

Neben den üblichen Desktopanwendungen werden auch webbasierte Simulationsanwendungen untersucht. Dabei wird ein Simulationswerkzeug ganz oder teilweise mithilfe von Webtechnologien realisiert. Beispielsweise kann ein auf einem Server befindlicher Simulationskern über eine webseitenbasierte Benutzeroberfläche für Anwender zugänglich gemacht werden. [Byr10]

Heute sind eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationswerkzeuge am Markt erhältlich. Für die Logistikplanung besonders relevante Tools sind in alphabetischer Reihenfolge: Anylogic, AutoMod, Arena, Enterprise Dynamics, ExtendSim, FlexSim, Jaamsim, Process Simulator, Simio, SIMUL8, Emulate3D, Plant Simulation und Witness Horizon. Alle verwendeten Tools implementieren die ereignisorientierte Simulationsmethode. In Ausnahmen werden auch die agentenbasierte und kontinuierliche Simulation angeboten. Ebenfalls unterstützen alle Simulationswerkzeuge eine graphische Modellierung, größtenteils auch mit einer Drag & Drop – Funktionalität zum Anordnen der Modellbestandteile. Hierbei sind sowohl 2D- als auch 3D-Darstellungen möglich. Zusätzlich ermöglicht eine angebotene sprachbasierte Modellierung die Abbildung komplexer Modelle. Dabei setzen zwei Drittel der betrachteten Werkzeuge auf domänenspezifische Programmiersprachen. Die meisten Tools bieten eine Möglichkeit zur Wiederverwendung von Modellkomponenten. Zum Beispiel können eigene Bausteinbibliotheken angelegt oder erweitert werden oder Code und Modellkomponenten können exportiert werden. Die Simulationswerkzeuge sind primär unter Verwendung des Betriebssystems Windows nutzbar. Nur wenige Ausnahmen ermöglichen eine Nutzung unter MacOS oder Linux. [Swa17, Ivi19, App19, Fle20, Gbu20, Ima17, Jaa20, Lan20, Ram17, Roc16, Roc19, Roh97, Sim19, Sim20a, Sim20b]

3 METHODIK

Das Vorgehen, welches diesem Artikel zugrunde liegt, ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Um die Ursachen für den hohen Simulationsaufwand in Materialflussplanungsprojekten aufzudecken, wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt und um eine Analyse der vorhandenen Softwaretools ergänzt. Zur Vervollständigung der Informationsbasis wurden Interviews mit Simulationsexperten durchgeführt. Dies wird in den Abschnitten 2, 4 und 5 beschrieben. Anschließend wurden Anforderungen und Gestaltungsprinzipien zur Verringe-

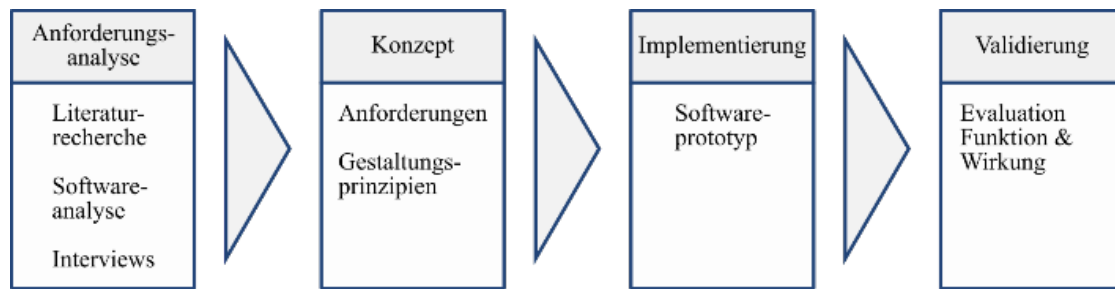


Abb. 2: Methodisches Vorgehen zum Erreichen der präsentierten Forschungsergebnisse.

ung des Simulationsaufwands aus den Ergebnissen der Analyse abgeleitet, siehe Abschnitt 6 und □. Zur Erprobung des entwickelten Konzepts wurde ein Software-Prototyp entwickelt und im Hinblick auf Funktionalität und Auswirkungen auf den Simulationsaufwand evaluiert (vgl. Abschnitt 8).

4 EXPERTENINTERVIEWS

Zur Vervollständigung und Sicherung der Aktualität des Stands der Technik wurden Interviews mit Simulationsexperten aus Wissenschaft und Industrie durchgeführt. Dabei wurden unter anderem die folgenden Themenfelder diskutiert:

- **Eingesetzte Software:** Dieses Themenfeld beschäftigt sich damit, welche Software von den Interviewpartnern eingesetzt wird und welche Kritikpunkte bzw. Verbesserungswünsche die Interviewpartner sehen.
- **Simulationsaufwand:** In diesem Abschnitt wurde über die Aufwandstreiber bei der Durchführung eines Simulationsprojektes gesprochen.

Es wurden 12 Simulationsexperten mit einer durchschnittlichen Simulationserfahrung von 6,3 Jahren interviewt. In Tabelle 1 findet sich eine Übersicht über das Arbeitsumfeld und die verwendeten Softwaretools der Interviewpartner.

4.1.1 EINGESETZTE SOFTWARE

Acht der Interviewpartner gaben an, hauptsächlich Plant Simulation als Simulationstool zu benutzen. Andere häufig verwendete Simulationstools sind AutoMod und Anylogic. Zwei Interviewpartner nutzen eine gemeinsame Eigenentwicklung. Neben den genannten schwerpunktmäßig verwendeten Simulationstools haben die Interviewpartner ebenfalls Erfahrungen mit Enterprise Dynamics, Arena, Simio, ProModel und FlexSim gesammelt. Des Weiteren wurden Simulationsmodelle mit C implementiert oder Monte Carlo Simulationen durchgeführt.

Die von den Interviewpartnern genannten Kritikpunkte an den Softwaretools lassen sich in die Kategorien

Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit unterteilen. Funktionalität umfasst dabei Fehler und Einschränkungen

Tabelle 1: Übersicht über das Arbeitsumfeld und die eingesetzten Simulationswerkzeuge der Interviewpartner.

Interview Nr.	Arbeitsumfeld	eingesetzte Softwaretools
1	Industrie	AutoMod
2	Wissenschaft	Plant Simulation, Enterprise Dynamics
3	Wissenschaft	Plant Simulation, Arena, Simio, ProModel, FlexSim, AnyLogic
4	Industrie	Plant Simulation
5	Wissenschaft & Industrie	Plant Simulation
6	Industrie	Plant Simulation
7	Industrie	Plant Simulation
8	Wissenschaft	Plant Simulation
9	Wissenschaft	AnyLogic
10	Industrie	Open Source-basierte Eigenentwicklung
11	Industrie	Open Source-basierte Eigenentwicklung
12	Wissenschaft	Plant Simulation

der Software. Benutzerfreundlichkeit enthält subjektive Einschätzungen wie Erlernbarkeit, Bedienbarkeit und Gestaltung der Software. Die am häufigsten genannten Kritikpunkte sind:

- Verwendung von domänenspezifischen Programmiersprachen sowie deren Unterschiede zu Standardprogrammiersprachen zum Beispiel im Definition und Umfang von Standardbefehlen inklusive mangelnder Objektorientierung (9),
- Komplexe, unflexible und teilweise beschränkte Modellierung mit einer Vielzahl an vorgegebenen Standardbausteinen, Attributen und Methoden (8),
- Geringe Rechenleistung und damit verbunden lange Simulationslaufzeiten (5),
- Benutzeroberfläche und Ergebnisdarstellung entsprechen nicht den optischen Erwartungen der Nutzer, die durch Verwendung aktuelle Software entsteht, sowie technische Schulden aus früheren Softwareversionen (5),
- Fehlende Dokumentation und Hilfestellung (4),
- Fehlfunktionen der Software (3),
- Fehlende Optimierungsmöglichkeiten (2),
- Limitierte Schnittstellen (2).

Die Zahlen in Klammern geben hier die Häufigkeit der Nennung an. Da Mehrfachnennungen möglich waren, ist diese nicht zwangsläufig gleichzusetzen mit der Anzahl an Interviewpartnern, die diesen Kritikpunkt genannt haben.

Als Verbesserungswünsche für die Modellierung wurden genannt:

- Verwendung einer objektorientierten Standardprogrammiersprache,
- Nutzung einer modernen Entwicklungsumgebung,
- automatischer CAD-Layout-Import,
- Möglichkeit zur Integration von Unit-Tests,
- Versionsverwaltung, um parallele Modellierung zu ermöglichen,
- einfachen Grundbausteine, denen nur benötigte Methoden und Attribute vererbt werden.

Wünsche an die Softwarefunktionalität sind:

- Bessere Unterstützung von Optimierung,
- Open Source Software, die von einer großen Community verbessert werden kann,
- Möglichkeiten Simulationsmodelle auf einer Plattform mit anderen zu teilen,
- flexible Schnittstellen,

- Anpassung der Visualisierungs- und Animationsmöglichkeiten, um z. B. große Modelle visuell zu strukturieren, getaktete Systeme besser zu animieren oder Simulationsergebnisse schneller erfassbar zu machen,
- Implementierung einer Physik-Engine und stärkere Kopplung mit der Emulation.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Vielzahl von Simulationswerkzeugen zur Verfügung steht. Kritikpunkte und Verbesserungswünsche finden sich allerdings in allen Bereichen der Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit der verschiedenen Werkzeuge.

4.1.2 SIMULATIONS-AUFWAND

In Abb. 3 sind die Interviewergebnisse zum Thema Simulationsaufwand veranschaulicht. Die Schritte Datenbeschaffung und –aufbereitung, Modellierung und Implementierung wurden als Hauptaufwandstreiber durch die Interviewpartner genannt. Dabei wurde die Datenbeschaffung und –aufbereitung vor allem von den Interviewpartnern mit wissenschaftlichem Hintergrund genannt. Hierbei entsteht der Aufwand dadurch, dass die Daten entweder nicht existent sind, noch aufgenommen werden müssen oder nicht zugänglich sind. Von den Interviewpartnern wurden als nächstgrößte Aufwandstreiber die Konzeptionierung und Modellimplementierung genannt. Die Konzeptionierung hängt dabei zum einen vom bestehenden System- und Prozessverständnis und zum anderen von der verwendeten Software ab. Zwei der Interviewpartner, denen die Konzepte bereits vorgegeben werden, gaben die Modellimplementierung als aufwändigsten Schritt im Simulationsprojekt an.

Neben den Projektschritten wurden auch Systemeigenschaften als Aufwandstreiber identifiziert. Dies ist vor allem die Komplexität des Systems bzw. der zu implementierenden Steuerung. Die Komplexität wird dabei durch Sequenzierungs- und Flexibilitätsanforderungen erhöht. Außerdem wurden die Neuentwicklung im Vergleich zu kleinen Modellanpassungen und der Abstrakti-

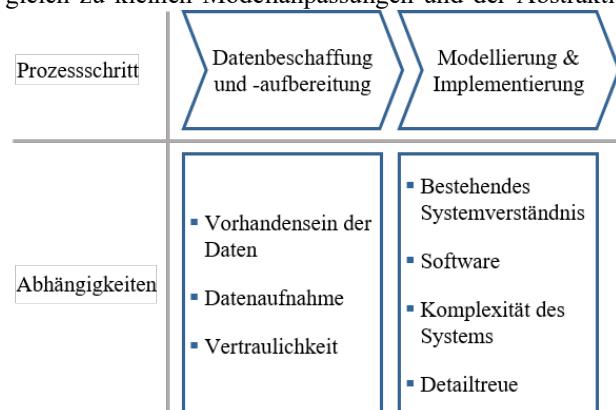


Abb. 3: Aufwändige Prozessschritte in einem Simulationsprojekt und zugehörige Einflussfaktoren.

onsgrad bzw. die Detailtreue des Modells genannt. Die Interviewpartner gaben zusätzlich an, dass der Simulationsaufwand stark von der Expertise des Durchführenden abhängt.

Insgesamt haben die Interviews gezeigt, dass auch 10 Jahre nach der Umfrage von [Hub11] die Modellierung sowie Datenbeschaffung und –aufbereitung noch immer die größten Aufwandstreiber in Simulationsprojekten sind. Außerdem sind vielfältige Verbesserungspotentiale in den aktuell verwendeten Simulationswerkzeugen zu finden.

5 REFLEKTION DES STANDS DER TECHNIK

Die Aufnahme des Stands der Technik und die Ergänzung um die Expertise der interviewten Simulationsexperten hat sowohl Vorzüge als auch Verbesserungspotentiale der heute verwendeten Simulationsmethoden und –werkzeuge aufgedeckt. Diese werden im Folgenden diskutiert.

5.1 SIMULATIONSMETHODEN

Mit der ereignisorientierten Simulationsmethode hat sich eine Methode etabliert, die es erlaubt, logistische Systeme mit hinreichender Genauigkeit abzubilden, um Aussagen über die Eignung und Leistungsfähigkeit zu treffen. Allerdings resultiert sie aufgrund geringer Aggregation und Abstraktion in aufwändiger Modellierung. Hierbei kann aber trotzdem von einem gewissen Spielraum ausgegangen werden, sodass bei der Simulation eine abstrakte, aber dennoch ausreichend detaillierte Modellierung unterstützt werden sollte. Die sprachbasierten und generischen Modellierungskonzepte haben sich heute ebenfalls etabliert. Allerdings scheinen domänenspezifische Programmiersprachen den Simulationsaufwand zu erhöhen, die angebotenen Bausteine sind nicht hinreichend generisch und ihre Vielfalt macht umfangreiche Kenntnisse notwendig.

Die kontinuierliche Simulation betrachtet Systeme mit hoher Abstraktion. Es werden Flüsse betrachtet, die eine Untersuchung von Warenströmen auf Objektebene, also zum Beispiel die Abbildung einzelner Behälter, unmöglich machen. Da diese Betrachtung in komplexen Systemen teilweise aber notwendig ist, kann die kontinuierliche Simulation nicht für die Funktionsprüfung von logistischen Systemen verwendet werden. Dies trifft ebenso auf die hybride Simulation zu.

Die agentenbasierte Simulation bedient sich autonomer, lernfähiger Agenten, die situationsabhängig mit einander und ihrer Umwelt agieren. Prinzipiell wäre es möglich damit intralogistische Systeme abzubilden, allerdings benötigt nicht jedes der intralogistischen Elemente diese Intelligenz, sodass hier ein noch größerer Modellie-

rungsaufwand als mit der ereignisorientierten Simulation resultieren würde.

5.2 SIMULATIONSSOFTWARE

Simulationstools sollen den Simulationsexperten unterstützen und die Modellimplementierung erleichtern, damit dieser nicht jedes Mal komplette Simulationen bzw. Simulationsmodell und Ablaufsteuerung mit einer Standardprogrammiersprache selbst neu entwickeln muss. Dafür stehen heutzutage viele Tools zur Verfügung, die prinzipiell für die Materialflusssimulation geeignet sind und domänenspezifisch dem Simulationsexperten Bausteine zur Verfügung stellen. Die Verwendung von Elementen zur graphischen Modellierung und Animation der Simulationsläufe unterstützt dabei sowohl bei der Modellimplementierung als auch beim Debugging des Simulationsmodells. Allerdings liegen auch Kritikpunkte an den verfügbaren Tools vor, die den Simulationsaufwand erhöhen:

- 1) Die Modellierung ist nicht intuitiv, erfordert einen hohen Arbeitsaufwand und erschwert die Erlernbarkeit:
 - a. Domänenspezifische Programmiersprachen haben Schwächen, weichen von bekannten Standardprogrammiersprachen ab und erschweren zusätzlich den Einstieg in eine Software, da diese immer neu erlernt werden müssen.
 - b. Die umfangreichen Objektbibliotheken erfordern ebenfalls umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen in der Modellierung.
 - c. Neben den logistischen Leistungsparametern werden weitere Parameter, wie z. B. die räumliche Position, betrachtet.
 - d. Die Programmierung ist häufig nicht, oder nur eingeschränkt objektorientiert möglich. Dadurch kommt es zu einem größeren Programmieraufwand bei der sprachbasierten Modellierung.
- 2) Die Adaptionsfähigkeit, Flexibilität und Skalierbarkeit sind nicht ausreichend gegeben:
 - a. Es gibt viele Voreinstellungen oder vorgegebene Algorithmen und Logiken. Diese sollen den Arbeitsaufwand verringern, schränken aber die Modellierungsflexibilität ein.
 - b. Teilweise sind arbeitsintensive Workarounds für eine flexible Modellierung notwendig.

- c. Das Erstellen eigener Bausteinbibliotheken wird nur teilweise unterstützt.
 - d. Nachträgliche Modelländerungen sind mit hohem Aufwand verbunden, dies liegt zum Teil an starken Kopplungen zwischen einzelnen Modellelementen.
- 3) Der Stand der Technik der Softwareentwicklung wird nicht ausgenutzt:
- a. Simulationsmodelle werden lokal auf einem Rechner entwickelt. Damit wird die Mehrpersonenmodellierung eingeschränkt.
 - b. Die Versionierung bei der Modellerstellung ist nur eingeschränkt möglich.
 - c. Die Software wird meist als klassische Desktop-Anwendung realisiert. Die Software muss daher auf dem Anwender-Rechner installiert werden und ist somit vom Betriebssystem abhängig.
 - d. Die Schnittstellen der Simulationstools sind limitiert.
- 4) Die Rechenzeiten der Simulationen sind lang:
- a. Die Simulation wird lokal auf einem Rechner ausgeführt und ist somit an dessen Leistung gekoppelt.
 - b. Zusätzliche Unterbauten oder virtuelle Maschinen steigern die Rechenzeit zusätzlich.
 - c. Die Rechenzeit ist teilweise abhängig von der Geschwindigkeit der Schnittstellen zu externen Programmen oder Daten.
- 5) Die Ausführung von Optimierungsmethoden wird wenig unterstützt und teilweise durch die Nutzung der Tools erschwert:
- a. Die Rechengeschwindigkeit ist für aufwendige Optimierungsverfahren zu langsam.
 - b. Es gibt kaum dedizierte Optimierungsbibliotheken, sodass externe Ressourcen über Schnittstellen eingebunden werden müssen.

Neben den methodischen und softwareseitigen Kritikpunkten, liegen ebenfalls Umweltfaktoren vor, die die Dauer eines Simulationsprojektes erhöhen können. Hier sind vor allem mangelnde Datengrundlagen ausschlaggebend,

die zum Teil aufgrund der mangelnden Digitalisierung nicht existieren oder aufwendig vorverarbeitet werden müssen.

Die Reflektion des Stands der Technik in Kombination mit den durchgeführten Experteninterviews hat gezeigt, dass im Bereich der Simulationswerkzeuge Verbesserungsbedarfe bestehen, deren Erfüllung dazu beitragen kann, den Simulationsaufwand zu verringern. Daher werden im folgenden Abschnitt Anforderungen definiert, die dies erlauben.

6 ANFORDERUNGEN AN ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN IM BEREICH DER MATERIALFLUSSSIMULATION

Hinsichtlich der Verfügbarkeit einer zufriedenstellenden Datenbasis kann erwartet werden, dass im Zuge der zunehmenden Digitalisierung mehr Daten in logistischen Anlagen aufgenommen werden, die anschließend für Simulationen zur Verfügung stehen. Da die Simulation von großer Bedeutung bei anstehenden, komplexen Systemveränderungen oder Neuplanungen ist, sollte auch auf eine angemessene Form der Datenspeicherung geachtet werden.

Aus den genannten Schwächen der Simulationsmethoden und –tools ergeben sich, zusätzlich zu den bestehenden Stärken, Anforderungen an zukünftige Weiterentwicklungen der existierenden Softwaretools oder Neuentwicklungen:

- Vereinfachung der Modellierung
- Unterstützung von flexiblen, leicht adaptierbaren und skalierbaren Simulationsmodellen
- Ausnutzen des Stands der Technik der Softwareentwicklung.
- Verkürzung der Rechenzeit
- Bessere Unterstützung der Optimierung

7 KONZEPT FÜR EINEN NEUEN SIMULATIONSANSATZ

Um die beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, wurde ein Konzept für neue Simulationswerkzeuge entwickelt. In Abb. 4 ist ein Überblick über die Gestaltungsprinzipien, die die Basis des Konzepts bilden, dargestellt. Die drei Grundpfeiler sind Flexibilität, Autonomie und Fokussierung.

7.1 FLEXIBILITÄT

Flexibilität bedeutet eine große Anpassungsfähigkeit und erlaubt in diesem Kontext die Abbildung vieler verschiedener Systeme aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

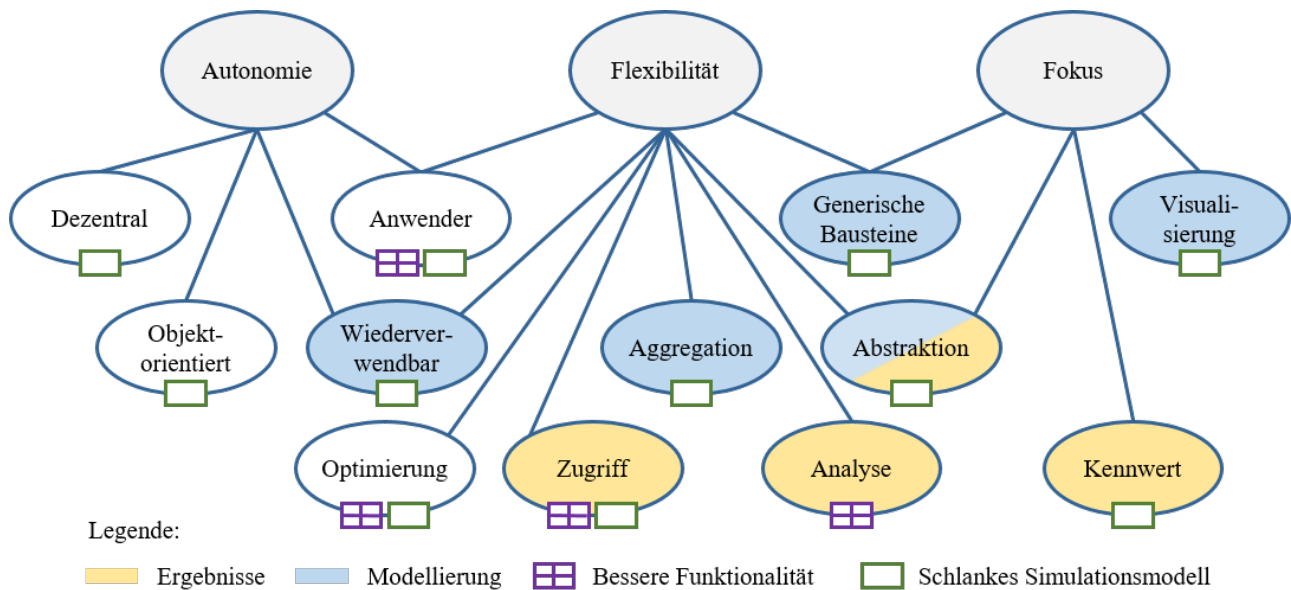


Abb. 4: Konzept zur Verbesserung heutiger Simulationsansätze.

Modellierungsflexibilität

Die Modellierung muss möglichst flexibel gestaltet sein. Dies wird durch generische Bausteine erreicht, die individuell anpassbar sind. Damit wird auch die Möglichkeit zur einfachen Abstraktion und Aggregation geschaffen. Die Modellierungsflexibilität wird zusätzlich durch die hohe Wiederverwendbarkeit der Bausteine erreicht, vgl. Autonomie.

Ergebnisflexibilität

Der Zugriff auf die Ergebnisdaten und ihre Analyse sind flexibel gestaltet und für den Anwender ohne großen Aufwand möglich. Die Ergebnisdaten enthalten ausschließlich die für den Untersuchungszweck relevanten Kennzahlen.

Optimierungsflexibilität

Die Optimierungsmöglichkeiten sind heute oft eingeschränkt und an zur Verfügung stehende Schnittstellen gekoppelt. Diese Abhängigkeit wird durch die flexible Wahl der eingesetzten Optimierungsmethoden durch den Anwender aufgelöst.

Anwenderflexibilität

Durch starre Strukturen wird der Anwender in der Nutzung der Simulationsanwendung eingeschränkt. Hier ist ebenfalls eine größtmögliche Flexibilität anzustreben. Diese äußert sich in der flexiblen Wahl eines Arbeitsplatzes oder gleichzeitiger Modellierung durch mehrere Benutzer.

7.2 AUTONOMIE

Autonomie bezieht sich zum einen auf die Modellbausteine und zum anderen auch auf den Anwender. Autonome Bausteine bedeuten dabei einen Verzicht auf eine übergeordnete Steuerung und eine ausgeprägte Objektorientierung. Die Bausteine kennen selbst die Regeln, die ihrem Verhalten zu Grunde liegen. Außerdem besteht zwischen den Bausteinen keine Kopplung. Dies verbessert zusätzlich die Wiederverwendbarkeit der Bausteine.

Die Autonomie des Anwenders liegt darin, selbst zu entscheiden, welche Funktionalität im Simulationsmodell realisiert wird. Die grundlegenden Verhaltensregeln der Bausteine sind daher frei und optional gestaltbar.

7.3 FOKUSSIERUNG

Die Fokussierung bezieht sich sowohl auf die Modellierung als auch auf die Simulationsergebnisse. Dabei steht jeweils der Fokus auf das Wesentliche im Mittelpunkt.

Für die Modellierung sind die notwendigen Funktionen mit den Grundbausteinen umsetzbar, aber keine vordefinierten großen Bausteinbibliotheken vorhanden. Damit bleibt der Umfang der Funktionalität für den Anwender überschaubar. Außerdem ist die Visualisierung einfach gehalten und an den Untersuchungszweck angepasst. Dadurch wird der Modellierungsaufwand nicht durch detaillierte Abbildungen unnötig gesteigert.

Bei der Wahl der Ergebnisdaten werden nur die notwendigen Kennzahlen und die benötigte Detailtreue berücksichtigt. So wird Mehraufwand durch nicht benötigte Ergebnisse vermieden.

7.4 WIRKUNG DER KONZEPTBESTANDTEILE

Die vorgestellten Maßnahmen wirken sich zum einen auf den Umfang des Simulationsmodells und zum anderen auf die Funktionsweise der Simulationsanwendung aus. Insgesamt wird das Simulationsmodell verschlankt und zusätzlich die Funktionalität verbessert, was außerdem die Benutzerfreundlichkeit steigert. Dies ist für die einzelnen Konzeptbestandteile in Abb. 4 gekennzeichnet.

Im Folgenden werden die konkreten Überlegungen für eine Softwareimplementierung, die sich aus den vorgestellten theoretischen Gestaltungsprinzipien ergeben, dargestellt.

7.5 SOFTWAREARCHITEKTUR

Wie oben bereits beschrieben, bestehen Simulationswerkzeuge aus einem Simulationskern, einer Benutzeroberfläche, einer Datenverwaltung und Schnittstellen zu externen Programmen. In einer Server-Client-Architektur können Simulationskern, Datenverwaltung und die Schnittstellen auf dem Server angeordnet werden. Die Benutzeroberfläche wiederum stellt entsprechend den Client dar. Die Realisierung der Benutzeroberfläche als Webseite führt zusätzlich dazu, dass ein beliebiger Server, der über das Internet oder ein internes Netzwerk erreichbar ist, verwendet werden kann. Damit erschließt sich die Unabhängigkeit vom Anwender-Rechner. Die Rechenleistung des Servers wird genutzt, es ist keine Installation notwendig und die Software ist unabhängig vom Betriebssystem gestaltbar. Lediglich eine geringe Abhängigkeit vom verwendeten Browser ist gegeben, da dieser Einfluss auf die Implementierung hat. Außerdem können so mehrere Anwender gemeinsam an einem Modell arbeiten, die parallele Ausführung von Simulationsläufen ohne hohe Performanceeinbußen ist möglich und die Simulationsmodelle können dort mit einer Versionsverwaltung archiviert werden. Die Entwicklung einer Benutzeroberfläche als Webseite ermöglicht zudem ein modernes Erscheinungsbild. Durch die Anwendung von Softwareentwicklungsstandards und einer übersichtlichen Systemarchitektur können zukünftige technische Schulden vermieden werden.

Insgesamt sollte bei der Implementierung neuer Simulationstools auf die Verwendung von Standardkomponenten (Programmiersprachen, Frameworks, ...) geachtet werden, um den Stand der Technik in der Softwareentwicklung zu berücksichtigen und die damit verbundenen Vorteile wie zum Beispiel hohe Performance zu nutzen.

7.5.1 SIMULATIONSKERN

Als Simulationsprinzip wird die ereignisorientierte Simulation gewählt, sodass eine entsprechende Ablaufsteuerung und Ereignisverwaltung im Simulationskern implementiert wird. Darüber hinaus enthält das Modellierungskonzept die folgenden Punkte:

- Graphische und sprachbasierte Modellierung: Bei der Modellimplementierung ist die Individualisierung durch eine programmierbasierte Entwicklung zusätzlich zur graphischen Modellierung möglich. Nur so können komplexe Steuerungslogiken abgebildet werden. Hierbei steht dem Anwender eine Standardprogrammiersprache zur Verfügung. Diese ist im besten Fall bereits bekannt und verringert so den Lernaufwand.
- Objektorientierte Implementierung der Grundbausteine: Die Grundbausteine werden als Objekte mit Attributen und Methoden gestaltet.
- Wenige Grundbausteine: Für die Abbildung von Materialflusssystemen werden typischerweise Quellen, Senken, Puffer und Transportbausteine benötigt. Diese stehen dem Anwender für die Modellierung zur Verfügung.
- Generische Grundbausteine: Die Grundbausteine haben einen grundsätzlichen Funktionsumfang, der individuell angepasst werden kann. Die Grundbausteine legen auch den Ausgangspunkt für individuell an den Anwender angepasste Bausteinbibliotheken (vgl. [Hil17]).
- Gekapselte, autonome Grundbausteine: Die Grundbausteine benötigen nicht zwangsläufig eine übergeordnete Steuerung. Die Grundbausteine steuern ihr Verhalten folglich selbst (vgl. [Hil17]).
- Unterstützung von Abstraktion: Die Grundbausteine sind skalierbar gestaltet, können also kurze und lange Modellabschnitte gleichermaßen abbilden. Hierbei hilft die Modellierung als Kanten und Knoten, die jeweils als Black Box realisiert werden.
- Fokus auf das Wesentliche: Die Modellierung fördert die Betrachtung der relevanten logistischen Leistungsparameter und führt so dazu, dass unnötiger Aufwand vermieden wird. Dies wird erreicht, in dem mathematisch die Bearbeitungszeit eines logistischen Objektes berechnet wird und die räumliche Position dabei untergeordnet ist (vgl. [Hil17]).

7.5.2 BENUTZEROBERFLÄCHE

Für eine modern und funktional gestaltete Benutzeroberfläche wird eine Webseite als Basis gewählt [Hil20]. Diese enthält die Funktionalitäten graphisch gestützte Modellierung, Anlegen einer individuellen Bausteinbibliothek, Datenimport und -export sowie Animation von Simulationsläufen. Zusätzlich werden ein Experimentverwalter und eine flexible Visualisierung von Simulationsergebnissen ergänzt.

Die graphische Modellierung ist dabei übersichtlich gestaltet, sodass dadurch die Modellierung vereinfacht wird und nicht zusätzlicher Aufwand zum Beispiel durch aufwendiges Komponentendesign entsteht. Außerdem unterstützt die graphische Modellierung eine Drag & Drop-Funktionalität zum intuitiven Anordnen der Modellbausteine. Neben der graphischen Modellierung muss die Möglichkeit zur sprachbasierten Modellierung bestehen. Dazu können den Modellbestandteilen Methoden und Attribute, welche vom Anwender festgelegt werden, zugewiesen werden. Die Implementierung der Methoden kann dabei unabhängig von dem Simulationswerkzeug mit einer beliebigen etablierten Entwicklungsumgebung durchgeführt werden. Die Bausteinbibliothek wird derart realisiert, dass dem Anwender die Möglichkeit gegeben wird, individualisierte Modellkomponenten abzuspeichern und später in einem anderen Modell wieder zu verwenden.

7.5.3 DATENVERWALTUNG UND SCHNITTSTELLEN

Die Modelldaten, Experimentdaten und Simulationsergebnisse müssen gespeichert und verarbeitungsfähig gehalten werden. Dazu wird eine Datenbank auf dem Server verwendet. Über Interaktionen mit dem Simulationskern können so Daten gespeichert, ausgelesen und für den Anwender in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden.

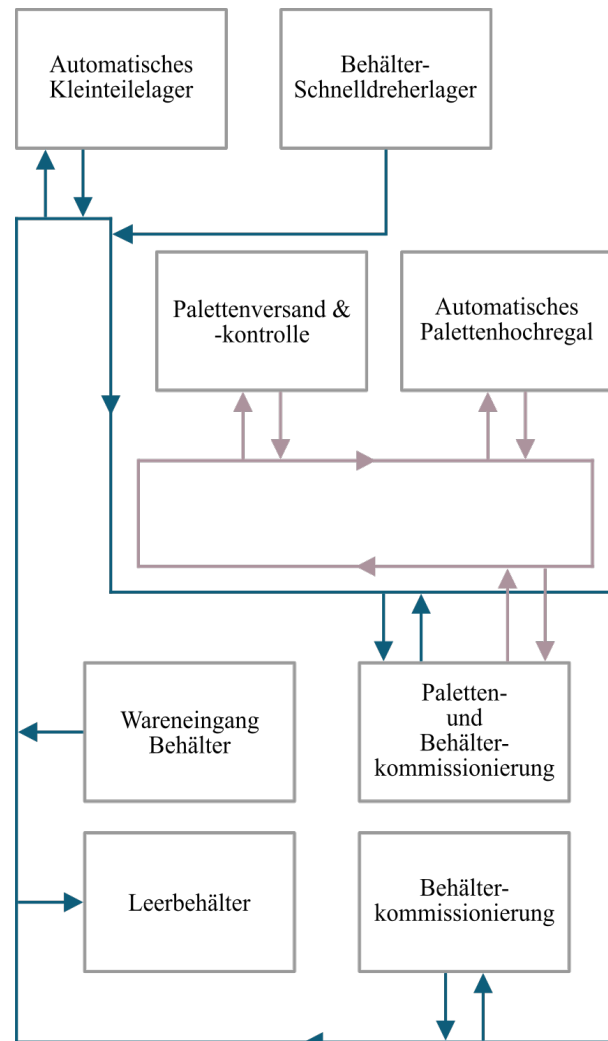
Durch die Implementierung des Simulationskerns und durch die sprachbasierte Modellierung in einer Standardprogrammiersprache stehen eine Vielzahl an Standardbibliotheken für zusätzliche Funktionalität oder zur Einbindung einer Schnittstelle an externe Software zur Verfügung. Zum Beispiel kann so der Bedarf nach Optimierungsmöglichkeiten gedeckt werden.

Für die sprachbasierte Modellierung ist es zusätzlich möglich, den Programmcode in einer beliebigen Entwicklungsumgebung zu implementieren und anschließend dem Server zur Verfügung zu stellen. So entfällt zusätzlich die Umgewöhnung an einen neuen Codeeditor.

Die Versionsverwaltung wird durch ein bestehendes externes System ermöglicht. Hier gibt es mehrere frei zugängliche Systeme am Markt. Alternativ kann auch eine eigene Versionsverwaltung auf dem Server installiert werden.

8 EVALUATION DES SIMULATIONSANSATZES MIT EINEM SOFTWAREPROTOTYPEN

Um das entwickelte Simulationskonzept bewerten zu können, wurde ein Softwareprototyp in einer Server-Client-Umgebung realisiert. Für die Implementierung des Simulationskerns wurde die Programmiersprache python [Pyt20] verwendet, die ebenfalls für die sprachbasierte Modellerstellung Anwendung findet. Über die python-Bibliothek Flask [Pal10] wird der Simulationskern mit ei-



Legende
 —> Materialfluss Behälter
 —> Materialfluss Paletten

Abb. 5: Skizze der betrachteten Bereiche des simulierten Distributionszentrums.

ner im Framework Angular [Goo20] programmierten webbasierten Benutzeroberfläche verbunden (vgl. [Hil20]). Für die Datenverwaltung wird eine sqllite-Datenbank verwendet.

8.1 VERIFIKATION DER FUNKTIONSWEISE DES PROTOTYPS

Um später den Einfluss des entwickelten Simulationsansatzes auf den Simulationsaufwand zu untersuchen, wurde zunächst die richtige Funktionsweise des Softwareprototyps, also die Fähigkeit Realsysteme korrekt abzubilden, getestet. Hierzu wurde das Modell eines Distributionszentrums aufgebaut und die Simulationsergebnisse mit Realdaten verglichen. Eine Skizze des Modells ist in Abb. 5 dargestellt. Kern des Simulationsmodells stellen Kommissionierstationen dar, welche zum einen der Kommissionierung rein aus Behältern aus einem automa-

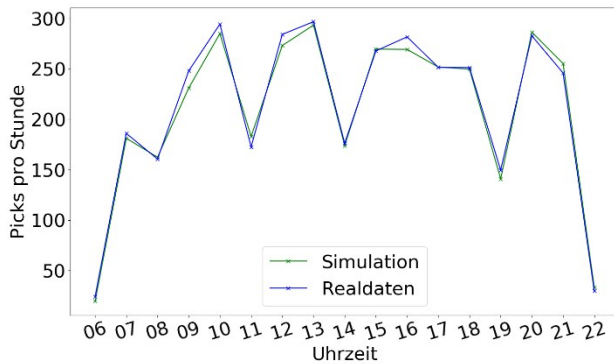


Abb. 7: Vergleich der simulierten (grün) mit der realen (blau) Kommissionierleistung an den Behälterkommissionierstationen des Distributionszentrums in Abhängigkeit von der Uhrzeit.

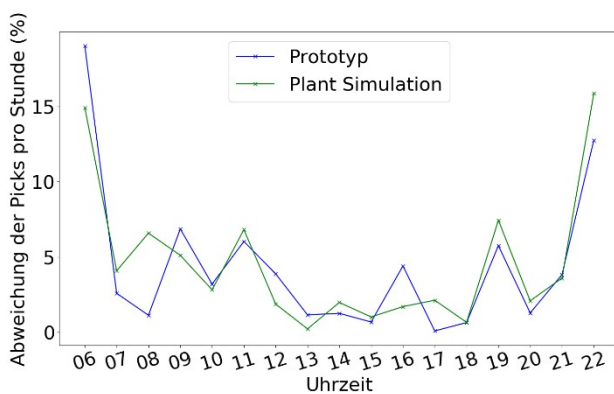


Abb. 7: Vergleich der relativen Abweichung der simulierten von der realen Kommissionierleistung in dem Softwareprototyp (blau) und Plant Simulation (grün).

tischen Kleinteilelager dienen und zum anderen eine gemischte Behälter- und Paletten-Kommissionierung erlauben. Die Behälter und Paletten werden jeweils automatisiert über Fördertechnik aus den Lagern zu den Kommissionierstationen gefördert. In Abb. 7 ist ein Vergleich der simulierten und realen Kommissionierleistung im Verlauf einer Woche für die Behälterkommissionierung dargestellt. Um die Größe der Abweichungen zwischen Realdaten und Simulationsergebnissen im Kontext der heute etablierten Simulationstechnik beurteilen zu können, wurde zusätzlich ein Simulationsmodell des betrachteten Systems in Plant Simulation aufgebaut. Die Abweichung der Simulationsergebnisse von den Realdaten für die beiden Simulationswerkzeuge ist in Abb. 7 dargestellt. Für Plant Simulation ergibt sich eine mittlere Abweichung von 4,6 %, für den Prototyp von 4,4 %. Die Realitätstreue der beiden Simulationswerkzeuge ist demnach vergleichbar.

8.2 VERGLEICH DES SIMULATIONS-AUFWANDS

In der Softwareentwicklung sind die Anzahl der Codezeilen und Funktionspunkte gebräuchliche Maßgrößen, um eine Abschätzung des Entwicklungsaufwands für eine Software durchzuführen [Bal09]. Da heutzutage die Ent-

wicklung von Simulationsmodellen ebenso Programmieraufwand bedeutet, soll die Menge von Codezeilen zusammen mit der Anzahl verwendeter Modellbausteine zum Vergleich des Modellierungs- bzw. Implementierungsaufwands bei Verwendung des Prototyps mit der Verwendung eines etablierten Simulationswerkzeuges herangezogen werden. In Außer-

Tabelle 2 ist für das Distributionszentrum der Vergleich zwischen Plant Simulation und dem Prototyp dargestellt. Die Anzahl der Codezeilen ist dabei um Kommentare und Leerzeilen bereinigt worden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Auch wenn die Anzahl der Bausteine und die Anzahl unterschiedlicher verwendeter Bausteine in beiden Fällen ungefähr gleich groß ist, so ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Anzahl der Methoden und der entstandenen Codezeilen erkennbar. Außer-

Tabelle 2: Vergleich der Implementierung des Simulationsmodells des Distributionszentrums mit dem Prototypen und Plant Simulation.

Werkzeug	Prototyp	Plant Simulation
# Bausteine	381	383
# verschiedener Bausteine	4	5
# Methoden	44	145
# Codezeilen	706	6.412
Aufwandsschätzung (Tage)	20	51

dem sind die tatsächlich benötigten Modellierungsdauern in der Tabelle enthalten. Diese bestätigen, dass der Modellierungsaufwand mit dem Softwareprototypen geringer ist. Insgesamt deuten diese Beobachtungen darauf hin, dass der Aufwand zur Erstellung eines Simulationsmodells mit dem Softwareprototyp geringer ist als mit dem häufig verwendeten Simulationswerkzeug Plant Simulation.

FAZIT

Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung eines neuen Simulationsansatzes, um die Materialflusssimulation in der industriellen Systemplanung effizienter zu gestalten. Gut ein Drittel des Aufwands von Simulationsprojekten in der Intralogistik- und Produktionssystemplanung liegt in der Modellierung der Systeme. Daher muss dieser Aufwand gezielt reduziert werden. Hierfür wurde ein Konzept vorgestellt, das auf Flexibilität, Autonomie und Fokussierung beruht. Diese Gestaltungsprinzipien wirken sich ne-

ben der Modellierung zusätzlich auf die Simulationsergebnisse, Optimierungsmöglichkeiten und die Nutzung durch den Anwender aus. Aus dem Konzept resultieren sowohl ein schlankes Simulationsmodell als auch eine verbesserte Funktionalität und gesteigerte Benutzerfreundlichkeit.

Zur Evaluation des Ansatzes wurde ein Software-Prototyp entwickelt, der das vorgestellte Konzept realisiert. Da komplexe Simulationsmodelle einen großen Programmieranteil beinhalten, wurden zum Vergleich des Simulationsaufwands in Analogie zur Softwareentwicklung die Anzahl der Bausteine, Methoden und Lines of Code herangezogen. Dafür wurde das Modell eines Distributionszentrums einmal mit dem Prototyp erstellt und einmal mit dem etablierten Simulationswerkzeug Plant Simulation. Es hat sich gezeigt, dass die Anzahl der Codezeilen nahezu um einen Faktor 10 verringert werden konnte. Der vorgestellte Ansatz liefert somit eine Grundlage, um den Simulationsaufwand zu verringern, die Anzahl durchgeführter Simulationsprojekte zu steigern und somit die Planungssicherheit für Intralogistik- und Produktionssysteme zu erhöhen.

LITERATUR

- [App19] Applied Materials: Applied AutoMod. http://www.automod.se/documents/automod_key_features.pdf. Aufgerufen am: 15.11.2019.
- [Bal09] Balzert, H. (2009): Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- [Ban98] Banks, J. (1998): Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. New York: Wiley.
- [Bor04] Borshchev, A., Filippov, A. (2004): From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society. Oxford.
- [Bos04] Bossel, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation - Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.
- [Byr10] Byrne, J., Heavey, C., Byrne, P. J. (2010): A review of web-based simulation an supporting tools. In: Simulation modeling practice and theory 18(3). S. 253 – 276.
- [Cam11] Campuzano, F. und Mula, J. (2011): Supply Chain Simulation. London: Springer.
- [Dom05] Domschke, W. und Drexl, A. (2005): Einführung in das Operations Research. Berlin: Springer. 6. Auflage.
- [Fle20] FlexSim Software Products, Inc: FlexSim Manual. <https://docs.flexsim.com>. Aufgerufen am: 22.04.2020.
- [For61] Forrester, J. W. (1961): Industrial dynamics. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- [Gbu20] GBU mbH: Process Simulator. <https://process-simulator.de/>. Aufgerufen am 22.04.2020.
- [Goo20] Google (2020): Angular Docs. <https://angular.io/docs>.
- [Gut17] Gutenschwager, K., Rabe, M., Spiekermann, S., Wenzel, S. (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer Vieweg.
- [Hub11] Huber, L., Wenzel, S. (2011): Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. In: Industrie Management, 27 (5), S. 27 – 30.
- [Hil17] Hilbrich, S., Köck, H., Hinckeldeyn, J., Kreutzfeldt, J. (2017): Entwicklung einer Simulationemethodik zur schnellen Dimensionierung komplexer Materialflusssysteme, Logistics Journal: Proceedings.
- [Hil20] Hilbrich, S., Gerdes, K., Hinckeldeyn, J., Kreutzfeldt, J. (2020): Entwicklung webbasierter graphischer Benutzeroberflächen für Simulationskerne. In: ASIM 2020 – 25. Symposium Simulationstechnik (eingereicht).
- [Ima17] Imagine That Inc. (2017): ExtendSim User Guide. San Jose.
- [Ivi19] Ivic, I. (2019): Analyse und Bewertung aktueller Softwarepakete zur Simulation logistischer Systeme. Bachelorarbeit. TU Hamburg.
- [Jaa20] JaamSim Development Team: JaamSim: Discrete-Event Simulation Software. <https://jaamsim.com/>. Aufgerufen am 23.04.2020.
- [Klu12] Kluegl, F. und Bazzan, A. L.C. (2012): Agent-Based Modeling and Simulation. In: AI Magazine 33(3), S. 29 - 40.
- [Lan20] Lanner Group Limited: WITNESS Horizon. <https://www.lanner.com/en-us/technology/witness-simulation-software.html>. Aufgerufen am 22.04.2020.
- [Law15] Law, A. M. (2015): Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw-Hill Education. 5. Auflage.

- [Pal10] Pallets (2010): Flask User's Guide. <https://flask.palletsprojects.com/en/1.1.x/#user-s-guide>.
- [Pri98] Pritsker, A. A. B. (1998): Principles of Simulation Modeling. In: Banks, J.: Handbook of Simulation. New York: Wiley, S. 31 – 51.
- [Pyt20] Python Software Foundation (2020): Python 3.6 documentation. <https://docs.python.org/3.6/>.
- [Ram17] Ramanujan, K. (2017): Developing Custom templates in Arena. <https://www.arenasimulation.com/blog/post/developing-custom-templates-in-arena>. Aufgerufen am 22.04.2020.
- [Rei97] Reinhart, G., Feldmann, K. (1997): Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft? München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft.
- [Roc16] Rockwell Automation (2016): Arena Installation Notes. https://www.arenasimulation.com/resources/Arena_v15_Installation_Notes.pdf. Aufgerufen am 15.11.2019.
- [Roc19] Rockwell Automation: Emulate3D. <https://www.demo3d.com/technology/>. Aufgerufen am 15.11.2019.
- [Roh97] Rohrer, M. W. (1997): AutoMod Tutorial. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Atlanta. S. 657 – 662.
- [Sch08] Scholl, A. (2008): Grundlagen der modellgestützten Planung. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K.: Handbuch Logistik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Sim19] Simplan AG: AutoMod. <https://automod.de/automod/>. Aufgerufen am: 15.11.2019.
- [Sim20a] Simplan AG: Enterprise Dynamics. <https://www.simplan.de/software/enterprise-dynamics/>. Aufgerufen am 22.04.2020.
- [Sim20b] Simplan AG: Demo3D Produktfamilie – Editionsvergleich. https://emulate3d.de/wp-content/uploads/Demo3D_Editionsvergleich.pdf. Aufgerufen am 23.04.2020.
- [Ste00] Sterman, J. (2000): Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/ McGraw-Hill.
- [Swa17] Swain, J. J. (2017): Simulation Software Survey. <https://www.informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Simulation-Software-Survey>.
- [VDI14] VDI 3633, Dezember 2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen.
- [Wen18] Wenzel, S. (2018): Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg.): Modellierung logistischer Systeme. Berlin: Springer-Vieweg. S. 1- 34.
-
- Svenja Bahnsen, M.Sc. in Physik**, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Svenja Bahnsen studierte bis 2015 Physik im Bachelor und Master an der Technischen Universität Dortmund.
- Dr. Johannes Hinckeldeyn**, Oberingenieur am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Nach seiner Promotion in Großbritannien war Johannes Hinckeldeyn als Chief Operating Officer für einen Hersteller von Mess- und Labortechnik für die Batterieforschung tätig. Johannes Hinckeldeyn studierte Wirtschaftsingenieurwesen, Produktionstechnik und –management in Hamburg und Münster.
- Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreutzfeldt**, Professor und Leiter des Instituts für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Nach seinem Maschinenbaustudium mit der Vertiefung Produktionstechnik war Jochen Kreutzfeldt in verschiedenen leitenden Positionen bei einem Unternehmen für Automobilsicherheitstechnik tätig. Anschließend übernahm Jochen Kreutzfeldt eine Professur für Logistik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg und wurde Leiter des Instituts für Produkt- und Produktionsmanagement.
- Adresse: Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg, Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg, Deutschland, Telefon: +49 40 42878-4893, E-Mail: svenja.bahnsen@tuhh.de