

# Rekonfiguration von Intralogistiksystemen mit Hilfe von Simulation unter Einbeziehung von Umfeldbedingungen – Potenzialanalyse

Reconfiguration of intralogistics systems with the help of simulation under consideration of environmental conditions – potential analysis

**Ruben Noortwyck<sup>1</sup>**  
**Tobias Jung<sup>2</sup>**  
**Nasser Jazdi<sup>2</sup>**  
**Robert Schulz<sup>1</sup>**  
**Michael Weyrich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)  
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
Universität Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS)  
Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Stuttgart

**D**ie Anforderungen an die Logistik, speziell an die Intralogistik, sind in den letzten Jahren aufgrund steigender Heterogenität und Dynamik innerhalb der Produktion deutlich gestiegen. Diese Entwicklung wird es nötig machen, dass Intralogistiksysteme regelmäßig an sich ändernde Anforderungen angepasst werden, damit Unternehmen konkurrenzfähig bleiben können. Bevor das Intralogistiksystem auf die neuen Gegebenheiten angepasst werden kann, muss eine Überprüfung von Aufwand und Nutzen stattfinden. Der Zeitpunkt einer Rekonfiguration ist stark abhängig von Umfeldbedingungen. Um Intralogistiksysteme unter sich ändernden Anforderungen zu analysieren und anzupassen, eignen sich Simulationen. Hierzu werden in diesem Forschungsbericht unterschiedliche Möglichkeiten der Simulation sowie mögliche Umfeldbedingungen von Intralogistiksystemen dargestellt. Darüber hinaus werden die Potenziale der Simulation für die Rekonfiguration sowie für das Abbilden der Umfeldbedingungen erörtert.

*[Simulation, Digitalisierung, Umplanung, Intralogistik, Umfeldbedingungen]*

**T**he demands on logistics, especially on intralogistics, have increased significantly in the last few years due to increasing heterogeneity and dynamics within production. This trend will make it necessary for intralogistics systems to be regularly adapted to changing requirements in order to keep companies competitive. Before the intralogistics system can be adapted to the new conditions, a review of effort and benefit should be done. The time for reconfiguration depends on environmental conditions.

**One possibility to reconfigure intralogistics systems under consideration of environmental conditions is simulation. This paper presents different types of simulation as well as possible environmental conditions of intralogistics systems. Furthermore, the potentials of simulation for reconfiguration as well as for mapping the environmental conditions are discussed.**

*[Simulation, digitalization, replanning, intralogistics, environmental conditions]*

## 1 EINLEITUNG

Die Märkte befinden sich im Umbruch. Dies ist vor allem auf die fortschreitende Digitalisierung, die steigende Anzahl an Normen/Vorschriften/Gesetzen, die gestiegenen Kundenanforderungen sowie kürzere Produktlebenszyklen zurückzuführen. Themen wie künstliche Intelligenz, Internet of Things (IoT) oder Big Data Analyse sowie die rasante technologische Entwicklung verändern den Materialfluss und die Warenströme. Darüber hinaus ändern sich durch eine steigende Heterogenität und Dynamik innerhalb der Produktion die Anforderungen an die Logistik. Damit diese gemeistert werden können, muss eine integrierte Betrachtung von Logistik- und Produktionsprozesse stattfinden. [WHK+18] All dies hat großen Einfluss auf intralogistische Prozesse und Systeme.

Aufgrund dieser Veränderungen wird es, um konkurrenzfähig zu bleiben, in Zukunft notwendig sein, Intralogistiksysteme regelmäßig an sich ändernde Anforderungen anzupassen. Bevor das Intralogistiksystem an die neuen

Anforderungen angepasst werden kann, muss eine Überprüfung von Aufwand und Nutzen der Änderung stattfinden. Eine Möglichkeit dafür ist die Simulation. Der Vorliegende Artikel stellt eine Potenzialanalyse für den Einsatz von Simulation zur Änderung von Intralogistiksystemen dar.

## 2 SIMULATION

Simulation ist nach VDI 3633 das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [...]“. [VDI14]

Eine Simulation bietet durch eine variable Veränderung der zugrundeliegenden Parameter die Möglichkeit, unterschiedliche Szenarien sowohl zu planen als auch zu optimieren, ohne dass dabei in das reale System eingegriffen werden muss. [Ele12, S. 6]

Simulation wurde anfangs hauptsächlich für die Planungsabsicherung eingesetzt. Heutzutage wird die Simulation, im gesamten Lebenszyklus intralogistischer Systeme, ausgehend vom Planungs- und Realisierungsprozesses bis hin zur Prozesssteuerung im Betrieb, eingesetzt. Abbildung 1 stellt die Anwendungsgebiete der Simulation übersichtlich dar. [VDI14]

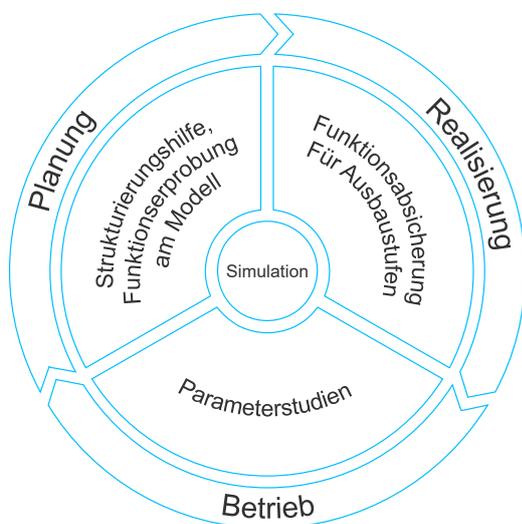


Abbildung 1. Anwendungsfelder der Simulation [VDI14]

Wie bereits aus der vorherigen Grafik zu entnehmen ist, hat sich die Bedeutung und Relevanz der Simulation im Laufe der Zeit verändert. Im nächsten Abschnitt werden die Bedeutung der Simulation und ihre Relevanz genauer beschrieben.

## 2.1 BEDEUTUNG UND RELEVANZ VON SIMULATION

Simulation wurde erstmals in den 1960ern häufiger zur Unterstützung in der Entwicklung verwendet, allerdings nur von Experten für spezifische Probleme. Heute ist sie ein gängiger Ansatz für die Entwicklungsunterstützung und zum Testen von Systemen. Allerdings ist ihr Gebrauch hauptsächlich auf Forschungs- und Entwicklungsabteilungen begrenzt [RWL+15]. In [RWL+15] wird der Digitale Zwilling als nächste Stufe der Simulation vorausgesagt. Der Digitale Zwilling ist eine Integration aller Modelle eines Systems (eines Assets), welcher ein ultrarealistisches, ständig aktuelles Abbild dieses Systems darstellt. Der Digitale Zwilling erfasst zudem sämtliche Prozessdaten des Systems [SCD+12]. Der Idee dieser Version folgend wird in Zukunft ständig eine Simulation parallel zu einem System laufen. In Abbildung 2 sind Phasen in der Entwicklung der Simulation über die letzten Jahrzehnte hinweg dargestellt.

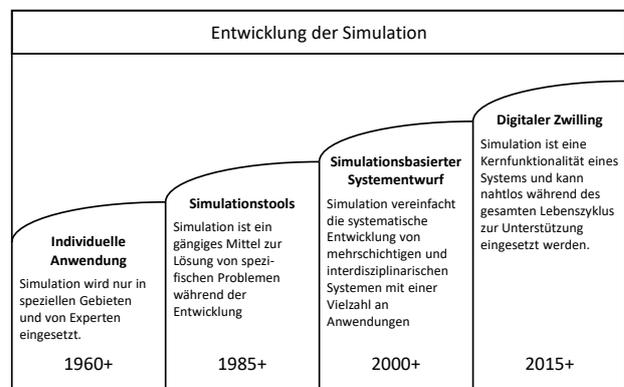


Abbildung 2. Entwicklung der Simulation über die Zeit [RWL+15]

In [Opp16] wird ein deutlicher Anstieg der Bedeutung der Simulation in den nächsten Jahren vorausgesagt. Besonders durch eine nahtlose Simulation während des gesamten Lebenszyklus hinweg können zusätzliche Mehrwerte geschaffen werden [OWB+15]. In [OBU15] wurde eine Umfrage durchgeführt, die diese Steigerung der Bedeutung der Simulation in Zukunft bestätigt. Auch durch den Einsatz von mechatronischen Komponenten beziehungsweise Cyber-Physische Systemen werden Systeme immer komplexer und die Notwendigkeit des Einsatzes von Simulation während des gesamten Lebenszyklus steigt ständig [BR16].

## 2.2 MODELLARTEN

Simulationsmodelle lassen sich nach drei Kriterien einteilen. Das erste Kriterium ist das Verhalten der Zeit, welches im System abgebildet wird. Dabei wird unterschieden in statische und dynamische Modelle. Statische Modelle sind nicht zeitablaufbezogene Modelle. Innerhalb dieser Modelle spielt die Zeit für die Fragestellung keine Bedeutung. Dagegen sind dynamische Modelle zeitbezogen und bilden Änderungen über die Zeit mit ab. [Ada96,

S. 88f.] Beide Modelle können weiter in lineare und nicht lineare Modelle unterschieden werden. Die dynamischen linearen sowie nichtlinearen Modelle sind stabil oder instabil und verlaufen entweder stationär oder transient. Als transient wird die Einschwingphase eines Simulationsmodells bezeichnet. [SM13, S. 285]. In Abbildung 3 wird der transiente und stationäre Zustand dargestellt.

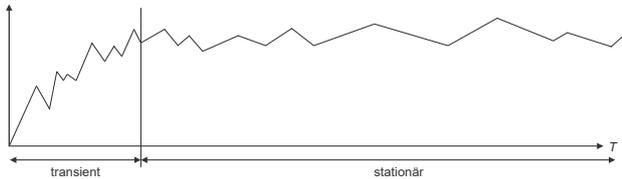


Abbildung 3. Transienter Zustand (Einschwingphase) und stationärer Zustand [SM13, S. 285]

Statische lineare und nichtlineare Modelle können ausschließlich stabil und stationär sein. Abbildung 4 stellt die Einteilung nach dem Verhalten der Zeit nochmals dar.

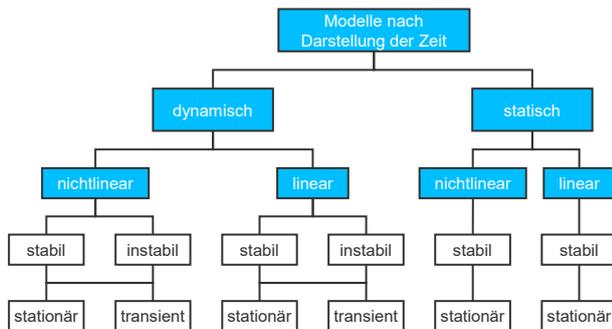


Abbildung 4. Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Darstellung der Zeit in Anlehnung an [Som15, S. 67] und [Pop18, S. 112]

Ein weiteres Kriterium zur Einteilung von Simulationsmodellen ist das Abbildungsmedium. Dieses lässt sich unterteilen in ein materielles und ein immaterielles Abbildungsmedium. Bei Materielle Modelle werden die Systeme durch materielle Strukturen und Zustände abgebildet. Das immaterielle Abbildungsmedium lässt sich wiederum unterteilen in formal und informal. Formale Modelle bilden das System mit Hilfe von Werten und Funktionen ab und sind exakt in ihrer Aussage. Dagegen dienen informale Modelle nur als grobe Richtlinie. Abbildung 5 stellt die beschriebene Unterteilung nochmals dar.

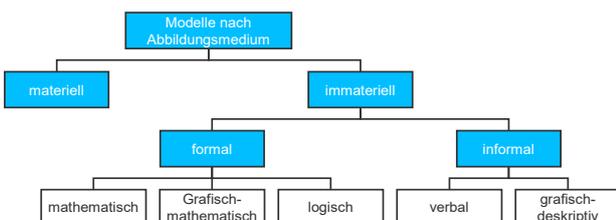


Abbildung 5. Unterscheidung von Modellen in Bezug auf das Abbildungsmedium nach [Hau14, S. 42f.]

Das dritte Kriterium, nach welcher Simulationsmodelle unterteilt werden können, ist die Art der Zustandsübergänge. Dabei lassen sich kontinuierliche (zeitgesteuerte), hybride und diskrete (ereignisgesteuerte) Simulationsmodelle unterscheiden. [VDI14] Die genannten Modellarten lassen sich jeweils in deterministische – d. h. jeder Inputwert besitzt einen vorbestimmten Outputwert – und stochastische Modelle – d. h. Systemvariablen werden zufällig erzeugt – unterteilen. [Sau99, S. 11] In Abbildung 6 wird die beschriebene Einteilung dargestellt.

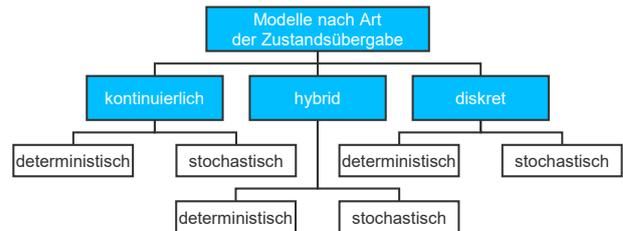


Abbildung 6. Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Zustandsübergänge ([Pop18, S. 114] nach [VDI13, S. 17] und [ECO93, S. 31])

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung der Simulationsmodelle liegt im Aufbau dieser Modelle, welche zentral oder dezentral aufgebaut sein können. Entscheidungen und Algorithmen werden bei zentral aufgebaute Simulationsmodelle mit steigender Anzahl an betrachteten Elementen sehr komplex. Werden die Simulationsmodelle dahingegen dezentral aufgebaut, findet eine Aufteilung der Aufgaben auf Agenten, kleine autonom fungierende Einheiten, statt. Auf die agentenbasierte Simulation wird in Abschnitt 2.3.4 genauer eingegangen. (Vgl. z. B. [BC05])

## 2.3 METHODEN DER SIMULATION

In diesem Abschnitt wird auf verschiedene Methoden der Simulation genauer eingegangen. Dabei wird die kontinuierliche, hybride, diskrete sowie agentenbasierte Simulation betrachtet. Neben den bereits genannten Simulationsmethoden wird in Abschnitt 2.3.5 die Monte-Carlo-Simulation, welche u. a. eingesetzt wird, um Engpässe in der Produktion aufzudecken, sowie in Abschnitt 2.3.6 die System Dynamics Simulation, welche zur Analyse von komplexen und dynamischen Systemen eingesetzt wird, dargestellt.

### 2.3.1 KONTINUIERLICHE SIMULATION

Die kontinuierliche Simulationsmethode bildet den Modellzustand durchgehend über die Zeit ab [VDI18]. Eine kontinuierliche Simulation wird verwendet, wenn der abzubildende Prozess stetig ist und kontinuierliche Größen (z. B. Fertigungsdauer oder die Lieferzeit) verwendet werden. [Sau99, S. 21 f.] Tabelle 1 stellt diese Klassifizierung nochmals dar. Ein Beispiel hierfür sind Simulationen mit Differentialgleichungen. Dabei werden dynamische, deterministische und kontinuierliche Systeme durch Differenti-

gleichungen beschrieben. Beispielsweise können für solche Systeme physikalische Vorgänge genannt werden, deren Differentialgleichungen durch einen Rechner lösbar sind. Wird das Lösen der Differentialgleichungen zu aufwändig oder komplex, so können die Differentialgleichungen im Modell diskretisiert werden. [DLT13]

### 2.3.2 DISKRETE SIMULATION

Innerhalb einer diskreten Simulation ändert sich der Modellzustand sprunghaft zu bestimmten Zeiten oder durch Ereignisse, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten. [VDI18] Diskrete Größen können innerhalb eines gegebenen Intervalls endlich viele Größen annehmen. Sobald der abgebildete Prozess nichtstetig ist, wird eine diskrete Simulation durchgeführt, unabhängig ob die verwendeten Größen kontinuierlich oder diskret sind. Diskrete Größen können z. B. die Anzahl Artikel in einer Warteschlange oder der Lagerbestand sein. [Sau99, S. 21]

Tabelle 1. Klassifizierung nach Größen und Prozessen [Sau19, S. 22]

		Größe	
		kontinuierlich	diskret
Prozess	stetig	kontinuierliche Simulation	
	nichtstetig	diskrete Simulation	

Eine Art der diskreten Simulation ist die ereignisorientierte Simulation (DES), auch bezeichnet als Discrete-Event-Simulation. Die DES wird zur Simulation von Diskreten-Event-Systemen eingesetzt. Diskrete-Event-Systeme sind dynamische Systeme, die ihren Zustand nur zu bestimmten Zeitpunkten (Events) ändern. Zwischen diesen Zeitpunkten ändert sich der Zustand des Systems, im Gegensatz zu kontinuierlichen Systemen, nicht [Fuj90]. Somit gibt es auch nur zu diesen bestimmten Zeitpunkten einen Simulationsfortschritt, weil zwischen diesen Zeitpunkten eine Simulation nicht benötigt wird, da sich das System zu diesen Zeitpunkten ebenfalls nicht ändert [SBS14]. Tritt ein Ereignis auf, so wird der dazugehörige Code (Ereignisroutine) in der Simulation ausgeführt [Fis13]. Ereignisse können hierbei voneinander abhängig sein oder völlig unabhängig auftreten [Mat08]. Die Verwaltung der Ereignisse und der Simulationszeit erfolgt durch einen Steuerungsalgorithmus, welcher zentral und unabhängig von der Anwendung ausgeführt wird [Fis13].

### 2.3.3 HYBRIDE SIMULATION

Die hybride Simulation ist eine Kopplung von einem kontinuierlichen und einem diskreten Simulationsmodell. Dadurch kann ereignisdiskretes und zeitkontinuierliches Verhalten gemeinsam abgebildet werden. [Ele12, S. 13]

### 2.3.4 AGENTENBASIERTE SIMULATION

Eine Simulation mit agentenbasierter Modellierung ist im Gegensatz zur Diskrete-Event-Simulation dezentral

aufgebaut [BF04]. In der agentenbasierten Simulation werden die einzelnen Bestandteile eines Systems mit ihrem entsprechenden Verhalten modelliert und das Verhalten des Gesamtsystems ergibt sich aus der Interaktion der einzelnen Bestandteile. Bei der agentenbasierten Simulation werden aktive Objekte des realen Systems als aktive Agenten modelliert [Dor03]. Diese Agenten können genauso wie die realen Objekte mit ihrer Umwelt interagieren und mit Sensoren diese erfassen [MN10]. Hierbei verfolgt jeder Agent Zielkriterien und führt Aktionen, welche von seiner Umwelt, seinem Zustand und den Interaktionen mit anderen Agenten abhängen, aus [COT13].

### 2.3.5 MONTE-CARLO-SIMULATION

Mit einer Monte-Carlo-Simulation werden stochastische Systeme modelliert und simuliert. Dabei werden Lösungen von Problemen, welche nicht oder nur sehr schwer analytisch lösbar sind, durch statistische Verteilungen angenähert, wie zum Beispiel die Berechnung von  $\pi$  [BH10].

### 2.3.6 SYSTEM DYNAMICS

Bei der systemdynamischen Simulation werden Differentialgleichungen von dynamischen, kontinuierlichen, deterministischen Systemen durch Wirkungsketten und Flussdiagramme modelliert. Somit wird die Handhabung der Differentialgleichungen für den Nutzer vor allem bei komplexen Systemen vereinfacht [For13].

## 2.4 SIMULATIONSPHASEN

Klassischer Weise müssen zur Erstellung und Durchführung einer Simulation mehrere Phasen durchgeführt werden, welche oftmals mehrfach durchlaufen werden müssen. In [Bun09] werden folgende Phasen einer Simulation definiert:

**Modellierung:** Als Erstes wird ein Modell des zu simulierenden Systems erstellt. Hierbei erfolgt eine Fokussierung auf die relevanten Aspekte des Systems, um eine möglichst ressourcenschonende Simulation zu ermöglichen.

**Berechnung:** Die im Modell enthaltenen Berechnungsalgorithmen müssen aufbereitet werden, damit es auf im Computer verarbeitet werden kann und geeignete Algorithmen ausgewählt werden können.

**Visualisierung:** Eine weitere Herausforderung bei der Simulation ist die Aufbereitung und Darstellungen der Simulationsergebnisse, welche entsprechend visualisiert werden müssen.

**Validierung:** Die Simulationsergebnisse müssen noch zusätzlich validiert und überprüft werden, da im Modell selbst oder bei seiner Verarbeitung Fehler auftreten können, welche zu einer Abweichung des Simulationsergebnisses von einem realen Ergebnis führen können.

**Einbettung:** Oftmals muss die Simulation noch in einem entsprechenden Kontext eingebettet werden, wie zum Beispiel durch Integration in einen Entwicklungsprozess.

Werden die einzelnen Phasen mehrfach durchlaufen, so gehen die aus einem vorhergegangenen Durchlauf gewonnenen Erkenntnisse in den nächsten Durchlauf mit ein. Hierdurch hängen die einzelnen Phasen stark voneinander ab und können nicht komplett voneinander getrennt behandelt beziehungsweise umgesetzt werden. Unter Simulation werden klassischer Weise hauptsächlich die ersten beiden Phasen verstanden [Bun09].

## 2.5 SIMULATIONSPROGRAMME

In den letzten Jahren wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationsprogramme (Simulationswerkzeuge) entwickelt. Diese können nach der Allgemeingültigkeit, dem Anwendungsbezug, der Modellierungsfreiheit und der Modellierungseffizienz eingeordnet werden. ([WN00, S. 425-427], [Ele12, S. 10]) Abbildung 7 stellt eine mögliche Einordnung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge der Produktion und Logistik dar.

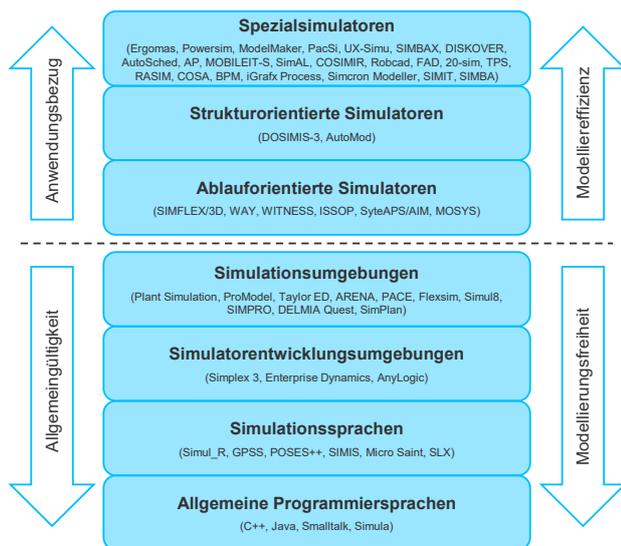


Abbildung 7. Zuordnung von Simulationsebene und Simulationsprogrammen ([Pop18, S. 119] in Anlehnung an [KRW93, S. 291 ff], [Noc06, S. 10], [Ele12, S. 10] nach [Wen00, S. 9])

Allgemeine Programmiersprachen wie z. B. C++ oder Java sind sehr allgemeingültig und werden neben der Simulation für unterschiedlichste Problemstellungen verwendet. Dagegen sind Simulationssprachen, wie beispielsweise MATLAB oder SLX, höhere Programmiersprachen, die speziell für Problemstellungen der Simulation entwickelt wurden. [VDI18, S. 19] Simulatorentwicklungsumgebungen oder Simulationentwicklungswerkzeuge dienen der Entwicklung einer Simulation und sind vergleichbar mit einem CASE (Computer Aided Software Engineering)-Tool. Dabei werden alle benötigten Simulatorkomponenten in einem Paket zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz

dazu ermöglicht eine Simulationsumgebung die Ausführung einer Simulation und gegebenenfalls dessen Änderung. Änderungen können z. B. das Hinzufügen von Bausteinen oder Funktionen sein. [VDI18] Ablauforientierte Simulationen, strukturorientierte Simulationen und Spezialsimulationen sind sehr anwendungsbezogen und daher ausschließlich für einen begrenzten Bereich einsetzbar. Diese besitzen im Vergleich zu den allgemeinen Programmiersprachen oder Simulationssprachen vorgefertigte Bausteine und Methoden, wodurch eine schnelle Modellimplementierung ermöglicht wird. [Ele12, S. 10f.]

## 2.6 CO-SIMULATION

Es ist nicht immer möglich jegliche Komponenten mit allen erdenklichen Aspekten in einem Simulationstool abzubilden. In solchen Fällen werden für die Simulation eines Systems oder einer Komponente für bestimmte Aspekte spezialisierte Simulationstools benötigt [HKL+14]. Bei solchen Problemen werden die unterschiedlichen Aspekte in geeigneten Simulationstools simuliert und die Simulationstools gekoppelt, um die Abhängigkeiten zwischen den Teilaspekten zu realisieren [Sch15]. Diese Kopplung von unterschiedlichen Simulationstools wird als Co-Simulation (cooperative simulation) bezeichnet. Beispiele für den Einsatz von Co-Simulation sind Multiphysikalische Simulationen [GJV+16] und Simulationen, bei denen sowohl Hardware als auch Software simuliert wird [KSB+16]. Somit kann Co-Simulation für die Simulation einzelner Komponenten mit verschiedenen Aspekten eingesetzt werden. Co-Simulation kann aber auch für die Simulation von Systemen mit mehreren Komponenten eingesetzt werden, die individuell modelliert werden [SWA+13].

Eine Co-Simulation kann aus zwei oder mehr gekoppelten Simulationstools bestehen [FL00]. Besteht eine Co-Simulation nur aus zwei Simulationstools, so können diese direkt aufeinander abgestimmt werden. Oftmals werden aber mehr als zwei Simulationstools benötigt, weshalb eine direkte Abstimmung nicht immer wünschenswert ist, um eine leichte Erweiterung um weitere Simulationstools zu ermöglichen.

### 2.6.1 KOPPLUNG IN CO-SIMULATIONEN

Co-Simulation lässt sich in iterative Kopplung und in nichtiterative Kopplung unterteilen [BZW+12]. Bei der iterativen Kopplung werden die einzelnen Simulationen mehrfach für jeden Zeitschritt ausgeführt und nach jeder Iteration miteinander abgeglichen, bis ein Abbruchkriterium erreicht wurde [KS00]. Die nichtiterative Kopplung kann noch in parallele und sequentielle Co-Simulation unterteilt werden [BZW+12]. Die parallele Co-Simulation wird als Jacobi-Schema bezeichnet und die sequentielle Co-Simulation als Gauß-Seidel-Schema [Bus12].

## 2.6.2 SYNCHRONISIERUNG VON CO-SIMULATIONEN

Traditionell werden Synchronisationsmethoden in konservative und optimistische Synchronisation unterteilt [Fuj90].

Konservative Mechanismen gewährleisten, dass bei der diskreten Ereignissimulation kein Ereignis außer der Reihe verarbeitet wird und dass bei der kontinuierlichen Simulation keine Nachricht verzögert oder zu spät empfangen wird. Das heißt, alle Teilsimulationen werden für ein bestimmtes Zeitintervall bzw. einen bestimmten Simulationsschritt fortgeführt und müssen anschließend warten, bis alle anderen Simulationen ebenfalls dieses Zeitintervall, bzw. Simulationsschritt abgeschlossen haben [JLW13]. Allen diesen Mechanismen ist gemeinsam, dass jedes Ereignis und jede Nachricht einen Zeitstempel erfordert, um die Vermeidung von Kausalitätsfehlern zu gewährleisten.

Optimistische Synchronisationsalgorithmen ermöglichen Kausalitätsfehler und haben die Fähigkeit, diese zu erkennen. Wurde ein Kausalitätsfehler in einer Simulation festgestellt, muss die Simulation zurückgesetzt werden, d.h. alle vorhergehenden Simulationsergebnisse müssen rückgängig gemacht werden, bis der Kausalitätsfehler behoben ist. Vor dem Auftreten eines Kausalitätsfehlers sind die Simulationen einer Co-Simulation nicht synchronisiert und laufen daher unabhängig voneinander und werden nur bei einem Kausalitätsfehler synchronisiert. Einer der bekanntesten optimistischen Synchronisationsalgorithmen ist der "Time Wrap Algorithmus" von Jefferson [Jef85].

## 2.6.3 DYNAMISCHE CO-SIMULATION

Die meisten klassischen Co-Simulationsumgebungen lassen kein Einbinden von neuen Teilsimulationen zur Laufzeit in die Co-Simulation zu. Allerdings wird die mit der Einführung des Digitalen Zwillinges notwendig, da dieser Simulationen parallel zum Betrieb des realen Systems ausführt. Gerade Logistiksysteme sind allerdings dynamische Systeme, in die zur Laufzeit Komponenten ein- und austreten. Um diese Ein- und Austritte ebenfalls co-simulieren zu können werden Konzepte einer dynamischen Co-Simulation benötigt. Ein möglicher Ansatz ist die Verwendung von Softwareagenten. [JJW18]

## 3 UMFELDBEDINGUNGEN EINES INTRALOGISTIKSYSTEMS

Umfeldbedingungen sind die Eigenschaften des Standorts bzw. des Umfelds eines intralogistischen Systems, welche die Attraktivität des Standorts beschreiben. [Tre17, S. 25] Diese können in weiche (unternehmensbezogene und personenbezogene) und harte Faktoren unterteilt werden. [Hen12] Im Folgenden werden beide Arten von Umfeldbedingungen in Bezug auf ein Intralogistiksystem beschrieben.

## 3.1 WEICHE UMFELDBEDINGUNGEN

Weiche oder auch qualitative Umfeldbedingungen lassen sich in unternehmensbezogene und personenbezogene Faktoren unterteilen. Diese weichen Faktoren sind meist subjektive Einschätzungen und daher schwer zu erfassen. Trotzdem sind weiche Umfeldfaktoren von großer Bedeutung bei der Neu- bzw. Umplanung von intralogistischen Systemen, da im mitteleuropäischen Raum heutzutage die meisten harten Umfeldbedingungen erfüllt sind. [Hen12]

### 3.1.1 UNTERNEHMENSBEZOGENE FAKTOREN

Unternehmensbezogene Umfeldbedingungen sind Faktoren, welche eine direkte Auswirkung auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens haben [Hen12]. Diese Faktoren werden im Folgenden beschrieben.

#### Lebensqualität:

Die Lebensqualität, welche bei einer Neuplanung zu den wesentlichen qualitativen Faktoren zählt, beeinflusst die regionale Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens und berücksichtigt ökonomische, ökologische und soziale Aspekte. [Tre17, S. 56 f.] Eine attraktive Umgebung hinsichtlich der Lebensqualität erleichtert die Einstellung von hochqualifizierten Arbeitskräften. [PFM17, S. 75; Flo02]

Der unternehmensbezogene Faktor Lebensqualität kann von einem Unternehmen maßgeblich beeinflusst werden. So ist die Lebensqualität z. B. von der Wertschätzung der Mitarbeiter, der Arbeitsplatzsicherheit, der Sozialleistungen des Unternehmens, der Büroraumsituation/Arbeitsplatz usw. abhängig. Neben den durch das Unternehmen beeinflussbaren Faktoren gibt es Faktoren, welche von der Region abhängig sind und daher nicht vom Unternehmen beeinflusst werden können. Zu den nicht beeinflussbaren Faktoren zählen z. B. die allgemeine Sicherheit in der Region, vorhandene Schulen, der Wohnungsmarkt (Angebot, Preise), Einkaufsmöglichkeiten, Gastronomie usw. [Ten17, S. 59]

#### Image des Standorts:

Neben den direkt wahrnehmbaren Faktoren der Lebensqualität ist auch das Image des Standorts zu den unternehmensbezogenen Faktoren zu zählen. Das Image eines Standorts ist als subjektives Gesamtbild zu verstehen, das von einer oder mehrerer Personen ausgeht. Dabei entsteht das Image aus einer großen Anzahl an Informationen und ist daher stark von der Wahrnehmung der Betrachter abhängig. Das Image eines Standorts trägt auf der einen Seite zu einer guten Werbewirksamkeit der Firma auf der anderen Seite zur Attraktivität einer Umgebung bei. [Joh71; KG13]

### **Mentalität:**

Entscheidend für die Produktivität eines Intralogistiksystems und damit auch für den Erfolg eines Unternehmens ist unter anderem die Arbeitseinstellung, die Leistungsbereitschaft sowie die Motivation der Beschäftigten. Diese hängen stark mit der Mentalität zusammen und sind abhängig von regionalen und nationalen Wertesystemen. [KLR06, S. 62]

### **3.1.2 PERSONENBEZOGENE FAKTOREN**

Weiche bzw. personenbezogene Faktoren sind für die Lebensqualität der Beschäftigten bedeutsam und sind für hochqualifizierte Arbeitnehmer von großer Bedeutung [Hen12]. Diese Faktoren werden im Folgenden beschrieben.

#### **Lebensqualität:**

Die Lebensqualität ist neben den unternehmensbezogenen Faktoren auch den personenbezogenen Faktoren einer Neuplanung zuzuordnen. Dabei fließen neben den bereits genannten objektiven Faktoren der Lebensqualität subjektive Faktoren, welche unterschiedlich wahrgenommen werden, bei der Bewertung mit ein. Diese können z. B. die Qualität des Wohnumfelds, der Freizeitwert, die Umweltqualität, die Qualität der sozialen Infrastruktur usw. sein. [Hen12]

#### **Persönliche Gründe:**

Persönliche Gründe sind von einzelnen Personen selbst abhängig und haben daher keine direkte Wirkung auf das unternehmerische Handeln. Daher sind persönliche Gründe bei einer Neuplanung nicht ausschlaggebend. Persönliche Gründe können z. B. der Bezug zu einem Ort bzw. einer Region durch Vorlieben sein oder die Bindung an einen Heimatort aufgrund Freunde und Familie.

### **3.2 HARTE UMFELDBEDINGUNGEN**

Harte bzw. quantitative Umfeldbedingungen lassen sich im Vergleich zu den weichen Umfeldbedingungen in der Größe und in ihrem Ausmaß erfassen. Diese Umfeldbedingungen werden bei einer Neuplanung bereits früh in den Planungsprozess mit aufgenommen [Hen12].

#### **Infrastruktur:**

Die infrastrukturellen Gegebenheiten sind einer der wichtigsten Umfeldbedingungen bei der Planung eines intralogistischen Systems und Grundvoraussetzung für einen funktionierenden Materialfluss. Die Infrastruktur eines Intralogistiksystems umfasst die Verkehrsanbindung, die Energieversorgung, vorhandenes Internet sowie Ver- und Entsorgungseinrichtungen in der Umgebung. [KLR06, S. 62]

### **Flächenverfügbarkeit / Grundstücksqualität:**

Die Flächenverfügbarkeit sowie die Grundstücksqualität sind mit die wichtigsten Faktoren bei einer Neu- bzw. Umplanung. Ist die Fläche nicht in der benötigten Größe und Qualität verfügbar, kann das Planungsvorhaben nicht durchgeführt werden. Unter dem Begriff Grundstücksqualität werden nach [Mar16, S. 489] z. B. die Lage, Boden-tragfähigkeit, Bodenbeschaffenheit, Grundwasserstand, Topografie, Erschließungsgrad, Nutzungsart angrenzender Grundstücke usw. zusammengefasst.

#### **Erreichbarkeit:**

Die Erreichbarkeit eines intralogistischen Systems ist eng mit der vorhandenen Infrastruktur verbunden. Dabei ist es wichtig, dass die Kunden gut erreicht werden können, aber auch das intralogistische System gut erreicht wird. In Deutschland wird als Indikator der Erreichbarkeit häufig die Entfernung zum nächsten Autobahnnetz betrachtet. [Bus13, S. 193-197]

#### **Gesetzliche Rahmenbedingungen:**

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen unterscheiden sich zwischen einzelnen Ländern teils enorm und müssen sowohl vor einer Neuplanung als auch vor einer Umplanung betrachtet und eingehalten werden. Gesetzliche Rahmenbedingungen können z. B. Arbeitszeiten, Mindestlohn, Steuern, unterschiedliche Genehmigungen, Umweltauflagen usw. sein. In direkter Verbindung zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen steht die politische Situation bzw. Stabilität, welche im Rahmen einer Neuplanung aber auch einer Umplanung ein wichtiger Aspekt ist.

#### **Märkte:**

Wichtig bei der Neu- bzw. Umplanung von Intralogistiksystemen ist das aktuelle Marktpotenzial, welches einen direkten Einfluss auf den Absatzmarkt und die Auftragslage eines Unternehmens hat. Neben dem aktuell vorhandenen Marktpotenzial haben auch Schwankungen der Märkte oder das Auftreten volkswirtschaftlicher Schocks einen direkten Einfluss auf ein Unternehmen. Volkswirtschaftliche Schocks können durch Veränderungen z. B. der Rohstoffpreise, der Lohn- und Gehaltskosten, Steuern, Naturkatastrophen, Wechselkurse usw. ausgelöst werden.

## **4 POTENZIALE DER SIMULATION BEI REKONFIGURATION VON INTRALOGISTIKSYSTEMEN**

In den vorherigen Kapiteln wurden unterschiedliche Simulationsmethoden, welche sich für eine Rekonfiguration von Intralogistiksystemen eignen könnten, beschrieben. Des Weiteren wurden Umfeldbedingungen, welche einen Einfluss auf die Planung von intralogistischen

Systemen haben, dargestellt. Im Folgenden werden die Potenziale dieser Simulationsmethoden zur Rekonfiguration und zur Abbildung von Umfeldbedingungen aufgezeigt.

#### 4.1 REKONFIGURATION

Für die Rekonfiguration von Intralogistiksystemen ist ein essenzieller Punkt die Möglichkeit unterschiedliche Zustände von Materialflusssystemen abzubilden. Im logistischen Kontext werden hierzu meist ereignisdiskrete Simulationen verwendet. Darüber hinaus können hybride oder agentenbasierte Simulationen verwendet werden. Die Verwendung von kontinuierlichen Simulationsmodellen ist für eine Rekonfiguration grundsätzlich möglich, jedoch nicht notwendig, da sich der Systemzustand in intralogistischen Materialflusssystemen meist ereignisbezogen ändert. Die agentenbasierte Simulation bietet die Möglichkeit ein Simulationsmodell dezentral aufzubauen. Dies ist z. B. bei fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) von Vorteil, damit sich die FTF selbständig den optimalen Weg suchen können. Bei der Rekonfiguration von Intralogistiksystemen können neben FTF auch andere verwendete Ressourcen dezentral gesteuert werden. Ein Einsatz zur Rekonfiguration von Intralogistiksystemen ist möglich.

#### 4.2 UMFELDBEDINGUNGEN

Die in Abschnitt 3.1 und 3.2 dargestellten Umfeldbedingungen können mit unterschiedlichen Simulationsmethoden simuliert werden.

Faktoren wie die Flächenverfügbarkeit, die persönlichen Gründe, die gesetzlichen Rahmenbedingungen u. a. können bei der Rekonfiguration nicht simuliert werden. Diese müssen als Parameter hinterlegt werden. Faktoren wie die Rohstoffpreise oder Schwankungen der Märkte können in einem kontinuierlichen Modell simuliert werden. Darüber hinaus kann eine System Dynamics Simulation verwendet werden, welche, wie bereits erwähnt, zur Analyse von komplexen und dynamischen Systemen, wie z. B. zur Simulation von sozioökonomischen Systemen, eingesetzt wird.

### 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in diesem Artikel beschriebenen Simulationsmethoden besitzen sowohl in der separaten Betrachtung von Rekonfiguration oder Umfeldbedingungen intralogistischer (Materialfluss-)Systeme als auch in der gemeinsamen Betrachtung Einsatzmöglichkeiten. Vielversprechend für die Rekonfiguration von intralogistischen Systemen unter Betrachtung von Umfeldbedingungen scheint die Co-Simulation zu sein. Mit Hilfe der Co-Simulation können Konfigurationen von Intralogistiksystemen sowie unterschiedliche Umfeldbedingungen simuliert und miteinander gekoppelt werden.

Die dargestellten Umfeldbedingungen eines Intralogistiksystems können noch weiter ergänzt werden. Nicht alle dargestellten Einflussgrößen lassen sich objektiv ermitteln. Einflussgrößen wie z. B. die Qualität des Wohnumfelds oder der Freizeitwert sind sehr subjektiv und von Person zu Person unterschiedlich. Diese Einflussfaktoren könnten im Vorfeld für eine Region empirisch z. B. durch Umfragen ermittelt werden. Die Auswahl und Erhebung solcher Daten sowie die Bestimmung der Gewichtungen, mit welchen diese Faktoren in die Simulation eingehen, werden das Simulationsergebnis erheblich beeinflussen. Als Forschungsaufgabe muss deshalb neben dem Erstellen einer solchen integrierten Simulation auch das Unterstützen des Anwenders bei der Entscheidungsfindung angesehen werden. Im Rahmen der Rekonfiguration muss der Anwender anschließend entscheiden, welche Einflussgrößen inklusive deren Gewichtung in Bezug auf seine Problemstellung relevant sind und welche nicht.

Durch die fortschreitende Digitalisierung und die daraus resultierenden technologischen Fortschritte ergeben sich neue Möglichkeiten im Bereich der Rekonfiguration von Intralogistiksystemen unter Betrachtung von Umfeldbedingungen.

Von der Planung bis hin zur Inbetriebnahme von Intralogistiksystemen entsteht heutzutage eine Vielzahl an digitalen Modellen, wovon einige simulationsfähig sind. Diese digitalen Modelle werden häufig anschließend nicht mehr betrachtet. Jedoch kann durch die Weiterverwendung und Verknüpfung dieser verschiedenen digitalen Abbilder eines Intralogistiksystems ein digitales Gesamtbild, Digital Twin genannt, des realen Systems entstehen. Durch dieses digitale Abbild kann unter gegebenen technischen Voraussetzungen eine Echtzeitsimulation stattfinden. Dabei werden Prozesse simuliert, welche in der Realität aktuell stattfinden. Des Weiteren besteht durch ein digitales Abbild die Möglichkeit, das System zu zukünftigen Zeitpunkten zu simulieren. Dadurch können Lieferengpässe, benötigte Kapazitäten usw. prognostiziert werden und frühzeitig Anpassungen an dem realen System vorgenommen werden.

## LITERATUR

- [Ada96] Adam, Dietrich: Planung und Entscheidung: Modelle – Ziele – Methoden. 4. Auflage, Gabler, Wiesbaden, 1996.
- [BC05] Babiceanu, Radu F.; Chen, Frank F.: Performance evaluation of agent-based material handling systems using simulation techniques. Winter Simulation Conference, Proceedings, 2005, S. 1022–1028.
- [BF04] Borshchev, Andrei; Filippov, Alexei: From System Dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Vol. 22, Oxford, 2004.
- [BH10] Binder, Kurt; Heermann, Dieter W.: Monte Carlo Simulation in Statistical Physics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [BR16] Boschert, Stefan; Rosen, Roland: Digital Twin – The Simulation Aspect. In Hehenberger, Peter; Bradley, David: Mechatronic Futures – Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers. Springer International Publishing, S. 59–74.
- [Bun09] Bungartz, Hans-Joachim: Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Bus12] Busch, Martin: Zur effizienten Kopplung von Simulationsprogrammen. Dissertation, Universität Kassel, Kassel University Press, 2012.
- [Bus13] Busch, Roland: Logistikimmobilienstandorte in Deutschland – Raumstrukturen und räumliche Entwicklungstendenzen. Eine quantitative Untersuchung mit Hilfe der Baufertigstellungs- und Beschäftigtenstatistik. Dissertation, Universität Wuppertal, 2013.
- [BZW+12] Benedikt, Martin; Zehetner, Josef; Watzel, Daniel; Bernasch, Jost: Moderne Kopplungsmethoden - Ist Co-Simulation beherrschbar? NAFEMS Seminar – Die Rolle von CAE in der Systemsimulation, 2012, S. 63–74.
- [COT+13] Chen, Xianshun; Ong, Yew-Soon; Tan, Puay-Siew; Zhang, NengSheng; Li, Zhengping: Agent-Based Modeling and Simulation for Supply Chain Risk Management - A Survey of the State-of-the-Art. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), proceedings, 2013, S. 1294–1299.
- [DLT13] Dhatt, Gouri; Lefrançois, Emmanuel; Touzot, Gilbert: Finite Element Method. ISTE. Wiley, London, 2013.
- [Dor03] Dornhaus, Anna: Multi-agent modelling in comparison to standard modelling. AIS November 2003.
- [ECO93] Elmqvist, Hilding; Cellier, Francois; Otter, Martin: Object-Oriented Modeling Of Hybrid Systems. In: European Simulation Symposium, Proceedings, 1993, S. 261–276.
- [Ele12] Eley, Michael: Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeugzugs „Plant Simulation“. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Fis13] Fishman, George S.: Discrete-event simulation. Modeling, programming, and analysis. Springer Science & Business Media, New York, 2013.
- [FL00] Farhat, Charbel; Lesoinne, Michael: Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems. In Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 182 (3-4) 2000, S. 499–515.
- [Flo02] Florida, Richard: The Rise of the Creative Class. Basic Books, New York, 2002.
- [For13] Forrester, Jay W.: Industrial dynamics. Martino; MIT Press, 2013.
- [Fuj90] Fujimoto, Richard M.: Parallel discrete event simulation. Communication of the ACM 33(10), S. 30–53.
- [GJV+16] Grabmaier, Sebastian; Jüttner, Matthias; Vögeli, Desirée; Rucker, Wolfgang; Göhner, Peter: Numerical Framework for the Simulation of Dielectric Heating Using Finite and Boundary Element

- Method. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 31(2), 2016, S. 1-10.
- [Hau14] Haun, Matthias: *Cognitive Computing: Steigerung des systemischen Intelligenzprofils*. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Hen12] Henke, Jutta: *Infoblatt Harte und weiche Standortfaktoren*, Ernst Klett Verlag, Leipzig, 2012.
- [HKL+14] Heinzl, Bernhard; Kastner, Wolfgang; Leobner, Ines; Dür, Fabian., Bleicher, Friedrich; Kovacic, Iva: *Using coupled simulation for planning of energy efficient production facilities*. In: *Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, IEEE, 2014, S. 1–6.
- [Jef85] Jefferson, David R.: *Virtual time*. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, 7(3), 1985, S. 404–425.
- [JJW18] Jung, Tobias; Jazdi, Nasser; Weyrich, Michael: *Dynamische Co-Simulation von Automatisierungssystemen und ihren Komponenten im Internet der Dinge*. VDI-Kongress Automation, Baden-Baden, 2018.
- [JLW13] Jafer, Shafagh; Liu, Qi; Wainer, Gabriel: *Synchronization methods in parallel and distributed discrete-event simulation*. In *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2013, S. 54–73.
- [Joh71] Johannsen, Uwe: *Das Marken- und Firmen-Image: Theorie, Methodik, Praxis*. Duncker und Humboldt, Berlin, 1971.
- [KLR06] Kreuz, Arno; Lindner, Paul; von der Ruhren, Nobert: *Fundamente Kursthemmen: Industrie / Dienstleistungen*, Klett, 2006.
- [KRW93] Kuhn, Axel; Reinhardt, Adolf; Wiendahl, Hans-Peter: *Handbuch Simulationsanwendung in Produktion und Logistik*. Vieweg, Braunschweig, 1993.
- [KS00] Kübler, Ralf; Schiehlen, Werner: *Two Methods of Simulator Coupling*. In *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2000, 6(2), S. 93–113.
- [KSB+16] Kleinert, Bruno; Schäfer, Franziska; Bakakeu, Jupiter, Wieß, Simone; Fey, Dietmar: *Hardware-software Co-simulation of Self-organizing Smart Home Networks - Who am I and Where Are the Others?* In: *Proceedings of the 6th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, SIMULTECH*, S. 304–311.
- [KG13] Kroeber-Riel, Werner; Gröppel-Klein, Andrea: *Konsumentenverhalten*. 10. Auflage, Vahlen, München, 2013.
- [Mar16] Martin, Heinrich: *Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit*. 10. Auflage. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [Mat08] Matloff, Norm: *Introduction to discrete-event simulation and the simply Language*. Dept of Computer Science. University of California at Davis. Retrieved on August, 2(2009), 2008, S. 1–33.
- [MN10] Macal, Chales M.; North, Michael J.: *Tutorial on agent-based modelling and simulation*. In: *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. December 4(3), 2010, S. 151–162.
- [Noc06] Bernd, Noche: *Simulationsinstrumente in Produktion und Logistik – eine Marktübersicht*. Forum Digitale Logistik LogiMAT Stuttgart, 2006.
- [OBU15] Oppelt, Mathias; Barth, Mike; Urbas, Leon: *The Role of Simulation within the Life-Cycle of a Process Plant*. Results of a global online survey, 2015.
- [Opp16] Oppelt, Mathias: *Towards an integrated use of simulation within the life-cycle of a process plant*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Shaker, Aachen, 2016.
- [OWB+15] Oppelt, Mathias, Wolf, Gerrit; Barth, Mike; Urbas, Leon: *Simulation im Lebenszyklus einer Prozessanlage*. atp edition, 2015, 57 (9), S. 46–59.
- [PFM17] Pfannenstiel, Mario A.; Focke, Axel; Mehlich, Harald: *Management von Gesundheitsregionen II – Regionale Ver-*

- netzungsstrategien und Lösungsansätze zur Verbesserung der Gesundheitsversorgung. Springer, Wiesbaden, 2017.
- [Pop18] Popp, Julian: Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band. Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker, 2018.
- [RWL+15] Rosen, Roland; von Wichert, Georg; Lo, George; Bettenhausen, Kurt. D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48 (3), S. 567–572.
- [Sau99] Sauerbier, Thomas: Theorie und Praxis von Simulationssystemen. Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1999.
- [SBS14] Schriber, Thomas J.; Brunner, Daniel T.; Smith, Jeffrey S.: Inside discrete-event simulation software: How it works and why it matters. In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. December 7(10), 2014: S. 132–146.
- [SCD+12] Shafto, Mike; Conroy, Mike; Doyle, Rich; Glaessgen, Ed H.; Kemp, Chris; LeMoigne, Jacqueline; Wang, Lui: Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Technology Area, 11, 2012.
- [Sch15] Schmoll, Robert: Co-Simulation und Solverkopplung. Analyse komplexer multiphysikalischer Systeme. Dissertation, Universität Kassel, Kassel University Press GmbH, 2015.
- [SM13] Suhl, Leena; Mellouli, Taieb: Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3. Auflage, Springer, Gabler, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Som15] Sommer, Tobias: Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Betrachtung des Umschlags. Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker, 2015.
- [SWA+13] Stifter, Matthias; Widl, Edmund; Andren, Filip; Elsheikh, Atiyah; Strasser, Thomas; Palensky, Peter: Co-simulation of components, controls and power systems based on open source software. In IEEE Power and Energy Society general meeting, 2013, S. 1–5.
- [Tre17] Tretter, Michael: Standort- und Regionalentwicklung als strategische Aufgabe multinationaler Unternehmen – Eine unternehmerische Perspektive auf regionale Zusammenhänge. Dissertation, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt. Springer, Wiesbaden, 2017.
- [VDI13] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe. Düsseldorf, 2013.
- [VDI14] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Düsseldorf, 2014.
- [VDI18] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe. Düsseldorf, 2018.
- [Wen00] Wenzel, Sigrid: Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. 14. ASIM – Symposium Simulationstechnik, Hamburg, 2000.
- [WHK+18] Wehking, Karl-Heinz; Hofmann, Matthias; Korte, David; Hagg, Manuel; Pfleger, David: Automobilproduktion im Wandel. In: Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. (Hg.): Digitales trifft Reales. Kongressband – 35. Deutscher Logistik-Kongress, 2018, Hamburg: DVV Media Group. S. 299–322.
- [WN00] Wenzel, Sigrid; Noche, Bernd: Simulationsinstrumente in Produktion und Logistik – Eine Marktübersicht. In: The New Simulation in Production and Logistics: Prospects, Views and Attitudes, 2000, S. 423–432.

---

**Ruben Noortwyck, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 83475  
E-Mail: [ruben.noortwyck@ift.uni-stuttgart.de](mailto:ruben.noortwyck@ift.uni-stuttgart.de)

**Tobias Jung, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS), Universität Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 67299  
E-Mail: tobias.jung@ias.uni-stuttgart.de

**Dr.-Ing. Nasser Jazdi**, Akademischer Oberrat am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS), Universität Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 67303  
E-Mail: nasser.jazdi@ias.uni-stuttgart.de

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz**, Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 83771  
E-Mail: robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich**, Institutsleiter des Instituts für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS), Universität Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 67301  
E-Mail: michael.weyrich@ias.uni-stuttgart.de

**Adressen:**

Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15 B, D-70174 Stuttgart

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, D-70550 Stuttgart