

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik

Projektarbeit

Untersuchung der Einsatzfähigkeit eines
Tabellenkalkulationsprogrammes zur
Simulation von Problemstellungen innerhalb
des Inventory Managements

Alexander Eskuchen

Studiengang	Maschinenbau
Matrikelnummer	148785
Thema ausgegeben am	14.05.2018
Arbeit eingereicht am	14.11.2018
Erstprüfer	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe
Zweitprüfer	M. Sc. Astrid Klüter

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einleitung	1
2 Inventory Management	3
2.1 Grundlagen und Zielstellungen des Inventory Managements	3
2.2 Typische Problemstellungen innerhalb des Inventory Managements	5
2.3 Strategien des Inventory Managements.....	6
3 Möglichkeiten zur Untersuchung von Strategien des Inventory Managements	10
3.1 Grundbegriffe Simulation.....	10
3.2 Ereignisdiskrete Simulation.....	12
3.3 Simulationswerkzeuge.....	14
3.4 Tabellenkalkulationsprogramme	15
3.5 Vorgehen für Simulationsstudien	19
3.6 Kriterien zur Beurteilung von Simulationsstudien	24
4 Vorbereitung der Untersuchung.....	27
4.1 Erstellung eines standardisierten Ablaufplanes	27
4.2 Auswahl der Problemstellungen.....	28
4.3 Entwurf der Experimente.....	30
4.4 Erstellung der formalen Modelle für die Versuchsdurchführung.....	31
4.5 Auswahl und Aufbereitung der Daten zur Modellimplementierung	33
4.6 Auswahl von Bewertungskriterien zur Versuchsbewertung.....	35
5 Versuchsdurchführung und Auswertung im Rahmen der Untersuchung	38
5.1 Versuchsdurchführung in Excel	38
5.1.1 Implementierung des formalen Modells.....	38
5.1.2 Experimentdurchführung.....	43
5.1.3 Auswertung.....	44
5.2 Versuchsdurchführung in Plant Simulation.....	50
5.2.1 Implementierung des formalen Modells.....	50
5.2.2 Experimentdurchführung.....	54
5.2.3 Auswertung.....	56
5.3 Einsatzfähigkeitsbeurteilung der Tabellenkalkulation zur Simulation.....	62
6 Zusammenfassung und Ausblick	67
Literaturverzeichnis	69
Abkürzungsverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	74
Formelverzeichnis	75
Tabellenverzeichnis.....	76
Anhang	77

1 Einleitung

Viele Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, die Kosten ihrer Supply Chains zu verringern (Kersten et al. 2017). Das Inventory Management, als Teil des Supply Chain Managements, ist dabei eine Möglichkeit für Unternehmen, Kostensenkungen zu erreichen. In der Industrie findet das Inventory Management überall dort Anwendung, wo Bestände vorhanden sind. Durch das Inventory Management werden die Strategien der Lagerhaltung eines Unternehmens bestimmt und es bildet die Grundlage diverser Lager- und Logistikprozesse. (Walluschnig 2014, S. 53)

Aus den verschiedenen Strategien des Inventory Managements lassen sich Zielgrößen ableiten, deren Erfüllungsgrad mit Hilfe einer Simulationsstudie zu verschiedenen Projektphasen überprüft werden kann (Gutenschwager et al. 2017, S. 45). Die Strategien lassen sich dadurch vergleichen, und die geeignetste ausgewählt werden kann. Dabei können verschiedene Techniken, zum Beispiel die ereignisdiskrete Simulation oder eine Tabellenkalkulation, eingesetzt werden. Die Techniken unterscheiden sich hierbei insbesondere in ihrer Komplexität und in ihrem Modellierungsaufwand. (Robinson 2004, S. 42) Zusätzlich zu der Überprüfbarkeit der Einhaltung von Zielgrößen können Simulationsstudien getroffene Entscheidungen absichern und damit zur Reduzierung von Fehlplanungen beitragen (Gutenschwager et al. 2017, S. 49). Auch wird Simulation bei der Planung von Logistik- und Produktionssystemen (Gutenschwager et al. 2017, S. 45) genutzt. Daneben findet Simulation aber auch bei der Analyse von Supply Chains Anwendung oder wird genutzt um Bestellstrategien in Inventory Systemen zu überprüfen (Law 2015, S.2).

Ziel der Projektarbeit ist die Untersuchung der Einsatzfähigkeit von Tabellenkalkulationsprogrammen zur Simulation im Umfeld des Inventory Managements. Wichtige Zwischenziele sind dazu eine Auswahl der wichtigsten Problemstellungen des Bestandsmanagements und die Aufstellung eines Versuchsplans für die weitere Untersuchung der Einsatzfähigkeit eines Tabellenkalkulationsprogrammes zwecks Simulation. Weitere Zwischenziele sind der Entwurf eines formalisierten Modells aus den Problemstellungen und die Implementierung des formalen Modells jeweils im Simulations- und Tabellenkalkulationsprogramm.

Die vorliegende Arbeit ist dabei in mehrere Abschnitte unterteilt. Zunächst werden die Grundlagen und Zielstellungen des Inventory Managements erläutert. Zusätzlich werden die typischen Problemstellungen des Inventory Managements sowie die Strategien, um diese zu lösen, vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel liegt der Fokus darauf, die Grundbegriffe der Simulation sowie im speziellen die ereignisdiskrete Simulation zu erläutern. Im weiteren Fokus steht die Einführung von Simulationswerkzeugen und Tabellenkalkulationsprogrammen. Des Weiteren wird das

Vorgehen für Simulationsstudien in den Fokus gestellt. Auch werden Bewertungskriterien erarbeitet, mit Hilfe derer der Einsatz des Tabellenkalkulationsprogrammes beurteilt wird.

Mit dem folgenden Kapitel wird die Untersuchung der Problemstellung des Inventory Managements vorbereitet. Dafür wird ein standardisierter Ablaufplan erstellt, die Problemstellung ausgewählt und die Experimente entworfen. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Erstellung eines formalen Modells, um die Experimente standardisiert durchführen zu können, sowie auf der Auswahl und Aufbereitung der Simulationsdaten. Außerdem wird eine Auswahl aus den vorgestellten Bewertungskriterien getroffen.

In diesem Kapitel wird die Problemstellung mit Hilfe des Tabellenkalkulations- und des Simulationsprogrammes untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf der Implementierung des formalen Modells und der Simulationsdurchführung im Tabellenkalkulationsprogramm sowie der Auswertung dieser Durchführung.

In einem letzten Schritt wird die Versuchsdurchführung der Simulation im Tabellenkalkulationsprogrammes mit der im Simulationsprogrammes verglichen, um die Einsatzfähigkeit eines Tabellenkalkulationsprogrammes zur Simulation von Problemstellungen im Inventory Management beurteilen zu können. Zudem wird eine Zusammenfassung der Arbeit erstellt.

2 Inventory Management

In diesem Kapitel wird zunächst der Begriff des Inventory Managements erläutert. Danach werden die Zielstellung des Inventory Managements und die sich daraus ergebenden Problemstellungen beschrieben. Zur Lösung der Problemstellungen haben sich verschiedene Strategien etabliert, die abschließend vorgestellt und in den anschließenden Versuchsdurchführungen genutzt werden.

2.1 Grundlagen und Zielstellungen des Inventory Managements

Nach Schönsleben (2016, S. 254) kann das Inventory Management mit dem deutschen Begriff des Bestandsmanagements umschrieben werden. Es umfasst dabei die Planung und Steuerung aller Bestände eines Unternehmens oder einer Supply Chain. Unter der Bestandssteuerung wird die Entscheidungsfindung, zum Beispiel zur Lagerhaltung, verstanden (Schönsleben 2016, S. 520). Die Planung von Beständen bedeutet die "Festlegung operationaler Bestandsziele" und beinhaltet unter anderem die Bedarfsplanung (Walluschnig 2014, S. 55).

Zentraler Begriff des Inventory Managements ist der Bestand. Das Kompaktlexikon Logistik nach Bichler (2017, S. 28) definiert Bestände als "Wert gelagerter Waren und Güter". Schönsleben (2016, S. 10 f.) hingegen definiert Bestände als Waren und Güter, die in physischer Form in einem Unternehmen vorhanden sind. Er unterteilt die Bestände in drei Kategorien. Einmal gibt es den Lagerbestand, der die Masse an Artikeln umfasst, die für verschiedenste Zwecke deponiert sind. Die zweite Kategorie umfasst den Work-In-Progress-Bestand (WIP-Bestand). Dies sind Artikel, die sich in der Bearbeitung befinden. Die letzte Kategorie ist der Transportbestand. Zu ihr gehören alle Güter, die sich auf dem Transport zwischen verschiedenen Orten befinden, dabei aber noch einem Unternehmen zuzuordnen sind.

Insbesondere die WIP-Bestände sind für einen Fertigungsprozess elementar, dennoch sind Bestände „als unnötig und damit als Verschwendung von Zeit und gebundenem Kapital zu betrachten“ (Schönsleben 2016, S. 517). Die Kategorien können nach Tempelmeier (2015, S. 10f.) um den Bestell- und Fehlbestand, sowie den disponiblen Bestand erweitert werden. Der Bestellbestand berücksichtigt die Menge der bestellten, aber noch nicht im Lager vorhandenen Güter. Der Fehlbestand bezeichnet die Menge der Güter, die einem Kunden bereits zugeordnet sind, aber physisch noch nicht im Lager bereit liegen und daher nicht ausgeliefert werden können. Der disponible Bestand ist die Menge, die physisch im Lager liegt plus der bestellten Menge.

Nicht mit dem Inventory Management zu verwechseln, ist der Bereich Inventory Control. Der Hauptunterschied zwischen Inventory Management und Inventory Control ist laut Lockard (2010) der verschiedenartige Fokus beider Disziplinen. Das Inventory Management konzentriert sich darauf, Bestände zu den richtigen Zeiten an die richtigen Orte zu bewegen. Inventory Control hat den Fokus hingegen darauf, die Bestände möglichst effektiv zu nutzen und dadurch die Kosten niedrig zu halten. Häufig wird Inventory Control als die praktische Ausführung des Inventory Managements betrachtet. Die Hauptaspekte des Inventory Controls sind dabei Ankaufsstops bei schlecht laufenden Produkten, zeitnahe Reaktionen auf Nachfrageänderungen und eine effiziente Nutzung der Bestände, so dass diese nicht zu alt werden.

Die Ziele des Inventory Managements sind hauptsächlich die Ermittlung der optimalen Lager- und Bestellmenge, sowie des besten Bestellzeitpunktes (Brabänder 2018, S.5). Zweck dieser grundlegenden Ziele ist es nach Brabänder (2018, S. 6-9), die Kosten möglichst gering zu halten. Die Kosten lassen sich in die Kategorien der Lagerhaltungskosten, bestellabhängigen Kosten und Fehlkosten einordnen. Des Weiteren ist es ein Ziel des Inventory Managements, eine hohe Lieferfähigkeit sicherzustellen. Weitere Teilziele sind eine effiziente und sinnvolle Nutzung der vorhandenen Lagerkapazitäten sowie eine Reduzierung der zugehörigen Risiken.

Zur Überprüfung der Einhaltung der geforderten Zielstellungen können verschiedene Kennzahlen verwendet werden. Die für das Inventory Management wichtigsten sind dabei der durchschnittliche Lagerbestand, die Verweildauer und die Lagerzinsen (Bichler et al. 2013, S. 3ff.).

Der durchschnittliche Lagerbestand (LB) ist definiert als der gemittelte Wert der Summe des Anfangs- und Endbestandes einer Zeitperiode (Bichler et al. 2013, S. 4):

$$LB = \frac{\text{Anfangsbestand d. Periode} + \text{Endbestand d. Periode}}{2} \quad (1)$$

Die Verweildauer (VD) gibt an, wie lange die Bestände sich im Schnitt im Lager befinden. Dazu wird die betrachtete Zeitperiode durch die Häufigkeit der Lagerumschläge in dieser Periode dividiert (Bichler et al. 2013, S. 4):

$$VD = \frac{360 \text{ Tage}}{\text{Umschlagshäufigkeit}} \quad (2)$$

Die Umschlagshäufigkeit gibt dabei Aufschluss darüber, wie oft der durchschnittliche Lagerbestand verbraucht wird.

Das durch die Bestände gebundene Kapital kann nicht mehr investiert bzw. gewinnbringend angelegt werden. Der gebundene Kapitalbetrag inklusive der entgangenen Rendite wird als Lagerzinsen (LZ) definiert (Bichler et al. 2013, S. 5):

$$LZ = \frac{LB * \text{Lagerzinssatz}}{100} \quad (3)$$

Die Definitionen aller weiteren benutzten Kennzahlen können der Tabelle 11 entnommen werden.

2.2 Typische Problemstellungen innerhalb des Inventory Managements

Das Inventory Management wird immer wieder mit ähnlichen Problemstellungen konfrontiert. Eine grundlegende Aufgabe ist es dabei, aus sich widersprechenden Zielen einen gut ausbalancierten Kompromiss zu finden. Mehrere Zielkonflikte können sich zum Beispiel bei dem Wunsch nach niedrigen Bestandsmengen ergeben. Diese sollten möglichst niedrig sein, um wenig Kapital zu binden. Andererseits erhofft sich der Einkauf bei größeren Abnahmemengen Lieferrabatte, und der Vertrieb wünscht sich möglichst viel auf Lager vorrätig zu haben, um auf alle Kundenwünsche schnell reagieren zu können. (Axsäter 2015, S. 1) Das Inventory Management steht laut Hartmann (2017, S. 14) häufig vor der Herausforderung, volatile Bedarfe durch eine effiziente Steuerung und Planung der wertschöpfenden Prozesse zu bedienen. Dabei tritt ein weiterer Zielkonflikt auf. Es muss eine Ausgewogenheit zwischen möglichst kleinen Beständen bei gleichzeitig hoher Lieferbereitschaft gefunden werden.

Laut einer Studie der Deutschen Bundesbank binden Bestände im Schnitt 17% der Bilanzsumme. Dabei ist die Streuung sehr groß. Im klassischen Maschinenbau beträgt das durchschnittlich gebundene Kapital sogar fast ein Drittel der Bilanzsumme, wo hingegen in der Automobilbranche durch den flächendeckenden Einsatz von Just-In-Time-Prozessen gerade mal knapp 8% der Bilanzsumme als Bestände vorliegen. Die gleiche Studie lässt darauf schließen, dass ein Großteil der Bestände im Vorratslager gebunden ist. Unabhängig von dem konkreten prozentualen Anteil lässt sich grundsätzlich feststellen, dass zu große Bestände den Gewinn eines Unternehmens direkt negativ beeinflussen. (Hartmann 2017, S. 15-18)

Weitere Probleme im Inventory Management resultieren aus den anfallenden Kosten für die Lagerhaltung, die Bearbeitung von Bestellungen, eventuelle Beschädigungen der Waren oder Obsoleszenzkosten (Axsäter 2015, S. 38). Nach Rehner und Neumair (2009, S. 37) bergen Bestände generell das Risiko, dass ihr Wert während des Lagerprozesses fällt. Dies kann verschiedene Gründe haben. Zum Beispiel kann die Qualität der Bestände sinken, indem Bestände korrodieren oder Lebensmittel verderben. Auch durch verschiedene ungewollte Ereignisse wie Brände, Umweltkatastrophen oder mutwillige Sachbeschädigung können die Bestände im Wert sinken. Kummer et al. (2011, S. 176) identifiziert als weiteres Risiko den Wertverlust durch äußere Entwick-

lungen. Bestände können zum Beispiel durch eine Verringerung des Marktpreises an Wert verlieren oder durch den technologischen Fortschritt. Besonders anfällig sind hierbei Elektronikbauteile.

Bestände sind aber grundsätzlich nicht vermeidbar. Bestellungen benötigen einerseits immer einen zeitlichen Vorlauf. Dieser ergibt sich durch die Lead-Time, also die Zeit zwischen Bestellaufgabe und Lieferung. Andererseits besteht die Notwendigkeit, dass aus Kostengründen häufig in Losen bestellt wird und somit nicht alle bestellte Ware sofort eingesetzt wird. (Axsäter 2015, S. 7) Des Weiteren sind Bestände in Form des WIP-Bestandes ein notwendiger Kernbestandteil eines Produktionsprozesses (vgl. Abschnitt 2.1)

Ein weiterer Grund, warum Bestände unvermeidbar sind, ist ein möglicher Lieferausfall des Zulieferers. Vielfältige Beispiele und Gründe für das Zusammenbrechen einer Supply Chain beschreibt Wu et al. (2013). Sie betreffen eine große Bandbreite von Unternehmen. Die Konsequenzen sind oftmals gravierend und reichen bis hin zu einem kompletten Produktionsstillstand. Laut einer Studie von Inside Business (2018) versuchen viele Firmen, sich mit einem Sicherheitsbestand zu schützen. Dessen Ermittlung ist aber durchaus problematisch und stellt daher auch eine Herausforderung im Inventory Management dar.

Die Optimierungspotentiale im Bestandsmanagement und in der Bestandskontrolle sind sehr groß. Ein ineffizientes Bestandsmanagement, das diese Potentiale nicht ausschöpft, stellt daher einen weiteren typischen Problemfall dar. Eine methodisch ausgeführte Bestandskontrolle bietet einen nicht unerheblichen Wettbewerbsvorteil. (Axsäter 2015, S. 1)

2.3 Strategien des Inventory Managements

Zur Meisterung der verschiedenen Herausforderungen des Inventory Managements existieren unterschiedliche Strategien. Hauptziel der Strategien ist es, möglichst geringe Bestände und dadurch geringe Kosten bei einem ausreichend hohen Versorgungsstand zu erreichen (vgl. Abschnitt 2.1).

Tempelmeier (2015, S. 130) identifiziert verschiedene Ansätze zur Lagerhaltung im Inventory Management. Diese definieren u.a. Vorschriften zur Bestellmenge und zum Nachbestellzeitpunkt, die besonders dann zum Einsatz kommen, wenn keine sichere Aussage über zukünftige Bedarfe getroffen werden kann.

Der Bestellzeitpunkt kann nach Manitz (2015, S. 192f.) an feste zeitliche Abstände oder an die Bestandsentwicklung gekoppelt werden. Im zweiten Fall muss ein Bestand definiert werden, bei dessen Unterschreitung eine Bestellung ausgelöst werden soll. Es wird dann vom Meldebestand gesprochen. Bei der Bestellmenge kann ebenfalls analog eine feste und eine nachfrageorientierte

Vorgehensweise unterschieden werden. Durch Kombination der beschriebenen Verfahren ergeben sich vier grundlegende Lagerhaltungspolitiken. Dazu wird den Verfahren zunächst ein Parameter zugewiesen. Standardmäßig werden r , s , q und S verwendet.

Laut Herrmann (2015, S. 58f.) beschreibt der Parameter q die konstante Bestellmenge, die immer unabhängig des tatsächlichen Verbrauchs nachgeordert werden soll. S hingegen bezeichnet eine festgelegte Bestandsmenge, die durch die Bestellung erzielt werden soll. Die zu bestellende Menge errechnet sich dann als Differenz zwischen S und dem aktuellen Bestand. Die Bezeichnung r gibt die Länge des betrachteten Intervalls an, nach dessen Ablauf die rhythmische Bestellung getätigt werden soll. Wird ein Meldebestand zur Bestellauslösung genutzt, so wird dieser mit s bezeichnet.

Die Entscheidungsregeln ergeben sich aus der Kombination der Parameter (vgl. Tabelle 1). So existiert zum Beispiel die (r,q) -Politik, welche allerdings nach Manitz (2015, S. 193) wenig sinnvoll ist. Sowohl die Bestellmenge als auch der Bestellzeitpunkt würden nur konstant und ohne Rücksicht auf reale Nachfragen gewählt. Manitz (2015) beschreibt des Weiteren die (s,S) -, die (s,q) - und die (r,S) -Politik. Die (s,S) -Politik nimmt sowohl beim Bestellzeitpunkt, als auch bei der Bestellmenge Rücksicht auf die Nachfrage, was diese Politik zu einer sehr flexiblen Strategie macht. Eine weitere Entscheidungsregel ist die (s,q) -Politik. Diese Politik fordert zu nachfrageorientierten Zeitpunkten eine feste Menge an Gütern zu bestellen. Das genaue Gegenteil dazu ist die (r,S) -Politik, nach der im konstanten Bestellrhythmus nachfrageorientiert Güter bestellt werden.

Bestellmenge		Bestellintervall	
		konstant/ rhythmisch	nachfrageorientiert
		r	s
konstant/ rhythmisch	q	$(r,q) \rightarrow$ wenig sinnvoll	$(s,q) \rightarrow$ ständige Bestandsüberwachung
nachfrageorientiert	S	$(r,S) \rightarrow S$ muss groß sein, sonst Fehlmengen in r	$(s,S) \rightarrow$ sehr flexibel

Tabelle 1: Lagerhaltungspolitiken (nach Herrmann 2015 und Manitz 2015)

Die (s,q) -Politik setzt voraus, dass der aktuelle Bestand immer überwacht wird, um so den Meldebestand zu erfassen (Tempelmeier 2015, 131f.). Nach Manitz (2015) muss berücksichtigt werden, dass zwischen Bestellauslösung und Bestelleingang ein gewisser Zeitraum liegt. Während dieses Zeitraums wird der Bestand meistens weiter sinken. Der Meldebestand muss also so hoch sein, dass bei typischem Verbrauch kein Fehlbestand auftritt. Idealerweise ist der Bestellpunkt s

so klein gewählt, dass zum Eintreffen der Bestellung der Altbestand genau aufgebraucht ist, ohne dass Nachfragen nicht bedient werden konnten.

Bei der (r, S) -Vorgehensweise wird laut Tempelmeier (2015) immer nach einer bestimmten Zeitperiode die Differenzmenge bis zum gewünschten Bestandsniveau geordert. Vorteil des Verfahrens ist die mögliche Synchronisierung verschiedener Bestellungen beim gleichen Lieferanten. Die Bestellmenge streut allerdings in Abhängigkeit der Volatilität der Nachfrage. Auch darf die Zeitperiode r nicht zu groß gewählt werden, da sonst innerhalb der Periode ein Fehlbestand auftreten kann.

Herrmann (2015) sieht bei der (s, S) -Politik ebenfalls die Notwendigkeit der kontinuierlichen Bestandsüberwachung. Da sowohl der Bestellzeitpunkt als die Bestellmenge immer von dem Einzelfall abhängig ist und stark variieren kann, handelt es sich bei der (s, S) -Politik um eine sehr flexible Vorgehensweise. Für den Bestellpunkt s gilt auch hier, dass er so gewählt werden muss, dass Fehlmengen vermieden werden.

Im Kostenvergleich der Strategien ist laut Tempelmeier (2015) davon auszugehen, dass die (r, S) -Politik zu höheren Gesamtkosten führt als die (s, S) - und die (s, q) -Politik. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die (r, S) -Politik eine größere Reaktionszeit als die anderen Strategien besitzt. Auch weitere externe Einflüsse, wie zum Beispiel Mindestabnahmemengen, können einen starken Einfluss darauf haben, welche Strategie zu bevorzugen ist. So ist es zum Beispiel bei der (r, S) -Politik von Vorteil, dass die Lieferungen zeitlich mit weiteren Bestellungen beim gleichen Lieferanten synchronisiert werden können.

Für die verschiedenen Lagerhaltungsstrategien sind die Bedarfsvorhersagen elementar. Um diese zu erstellen, gibt Axsäter (2015) zwei grundlegende Möglichkeiten an. Einmal können Prognosen auf Basis der historischen Daten erzeugt werden. Dazu werden verschiedene Verfahren der Statistik und Datenerhebung genutzt, um die benötigten Datensätze zu erhalten. Da dies relativ einfach mit Rechnerunterstützung für viele tausend Datensätze durchgeführt werden kann, ist die Nutzung historischer Daten das wichtigste und am weitesten verbreitete Verfahren zur Vorhersage. Eine andere Möglichkeit zur Vorhersage von Bedarfen bietet die Analyse der Verwendungszwecke. Wenn beispielsweise ein Zuliefererbetrieb Bauteile für die weitere Montage liefert, dann richtet sich der Bedarf natürlich stark an der Nachfrage der Endprodukte aus.

Um die Kapitalbindung zu reduzieren, müssen nach Wannewetsch (2010, S. 312) die dazugehörigen Bestände verringert werden. Dazu werden verschiedene Herangehensweisen genutzt. Dort, wo es eine große Variantenvielfalt gibt, wird versucht, die benötigten Teile zu standardisieren und modularisieren. Die Bestände werden dadurch geringer, da für eine Warengruppe nur ein Sicherheitsbestand vorgehalten werden muss. Ein weiterer Ansatz ist es, die zeitliche Reichweite der Bestände zu verringern. Dazu können zum Beispiel Just-In-Time-Prinzipien oder rollende

Lager verwendet werden. Durch diese Strategien kann beispielsweise in der Automobilindustrie die Reichweite einiger Artikel auf wenige Stunden verringert werden.

Die bisher betrachteten Strategien konzentrieren sich auf die Nachbestellung von Beständen. Im Inventory Management existieren allerdings auch Strategien für die Bestandslagerung und die weitere Verwendung. Schönsleben (2016, S. 519) beschreibt das First-In-First-Out-Prinzip (FIFO) für die Auslagerung von Beständen. Hierbei wird der zuerst eingelagerte Bestand auch wieder zuerst entnommen. Genau umgekehrt funktioniert das Last-In-First-Out-Verfahren.

Bei verderblichen Waren sollte das Prinzip First-Expired-First-Out angewandt werden, da dies vor Kosten für nicht mehr verkaufbare Ware schützen kann. In Kombination mit den zuvor genannten Strategien kann der Bestandsausgang auch nach dem Warenwert geordnet werden. Dafür wird dann zuerst entweder das teuerste oder günstigste Produkt ausgelagert. (Biermann 2018) Sind die Bestände an bestimmte Aufträge gebunden, erfolgt die Auslagerung auftragsgebunden (Schönsleben 2016, S. 520).

Die Bestandskontrolle sollte laut Wannewetsch (2010) möglichst methodisch erfolgen. Dazu werden alle Bewegungen im Lager erfasst und nachverfolgt. Die Speicherung der Bewegungsdaten kann zum Beispiel mit Barcodes oder RFID-Technik erfolgen. Die Erfassung kann inzwischen voll automatisiert ablaufen, so dass die Bestandsdaten nahezu in Echtzeit dargestellt werden können.

3 Möglichkeiten zur Untersuchung von Strategien des Inventory Managements

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundbegriffe der Simulation und die ereignisdiskrete Simulation erläutert, um die begrifflichen Grundlagen für die weiteren Ausführungen zu legen. Darauf aufbauend werden Simulationswerkzeuge und Tabellenkalkulationsprogramme eingeführt. Um eine strukturierte Simulation in einem Simulationswerkzeug und einem Tabellenkalkulationsprogramm zu ermöglichen, wird das Vorgehen für Simulationsstudien vorgestellt. Abschließend werden Kriterien aufgeführt, mit denen die Simulationsstudien beurteilt werden können.

3.1 Grundbegriffe Simulation

Um die Auswirkungen der einzelnen Strategien des Inventory Managements (vgl. Abschnitt 2.3) auf ein Unternehmen zu untersuchen, können diese beispielsweise simuliert werden. Nach VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 3) ist die Simulation das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“.

Law (2015, S. 3) definiert ein System als Sammlung von Elementen, welche miteinander agieren und auf ein logisches Ende hinwirken. Bei dieser Definition ist zu beachten, dass Elemente, die in einer ersten Simulation das gesamte System widerspiegeln, in einer anderen, zweiten, Simulation möglicherweise nur Teile des Systems darstellen können. Zudem unterscheiden Gutenschwager et al. (2017, S. 17 f.) sowie Banks et al. (2014a, S. 416-420) Systeme in terminierende und nicht terminierende Systeme. Ein terminierendes System zeichnet sich dadurch aus, dass die Startbedingungen des Systems von vorherigen Abläufen unabhängig sind. Das System wird durch ein natürliches Ereignis beendet. Nicht terminierende Systeme haben hingegen kein begrenzendes, natürliches Ereignis und keinen definierten Startzustand. Law (2015, S. 493 - 497) unterscheidet nicht in terminierende und nicht terminierende Systeme, sondern in terminierende und nicht terminierende Simulation.

Um innerhalb eines Systems eine Simulation vornehmen zu können, muss ein Modell erstellt werden. Unter einem Modell wird eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 3) verstanden. Das abgebildete Modell sowie die zu

untersuchenden Eigenschaften unterscheiden sich nur innerhalb einer Toleranz vom Vorbild. Der Detaillierungsgrad des abgebildeten Modells ist somit für die Genauigkeit und den Aufwand der Simulation von entscheidender Bedeutung (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 24). Um einen ausreichenden Detaillierungsgrad des Modells zu erreichen, schlagen Gutenschwager et al. (2017, S. 20) vor, bei der Modellierung so detailliert wie nötig vorzugehen. Dabei soll eine Abstraktion gegenüber dem zu modellierenden System stattfinden. Diese Abstraktion teilen die Autoren in Reduktion und Idealisierung auf. Bei der Reduktion werden Teile des Systems weggelassen, welche für die Simulation nicht von Interesse sind. Die Idealisierung hingegen nimmt sich relevante Teile des Systems vor und vereinfacht diese.

Simulationsmodelle können nach Law (2015, S. 5f.) und Banks et al. (2014a, S. 13f.) in drei verschiedene Kategorien klassifiziert werden:

1. statische oder dynamische Simulationsmodelle
2. deterministische oder stochastische Simulationsmodelle
3. kontinuierliche oder diskrete Simulationsmodelle

Laut Law (2015, S.5) ist ein Simulationsmodell statisch, wenn es das System nur zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellt oder der Faktor Zeit für das System nicht relevant ist. Gutenschwager et al. (2017, S. 13) nennen hierfür als Beispiel ein Gebäude. Dynamische Simulationsmodelle entwickeln sich, im Unterschied zu statischen, über die Zeit, wie beispielsweise ein Förderband.

Solche Simulationsmodelle, die keinerlei Wahrscheinlichkeit, beispielsweise keine Zufallsvariablen, berücksichtigen, bezeichnet Law (2015, S. 5) als deterministisch. Die Ergebnisse des Simulationslaufs stehen vorab fest. Im Gegensatz dazu sind in stochastischen Simulationsmodellen Zufallsvariablen zu finden. Beispiele hierfür wären Simulationsmodelle von Warteschlangen oder von Problemen des Bestandsmanagements.

In einem kontinuierlichen Simulationsmodell verändern sich nach Banks et al. (2014a, S. 12 ff.) die Zustandsvariablen des Systems kontinuierlich über die Zeit. Im Unterschied dazu, verändern sich die Zustandsvariablen eines diskreten Simulationsmodells nur zu diskreten Zeitpunkten. Gutenschwager et al. (2017, S.16 ff.) unterteilen die Zustandsvariablen zusätzlich zum Zeitfortschritt in kontinuierliche und diskrete Mengen.

Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 184 ff.) benötigen Simulationsmodelle, die ein nicht terminierendes System abbilden, aufgrund ihres undefinierten Startzustandes, eine Einschwingphase. Während dieser Einschwingphase wirken sich die nicht repräsentativen Startbedingungen auf die Ergebnisgrößen des Simulationsmodells aus. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass das Modell nach einer bestimmten Zeit einen eingeschwungenen Zustand erreicht. Erst nach dieser

Einschwingphase sind die Ergebnisse des Simulationsmodells relevant. Die Dauer der Einschwingphase kann zum Beispiel graphisch ermittelt werden. Um diese Ermittlung zu vermeiden, ist es möglich stattdessen das Simulationsmodell mit einem typischen Startzustand zu initialisieren. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Schwierigkeit darin, diesen typischen Zustand zu definieren.

Aussagen zum Nutzen von Simulation lassen sich nach Gutenschwager et al. (2017, S. 47f.) nur schwer treffen, da sich eine genaue Benennung des Nutzens, vor oder nach der Durchführung, mit und ohne Simulation, für ein konkretes Projekt nicht vornehmen lässt. Qualitativ, also nicht monetär, betrachtet, spricht die VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 39f.) davon, dass die planungsbegleitende Simulation schon bei der Konzepterstellung einer neu geplanten Anlage hilfreich ist. Zusätzliche Aspekte können ein Sicherheitsgewinn, ein besseres Systemverständnis sowie eine günstigere Prozessführung sein.

Grundsätzliche Vorteile einer Simulation sieht Law (2015, S. 70f.) in der Fähigkeit, mit Hilfe von Simulation die Leistung bestehender Systeme unter neuen Prozessbedingungen zu untersuchen. Außerdem können Systeme über einen langen Zeitrahmen beobachtet und simuliert sowie Alternativen zum bestehenden System untersucht werden. Ein Nachteil ist es unter anderem, dass es sehr teuer und zeitaufwändig sein kann, Simulation zu erstellen. Zudem kann Simulationsmodellen eine zu hohe Bedeutung beigemessen werden, da beispielsweise die Abbildung des Systems fehlerhaft sein kann oder die Ergebnisse der Simulation in unzulässiger Weise interpretiert werden können. Für weitere, tiefergehende Erklärungen der verschiedenen Simulationsmodelle und ihrer Vor- sowie Nachteile, sei der Leser auf die Werke von Gutenschwager et al. (2017, Kapitel 2), Law (2015, Kapitel 2) oder Banks et al. (2014a, Kapitel 1) verwiesen.

3.2 Ereignisdiskrete Simulation

Der Zeitfortschritt eines Simulationsmodells wird für ein diskretes Simulationsmodell (siehe Abschnitt 3.1) von Law in zeitgesteuerte („fixed-increment time advance“ Law 2015, S. 7) und ereignisgesteuerte („next-event time advance“ Law 2015, S. 7) Simulationsmethoden unterschieden.

Bei zeitgesteuerten Simulationsmethoden findet der Zeitfortschritt nach Gutenschwager et al. (2017, S. 52ff.) mittels Intervallen in gleichen Abständen und konstant statt. Dabei wird jede Zustandsänderung des Systems, die innerhalb des gewählten Intervalls stattfindet, am Ende des Intervalls ausgeführt. Eine Unterscheidung der Zustandsänderungen nach ihrer zeitlichen Abfolge findet somit nicht statt. Die Herausforderung dieser Simulationsmethode besteht darin, ein geeig-

netes Intervall für den Zeitfortschritt zu finden. Durch ein sehr kleines Intervall steigt der Aufwand zur Berechnung des Simulationsmodells. Bei einem sehr großen Intervall besteht die Gefahr von Fehlern, da alle Zustandsänderungen am Modell innerhalb des Intervalls erst am Ende des Intervalls berechnet werden.

Für ereignisgesteuerte Simulationsmethoden, auch ereignisdiskrete Simulation (discrete-event simulation, Law 2015, S.6) genannt, führen Gutenschwager et al. (2017, S. 52-55) aus, dass der Zeitfortschritt in Form von Sprüngen zum nächsten Ereignis erfolgt. Eine Zustandsänderung des Modells findet somit zum Zeitpunkt eines Ereignisses statt. Im Unterschied zu der zeitgesteuerten Simulationsmethode kommt es zu einer Zustandsänderung des Modells immer nur dann, wenn das dafür vorgesehene Ereignis eintritt und nicht erst am Ende eines vorgesehenen Intervalls.

Semini et al. (2006) untersuchen die Veröffentlichungen von vier Winter Simulation Conference's auf die Verwendung von ereignisdiskreter Simulation, um logistische Entscheidungen in einem Produktionsumfeld zu treffen. Die untersuchten Gebiete waren dabei das Design des Produktionssystems, die Produktionsstrategien, Kurzzeit- und Ablaufplanung, Lagerstrategien, Absatzprogramme sowie die Planung des Standorts und der Distribution. Bei 46 von 52 ausgewählten Veröffentlichungen werden Allzweck Simulationsprogramme verwendet, 5 benutzen Programmiersprachen (C++ und Java) und in einem wurde ein Programm benutzt, das speziell für die Supply Chain Simulation entwickelt wurde. Genauer wird die Nutzung von Simulation in Produktion und Unternehmensführung von Jahangirian et al. (2010) untersucht. Dabei zeigt sich, dass ereignisdiskrete Simulation in der Industrie weit verbreitet ist, denn 40 % (114 von 281) aller überprüften Quellen behandelten und verwendeten diese. Außerdem verwenden 82 % (9 von 11) aller Quellen ereignisdiskrete Simulation um Simulation im Bereich des Inventory Managements durchzuführen. Tako und Robinson (2012) untersuchen Simulation im Logistik- und Supply-Chain-Management. Die drei untersuchten Simulationsverfahren sind ereignisdiskrete Simulation, System Dynamics und eine hybride Simulation aus beiden genannten Verfahren. Dabei gehören von 127 Literaturquellen 86 (68 %) zur ereignisdiskreten Simulation, 38 (30 %) zu System Dynamics und 3 (2 %) zur Hybriden Simulation. Die untersuchten Literaturquellen ordnen die Autoren verschiedenen Kategorien des Logistik- und Supply-Chain-Management zu, wie zum Beispiel der Supply-Chain-Struktur, der Standortplanung, der Supply-Chain-Optimierung oder dem Inventory Management. Hierbei fällt, wie schon bei Jahangirian et al. (2010), auf, dass bei der Simulation im Inventory Management häufig die ereignisdiskrete Simulation zur Anwendung kommt, denn 47 Simulation im Inventory Management werden mit ereignisdiskreter Simulation, 18 mit System Dynamics und 1 mit einer hybriden Simulation durchgeführt.

Aufgrund der großen Verbreitung von ereignisdiskreter Simulation und seiner Relevanz für das Inventory Management werden die Autoren im Folgenden die ereignisdiskrete Simulation weiterverwenden.

Um eine ereignisdiskrete Simulation durchzuführen, müssen einige grundsätzliche Schritte beachtet werden. Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 55ff.) besitzt eine ereignisdiskrete Simulation eine Ereignisliste, in der alle bekannten Ereignisse der Simulation eingetragen sind. Diese Ereignisse sind mit einem Zeitstempel versehen und nacheinander angeordnet. Eine Ablaufsteuerung wählt das erste Ereignis aus der Ereignisliste aus, stellt die Simulationszeit auf den Zeitpunkt des Ereignisses und führt die zum Ereignis gehörenden Zustandsänderungen mit Hilfe von Ereignisroutinen aus (auch als Abarbeitung bezeichnet). Eine Ereignisroutine kann auch neue Ereignisse hervorrufen, welche der Ereignisliste hinzugefügt werden müssen. Diese werden auch Folgeereignisse genannt. Die Ereignisliste wird so lange mit Hilfe einer Schleife abgearbeitet, bis sie leer ist, ein vorgegebener Zeitpunkt zur Beendigung der Simulation oder eine vom Anwender vorgegebene Abbruchbedingung für das Ende der Simulation erreicht wurde.

3.3 Simulationswerkzeuge

Um eine Simulation durchzuführen, benötigt der Anwender entweder ein Simulationswerkzeug, auch Simulationsprogramm oder Simulationstool genannt (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 219), oder erstellt mit Hilfe einer Programmiersprache ein Simulationstool (Robinson 2004, S. 40). Simulationswerkzeuge müssen nach Law (2015, S. 181) folgende Möglichkeiten beinhalten, um ereignisdiskrete Simulation auszuführen:

- zufällige Zahlen generieren
- zufällige Varianten von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z.B. Exponentialverteilungen)
- simulierte Zeit vorantreiben
- das nächste Event aus der Ereignisliste auswählen sowie die dazugehörenden Zustandsänderungen durchführen
- Aufzeichnungen zu Listen hinzufügen oder löschen
- Ausgabestatistiken und Berichte der Ergebnisse erstellen
- Fehler aufdecken

Zusätzliche Funktionen, die laut Law (2015, S. 186) wünschenswert sind, sind eine einfache Benutzung des Simulationswerkzeugs, flexible Modellierung, Animation der Simulation, dynamische Grafiken sowie statistische Möglichkeiten zur Auswertung und einen entsprechenden Kundendienst des Anbieters der Software.

Nach Eley (2012, S. 10) sind auf dem Markt eine große Anzahl an Simulationswerkzeugen zu finden. In Tabelle 2 ist eine Übersicht über die verschiedenen Werkzeuge, sortiert nach dem Grad ihrer Spezialisierung, aufgelistet.

Anwendungsbezug	Spezial-Simulatoren	Powersim, PacSi, TPS, SIMBAX
	Strukturorientierte Simulatoren	AutoMod, DOSIMIS-3
	Ablauforientierte Simulatoren	Simflex/3D, WITNESS, ISSOP
Allgemeingültigkeit	Simulationsumgebungen	Plant Simulation, ARENA, PACE
	Simulatorenentwicklungsumgebungen	Enterprise Dynamics (ED), FLRXSIM
	Simulationssprachen	GPSS, POSES++, SIMIS
	Allgemeine Programmiersprachen	C++, Simula, Smalltalk

Tabelle 2: Auszug verfügbarer Simulationswerkzeuge (vgl. Eley 2012, S. 10)

In der Kategorie der anwendungsbezogenen Simulationswerkzeuge finden sich Werkzeuge wieder, die nur in einem sehr begrenzten Bereich Anwendung finden. Im Gegenzug können mit ihnen Modelle sehr schnell erstellt werden, da sie für ihren Anwendungsbereich vorgefertigte Bausteine beinhalten. Die Werkzeuge aus der Kategorie „Allgemeingültigkeit“ sind so universeller einsetzbar, je weiter unten sie in der Tabelle stehen. Daher enthalten sie auch keine für einen bestimmten Zweck vorgefertigten Bausteine. Eley 2012 (S. 11) bezeichnet das Simulationswerkzeug Plant Simulation als „einen guten Kompromiss zwischen Einsatzbreite und Implementierungsunterstützung“. Garriz und Domingo (2017) benutzen Plant Simulation um eine Fertigungsinsel eines Automobilbauers zu simulieren und um Schlüsse auf das reale System zu ziehen.

3.4 Tabellenkalkulationsprogramme

Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm können nach Benker (2014, S. 1) Daten erstellt, verwaltet, bearbeitet sowie grafisch dargestellt werden. Aufgrund der großen Datenmengen im kaufmännischen Bereich liegt einer der Schwerpunkte für Tabellenkalkulationsprogramme in eben diesem Bereich. Jiang (2010) führt außerdem aus, dass Tabellenkalkulationsprogramme auch zur effektiven Analyse von Problemen innerhalb der Logistik und Supply Chain genutzt werden. Zum Beispiel setzt Strakos (2016) Tabellenkalkulationsprogramme ein, um Studenten, in vorlesungsbegleitenden Seminaren, Trade-Off Kurven des Inventory Managements zu erläutern.

Ereignisdiskrete Simulation mit Tabellenkalkulationsprogrammen ist laut Law (2015, S. 717f.) möglich, solange das Problem nicht zu komplex ist. In diesem Zusammenhang sind unter anderem Sezen und Kitapçı (2007) zu nennen, die die klassische Losformel („Economic Order Quantity, EOQ-Formel“) in einem Tabellenkalkulationsprogramm für einen Distributor und drei Kunden simulieren, um mögliche Bestandsmengen zu ermitteln. Banks et al. (2014a, S. 55 ff.) nutzen ein Tabellenkalkulationsprogramm, um eine Simulation einer (r,S) Lagerhaltungspolitik von Kühlschränken durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.3). Diese Simulation kann auch vom Leser selbst nachvollzogen werden, da Banks et al. die dazugehörige Datei auf der Internetseite anbieten, welche die Beispiele aus dem Buch fortführt (siehe Banks et al. (2014b)).

Die von Banks et al. (2014b) mit Excel ausgeführte Simulation nutzt ein Tabellenblatt („One Trial“), um einen Simulationsdurchlauf durchzuführen. Damit die folgenden Erklärungen für den Leser einfacher nachzuvollziehen sind, wird empfohlen die angesprochene Datei zu öffnen. In dem Tabellenblatt ist eine Eingabemöglichkeit für die Verteilung des täglichen Bedarfs („Distribution of Daily Demand“) und die Verteilung der Vorlaufzeit („Distribution of Lead Time“) vorgesehen. Dafür wird für den variierenden Bedarf und Vorlaufzeiten jeweils Wahrscheinlichkeiten angegeben. Diese Wahrscheinlichkeiten sind die Eingabewerte für eine Funktion, die im späteren Verlauf der Simulation die verschiedenen Werte für die täglichen Bedarfsmengen und Vorlaufzeiten bestimmt. Die Funktion wurde von Banks et al. in VBA programmiert und soll eine diskrete empirische Verteilung nachbilden. Dabei wird die Verteilung unter anderem mit Hilfe des Zufallsgenerators von Excel gebildet. Auf weitere Einzelheiten dieser Funktion wird nicht eingegangen, da diese für den weiteren Verlauf der Arbeit nicht benötigt werden. Generelle Daten wie der Initiale Lagerbestand („Initial Inventory“), das Intervall („Review Period“) oder das Bestandsniveau („Maximum Inventory“) sind unter „General Parameters“ zu finden.

Die Simulation erfolgt mit der „Simulation Table“ durchgeführt. Dazu ist in Spalte B („Day“) der Tag eingetragen, wodurch in Spalte C („Cycle“) das zugehörige Intervall r errechnet wird. Unter „Day within Cycle“ (Spalte D) erfolgt die Berechnung des Tages innerhalb des Intervalls. Hat der Nutzer zum Beispiel ein r von 3 festgelegt, so gehören zu jedem Intervall 3 Tage. Die Tage 1 bis 3 in Spalte B sind so dem ersten Intervall (Spalte C) zugeordnet, die Tage 4 bis 6 dem zweiten. In Spalte E („Beginning Inventory“) wird der Lagerbestand am Tagesanfang berechnet. Dieser setzt sich aus dem Lagerbestand am Tagesende („Ending Inventory“) und einer möglicherweise eintreffenden Lieferung („Pending Order (Quantity)“) zusammen. Der Bedarf pro Tag wird in Spalte F („Demand“) mit Hilfe der diskreten empirischen Verteilung erzeugt. Dieser Bedarf wird zusammen mit den Fehlmengen („Shortage Quantity“) des vorausgegangenen Tages vom Lagerbestand am Tagesanfang abgezogen und ergibt so den Lagerbestand am Tagesende („Ending Inventory“).

Bei der (r,S) Lagerhaltungspolitik werden Bestellungen am Ende des Intervalls ausgelöst (vgl. Abschnitt 2.3) und auf ein gewähltes Bestandsniveau angepasst. Diese Bestellungen werden mit Hilfe der Spalten I bis K erzeugt und gesteuert. Um das Ende des Intervalls zu finden, wird in Spalte I („Pending Order (Quantity)“) überprüft, ob der Tag innerhalb des Intervalls (Spalte D) mit der Intervalllänge übereinstimmt, welches der Nutzer vorgegeben hat (Zelle L5). Stimmen die Werte überein, wird eine Bestellung ausgelöst und die Bestellmenge aus der Differenz zum Bestandsniveau errechnet. Diese Differenz ist das vorgegebene Bestandsniveau plus mögliche Fehlbestände abzüglich des Lagerbestands am Tagesende (Spalte G). Um die Bestellung aus I mit einer Vorlaufzeit versehen zu können, überprüft die Spalte J („Lead Time (days)“) wiederum, ob das Intervallende erreicht ist, und berechnet daraufhin die Vorlaufzeit. Diese Berechnung erfolgt mit der diskreten empirischen Verteilung. Damit die Bestellmenge in den Lagerbestand am Tagesanfang (Spalte E) übernommen werden kann, wird die Spalte K („Days until Order Arrives“) benötigt. In diese Spalte wird die Vorlaufzeit aus Spalte J übertragen und bis 1 heruntergezählt. Bei 1 wird die Bestellung am übernächsten Tag zum Lagerbestand am Tagesanfang hinzuaddiert.

Als Kennzahl wird der Mittelwert über alle Lagerbestände am Tagesende berechnet, Zelle G45. Sollen mehrere Durchläufe stattfinden, wird „One Trial“ so oft Neuberechnet, bis die Anzahl der geforderten Durchläufe erreicht ist. Dabei wird nach jedem Durchlauf die vorher genannte Kennzahl in das Tabellenblatt „Experiment“ eingetragen. Sind alle Durchläufe abgeschlossen, wird die Simulation mit Hilfe der Kennzahl ausgewertet.

Seila (2006) gibt vier Einschränkungen für die Simulation mit Tabellenkalkulationsprogrammen an:

- 1) Nur einfache Datenstrukturen sind verfügbar
- 2) Die Implementierung von komplexen Algorithmen ist aufwendig
- 3) Die Ausführung einer Simulation mit Tabellenkalkulationsprogrammen kann länger dauern als mit konventioneller ereignisdiskreten Simulationssoftware
- 4) Die Möglichkeit Daten zu speichern ist limitiert

Um Lösungen zu komplexen Systemen zu erhalten, können diese nach Gutenschwager et al. (2017, S. 37f.) in Teilprobleme zerlegt werden. Die Einflüsse der Teillösungen auf das Gesamtsystem sind dadurch aber noch nicht bestimmt. Dazu müssen die Abhängigkeiten der Teillösungen modelliert werden. Sind diese Abhängigkeiten vielfältig und die Einflüsse aufeinander stark, so stoßen Tabellenkalkulationsprogramme an ihre Grenzen.

Dementsprechend bezeichnet die VDI - Richtlinie 3633 Blatt 9 (2017, S. 2) Tabellenkalkulationsprogramme auch nur als Hilfsmittel für die Durchführung von Simulation. Laut Norm unter-

scheiden sich Tabellenkalkulationsprogramme mit Skriptsprachen aber nicht wesentlich von Programmiersprachen und besitzen damit ähnliches Potential für die Entwicklung von Programmen für die ereignisdiskrete Simulation. Aufgrund des hohen Aufwands für diese Entwicklung, habe dies aber keine praktische Bedeutung. Ähnlich äußern sich auch Kleijnen und Smits (2003, S. 510). Sie sehen eine Überprüfung der Vorschläge einer Manufacturing Resource Planning II Simulation mit Tabellenkalkulationsprogrammen kritisch, da sie Simulation mit Tabellenkalkulationsprogrammen für zu simpel und unrealistisch halten.

Unter den Tabellenkalkulationsprogrammen ist Excel der bekannteste Vertreter (Benker 2014, S. 1) und wird aufgrund der überwiegenden Verbreitung auf Arbeitsplatzcomputern als Standard bezeichnet (Schels und Seidel 2016, S. 4). Nach dem Microsoft Annual Report 2017 (2018) werden die Microsoft Office Produkte für den kommerziellen Gebrauch in Unternehmen von über 100 Millionen Mitarbeitern genutzt. Erweiterungen von Excel (Add-Ins genannt) vereinfachen laut Law (2015, S. 717) eine Simulation mit Excel.

Robinson (2004, S. 42) führt einen Vergleich von Tabellenkalkulationsprogrammen, Programmiersprachen und spezialisierter Simulationssoftware durch (Tabelle 3).

Eigenschaft	Tabellenkalkulationsprogramm	Programmiersprache	Spezialisierte Simulationssoftware
Einsatzbereich	Gering	Hoch	Mittel
Modellierungsflexibilität	Gering	Hoch	Mittel
Dauer Modellbildung	Mittel	Lange	Kurz
Benutzerfreundlichkeit	Mittel	Gering	Hoch
Einfachheit Modellvalidierung	Mittel	Gering	Hoch
Laufgeschwindigkeit	Gering	Hoch	Mittel
Zeit zur Erlernung Softwarefähigkeiten	Kurz (Mittel für Macros)	Lang	Mittel
Preis	Gering	Gering	Hoch

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Simulationswerkzeuge (nach Robinson 2004, S. 42)

Mit Hilfe dieser Tabelle kann der Anwender das passende Simulationswerkzeug für seinen Anwendungsfall aussuchen. Grundsätzlich stellt Robinson (2004, S. 42) fest, dass die Wahl des Simulationswerkzeuges von der Komplexität der Simulationsstudie abhängig ist. Für sehr einfache Simulationsstudien können Tabellenkalkulationsprogramme benutzt werden, da sie vielen Anwendern bekannt sind und die Zeit zum Erlernen der Softwarefähigkeiten kurz sei. Da aber viele Anwendungsgebiete komplexer sind, kann es durchaus notwendig sein mit Programmiersprachen

oder spezialisierte Simulationssoftware zu arbeiten. Mit Hilfe spezialisierter Simulationssoftware lässt sich eine große Spanne an Simulationsmodellen erstellen und nur für hoch komplexe Simulationsmodelle sei die Verwendung von Programmiersprachen angebracht.

3.5 Vorgehen für Simulationsstudien

Im Folgenden wird das Vorgehen für Simulationsstudien kurz zusammengefasst. Die VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 hat „für die Simulationsanwendung in Produktion und Logistik im deutschsprachigen Raum eine erhebliche Bedeutung“ (Rabe et al. 2008, S. 30) und aus diesem Grund wird sich im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit an dieser Vorgehensweise orientiert. Weitere Vorgehensweisen finden sich bei Law (2015, S. 66-70), Banks et al (2014a, S. 14-19) und Robinson (2004, S. 51-61) wieder.

Bevor eine Simulationsstudie begonnen wird, muss nach der VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 19f.) zuerst die Simulationswürdigkeit der betrachteten Problemstellung überprüft werden. Nach der Norm wird die Simulationswürdigkeit unter anderem durch eine Kosten/Nutzen Überprüfung, der Komplexität der Problemstellung, der Unsicherheiten von Daten und ihren Einflüssen auf die Ergebnisgrößen sowie des Mangels anderer Lösungsmethoden mit besserem Kosten/Nutzen Verhältnis beurteilt. Außerdem fließt der Zusammenhang zwischen der vorhandenen Datenqualität und der gewünschten Ergebnisqualität in die Beurteilung mit ein. Baron et al. (2001, S. 125) sowie Banks et al. (2014a, S. 16) machen deutlich, dass die Prüfung der Simulationswürdigkeit erst erfolgen kann, wenn das Problem „klar und eindeutig formuliert ist“. Des Weiteren soll die Problemstellung einer ersten Analyse unterzogen und darauf aufbauend erste Lösungsvorschläge gemacht werden, die auch von einer Lösung mittels Simulation abweichen können. So soll möglichst früh überprüft werden, ob der Zeit- und Kostenaufwand für die Simulation nicht durch die Verwendung einer anderen Lösungstechnik vermieden werden kann. Letztendlich muss die Simulationswürdigkeit von Fall zu Fall überprüft werden, womit es im Ermessen des Experten liegt, zu entscheiden, ob er eine Simulation für gerechtfertigt hält (Gutenschwager et al. 2017, S. 38f.).

Nach der VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 18) gliedert sich die Vorgehensweise bei Simulationsstudien in fünf Phasen. Diese Phasen sind die Aufgabendefinition, die Systemanalyse, die Modellformalisierung, die Implementierung sowie die Experimente und Analyse. Zudem sind die Phasen der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung, parallel verlaufend, neben den anderen Phasen zu finden. Ein grundlegender Aufbau dieses Vorgehens stellt Abbildung 1 dar.

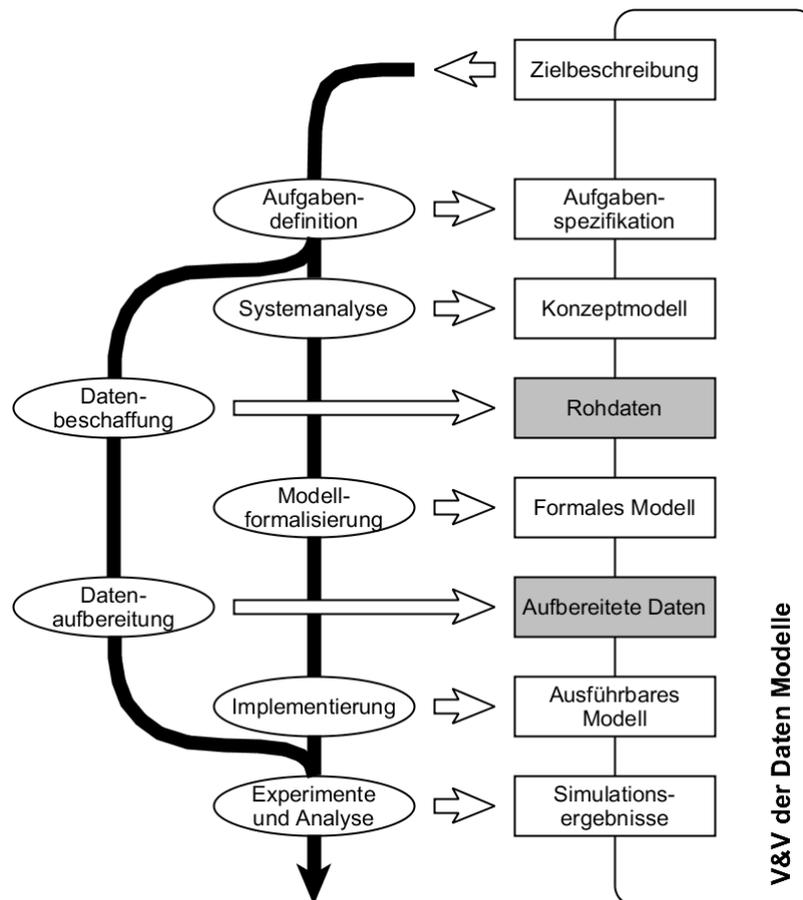


Abbildung 1: Vorgehensweise Simulationsstudie
(nach VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 19)

Wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, gehört zu allen Phasen ein Phasenergebnis. Die Phasenergebnisse werden, je nach ihrer jeweiligen Qualität, mehrmals einer Verifikation und Validierung unterzogen. Diese Vorgehensweise hilft das Risiko von Fehlern in einer Simulationsstudie zu mindern und die Qualität der Phasenergebnisse zu erhöhen (Gutenschwager et al. 2017, S. 145).

Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 144) umfasst die Zielbeschreibung die strukturierte Darstellung des Problems, welches mit der Simulationsstudie gelöst werden soll. Zusätzlich sollte hier begründet werden, wieso die Simulation eine gute Lösungsmethode für das Problem sein könnte.

Die Aufgabendefinition stellt die erste Phase der Vorgehensweise einer Simulationsstudie dar. Mit ihr wird der Inhalt der Zielbeschreibung ergänzt, sodass eine präzise und vervollständigte Zielbeschreibung für die Simulationsstudie gegeben ist. Das Ergebnis dieser Phase wird in der Aufgabenspezifikation festgehalten (Gutenschwager et al. 2017, S. 144). Die VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 21) bezeichnet die Definition eines Zielsystems als wichtigen Vorbereitungsschritt in Bezug auf die Modellentwicklung und Planung der Experimente.

Auf die Aufgabendefinition folgt die Systemanalyse. Gutenschwager et al. (2017, S. 144) führen aus, dass in dieser Phase der Vorgehensweise wesentliche Entscheidungen bezüglich der Modellierung getroffen werden. Vor allem der Detaillierungsgrad (siehe Abschnitt 3.1) der einzelnen zu modellierenden Elemente des Systems und die Systemgrenzen werden bestimmt. Im Zusammenhang mit dem Detaillierungsgrad ist hier die Abstraktion zu nennen (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 23f). Das Ergebnis dieser Phase wird Konzeptmodell genannt, welches zum Beispiel in einem Ablaufdiagramm festgehalten wird (Gutenschwager et al. 2017, S. 144).

Das vorher erstellte Konzeptmodell wird mit Hilfe der Modellformalisierung in das formale Modell überführt. Dabei wird zum Beispiel das Ablaufdiagramm des Konzeptmodells in einen Programmablaufplan überführt. Dieser Schritt ist vom ausgewählten Simulationswerkzeug noch unabhängig (Gutenschwager et al. 2017, S. 144) und kann als Vorbereitung zur Implementierung betrachtet werden (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 31).

Die Implementierung beschäftigt sich mit der Umsetzung des formalen Modells in das Softwaremodell (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 31). Das Softwaremodell wird auch als ausführbares Modell oder Simulationsmodell bezeichnet (Gutenschwager et al. 2017, S. 144). Ob die Implementierung mit Hilfe von vorgefertigten Simulationsbausteinen oder das Modellverhalten mit einer Programmiersprache beschrieben wird, richtet sich in dieser Phase nach dem verwendeten Simulationswerkzeug (Gutenschwager et al. 2017 S. 144).

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, verlaufen parallel zu den beschriebenen Phasen die Datenbeschaffung sowie die Datenaufbereitung. Sie dienen dazu, die benötigten Daten für die Simulationsstudie bereitzustellen (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 33). Mit Hilfe der Datenbeschaffung werden nach Gutenschwager et al. (2017, S. 145) Unternehmensdaten gesammelt und im Ergebnis als Rohdaten angezeigt. Die Datenbeschaffung kann unter anderem auf vorhandene Daten des Unternehmens zurückgreifen oder, falls erforderlich und realisierbar, neue Daten erheben. Die Rohdaten werden mit Hilfe der Datenaufbereitung so bearbeitet, dass sie für das ausführbare Modell genutzt werden können. Zu nennen ist hier unter anderem die Filterung, um relevante Daten zu erhalten, oder die Ermittlung statistischer Verteilungen. Das Ergebnis sind die aufbereiteten Daten. Diese können nun in der Phase der Experimente und Analyse genutzt werden.

Das ausführbare Modell und die aufbereiteten Daten werden für die Phase der Experimente und Analyse miteinander verbunden. Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 145) werden die Experimente mit Hilfe von Experimentplänen durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse aufgezeichnet. Als letzter Schritt findet die Analyse der Ergebnisse statt, mit Hilfe derer sich Schlussfolgerungen über das simulierte System ziehen lassen. Diese Schlussfolgerungen werden wie die Ergebnisse der Experimente und deren Analyse in einem Simulationsergebnis festgehalten.

Um die Simulation durchführen zu können, werden Daten benötigt. Nach VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 33) sind diese Daten „Bestandteil jeder Planung von technischen Systemen“, wobei „der Aufwand für die Datenbeschaffung (wird) von den Projektbeteiligten sehr häufig unterschätzt“ (Wenzel et al. 2008, S. 120) wird. Die VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014, S. 33f.) unterteilt die benötigten Daten in Systemlast-, Organisations- und technische Daten. Eine differenziertere Aufschlüsselung in weitere Gebiete kann Tabelle 4 entnommen werden.

Systemlastdaten			
Auftragseinlastung		Produktdaten	
Produktionsaufträge		Arbeitspläne/Stücklisten	
Transportaufträge			
Mengen			
Termine			
Organisationsdaten			
Arbeitszeitorganisation	Ressourcenzuordnung	Ablauforganisation	
Pausenregelung	Werker	Strategien	
Schichtmodelle	Maschinen	Restriktionen	
	Fördermittel	Störfallmanagement	
technische Daten			
Fabrikstrukturdaten	Fertigungsdaten	Materialflussdaten	Stördaten
Anlagentopologie (Layout, Fertigungsmittel, Transportfunktionen, Verkehrswege, Flächen, Restriktionen)	Nutzungszeit	Topologie des Materialflusssystems	funktionale Störungen
	Leistungsdaten	Fördermittel	Verfügbarkeiten
	Kapazität	Nutzungsart	
		Leistungsdaten	
		Kapazität	

Tabelle 4: Daten der Simulation (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 34)

Nach dem Vorgehensmodell in Abbildung 1 beschäftigen sich die Phasen der Datenbeschaffung und der Datenaufbereitung mit der Ermittlung der Daten bzw. der Bearbeitung der Daten für die Simulationsstudie. Diese Phasen können parallel zur Systemanalyse und der Modellformalisierung verlaufen, zur Implementierung müssen sie aber beendet sein (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 33). Gutenschwager et al. (2017, S. 158) geben noch zu bedenken, dass trotz ihres parallelen Verlaufs die Phasen nicht unabhängig voneinander ablaufen können. Denn das Konzeptmodell kann zum einen die Datenbeschaffung und Datenaufbereitung beeinflussen, zum anderen können vorhandene Informationen das Konzeptmodell beeinflussen. Außerdem sollte beachtet werden, dass nicht alle im Unternehmen vorhandenen Daten bei der Datenbeschaffung und -aufbereitung in Betracht gezogen werden sollten, da sich der Aufwand dieser Phasen dadurch deutlich erhöht, aber nicht unbedingt ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn oder zusätzliche Datenqualität erzeugt wird (Wenzel et al. 2008 S. 120). Aus diesem Grund bezeichnen Wenzel et al. (2008,

S. 120) die Datenbeschaffung und -aufbereitung als „einen erheblichen Risikofaktor für die Modellierung“.

Zu Beginn der Datenbeschaffung und -aufbereitung sollte zwischen Daten und Informationen unterschieden werden (Gutenschwager et al. 2017, S. 159). Daten werden mit Hilfe von „Zeichen mit Regeln zu ihrer Nutzung (Syntax)“ (Gutenschwager et al. 2017, S. 159) dargestellt. Informationen sind Daten, welche zweckgebunden sind und mit einer kontextbezogenen Bedeutung (Semantik) versehen sind (Gutenschwager et al. 2017, S. 159).

Zu Beginn der Datenbeschaffung muss geklärt werden, welche Informationen für die Simulation benötigt werden, und welche Daten aus welchen Quellen dafür zur Verfügung gestellt werden müssen (Gutenschwager et al. 2017, S. 159). Die Quellen sollten nach Gutenschwager et al. (2017, S. 160f.) auf Verfügbarkeit, Zugriffsmöglichkeit und Erhebungsaufwand überprüft werden. Darauf folgt die Datenerhebung. Diese wird in die Primärerhebung und die Sekundärerhebung aufgeteilt. Bei der Primärerhebung werden Daten und Informationen extra für die Simulation erhoben. Bei der Sekundärerhebung werden Sekundärquellen benutzt, das heißt, dass diese Datenquellen innerhalb des Unternehmens schon vorhanden sind.

Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 165f.) kann eine Primärerhebung entweder mittels Befragung oder Beobachtung erfolgen. Die Befragung beinhaltet die Methoden des Interviews oder des schriftlichen Fragebogens. Bei der Beobachtung werden bei der Selbstbeobachtung unter anderem die Methoden des Tagesberichts oder des arbeitsgegenstandsorientierten Laufzettels angewendet. In der Fremdbeobachtung werden die Methoden der Zeitaufnahme oder der Multimomentverfahren eingesetzt. Die Sekundärerhebung erfordert verschiedene Methoden der Dokumentenanalyse, denn die Dokumente liegen in Papier- oder elektronischer Form vor. Für elektronisch vorliegende Dokumente werden Textrecherchefunktionen oder Datenbankabfragen genutzt. Dokumente in Papierform werden gescannt oder manuell gesichtet.

Datenquellen für eine Sekundärerhebung können Systeme der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Enterprise Resource Planning (ERP), Betriebsdatenerfassung (BDE), Lagerverwaltungssysteme (LVS) oder Computer Aided Systeme, wie Computer Aided Design (CAD) oder Computer Aided Manufacturing (CAM) sein (Gutenschwager et al. 2017, S. 162ff.). In Tabelle 5 sind den genannten Datenquellen einige ihrer jeweiligen Daten zugeordnet.

Datenquelle	Daten
PPS	Teilestammdaten, Erzeugnisstrukturdaten, Betriebsmitteldaten, Bewegungsdaten (Lagerbestände, Bedarfe, Aufträge)
ERP	Finanz- und Rechnungswesen, Personalwesen (Qualifikationen, Personalkostensätze), Beschaffungsdaten (Wiederbeschaffungszeiten, aktuelle Sicherheitsbestände), Vertriebsdaten (Prognosedaten für Produktnachfragen)
BDE	Personaleinsatz, Aufträge, Maschinen, Betriebsmittel, Fertigungshilfsmittel, Lager, Material
LVS	Mengen, Material, Lagerorten
CAD	Layoutdaten der Fabrik
CAM	Stücklisten, Montagepläne, eingesetzte Ressourcen

Tabelle 5: Datenquellen und zugehörige Daten

Die erhobenen Daten werden aufbereitet und digital bereitgestellt, wodurch sie als Rohdaten vorliegen (vgl. Phasenergebnis Abbildung 1). Die Rohdaten müssen zur weiteren Verwendung der Datenaufbereitung unterzogen werden. Dabei werden die Rohdaten um fehlerhafte Einträge bereinigt, auf ihre Plausibilität hin überprüft, die für die Simulation erforderliche Granularität der Rohdaten kontrolliert und in die gewünschte Form gebracht. Zusätzlich kann eine statistische Datenanalyse erfolgen, um die Datenqualität zu beurteilen. Tiefergehende Einblicke in die statistische Datenanalyse bietet Robinson (2004, Kapitel 7). Eine ausführlichere Beschreibung des Vorgehens zur Datenerhebung und -aufbereitung findet sich in Gutenschwager et al. (2017, S. 158 - 173) wieder.

3.6 Kriterien zur Beurteilung von Simulationsstudien

Wie bereits in Abschnitt 3.1 angeführt, lassen sich Simulationsstudien und besonders deren Wirtschaftlichkeit nur schwer beurteilen. Eine abschließende Aussage über den Nutzen einer Simulationsstudie kann erst nach dem Projektabschluss getroffen werden. Die Kosten sind allerdings häufig vorab bekannt oder gut einschätzbar. Zu ihnen gehören Personalkosten sowie Lizenz- und Wartungskosten für die eingesetzten Werkzeuge (Gutenschwager et al. 2017, S. 47).

Aus Erfahrungswerten lässt sich folgender Verlauf für die Kosten eines Projektes beispielsweise zur Neuerrichtung einer Fertigungsstraße ableiten:

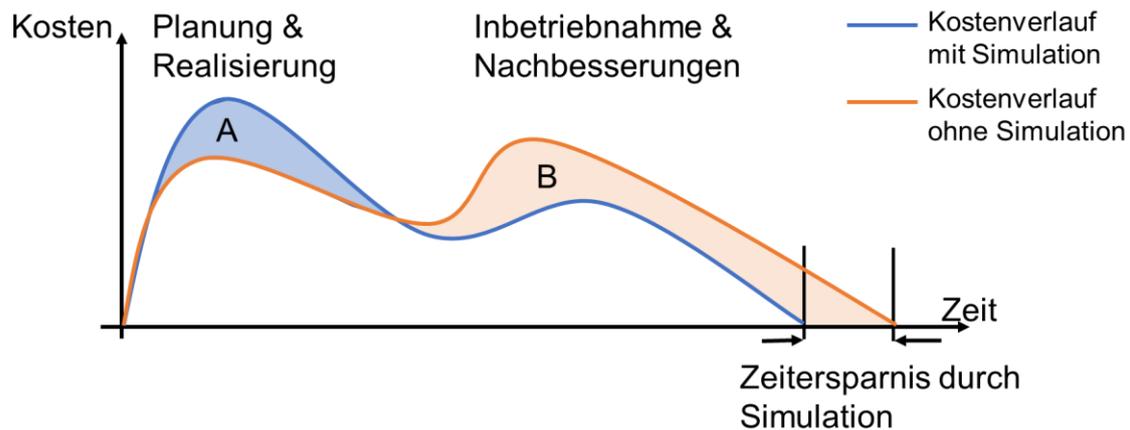


Abbildung 2: Kostenverlauf Simulation (nach Gutenschwager et al. 2017, S. 48)

Die blau dargestellte Kurve beschreibt den Kostenverlauf eines Projektes mit dem Einsatz einer Simulation. Dabei werden initial höhere Kosten verursacht, da die Personal- und Softwarekosten für die Simulation zu den bereits vorhandenen Projektkosten addiert werden müssen. Durch die Simulation und der darauffolgenden Optimierung der Prozesse können allerdings spätere Kosten, die bei der Inbetriebnahme der Anlage oder durch notwendige Nachbesserungen anfallen, verringert werden. Fläche A bezeichnet die Fläche, bei der die Kosten für Projekte mit Simulation höher sind als für Projekte ohne Simulation. Fläche B bezeichnet hingegen die gegenteilige Fläche, bei der die Kosten für Projekte ohne Simulation höher sind. Es wird von einem wirtschaftlichen Nutzen der Simulationsstudie gesprochen, so lange die Fläche A kleiner ist als die Fläche B. (Gutenschwager et al. 2017, S. 48) Dem Graphen ist ebenfalls zu entnehmen, dass die Simulation eine Zeitersparnis mit sich bringt.

Nach Abschnitt 3.1 lässt sich der Nutzen einer Simulationsstudie häufig nur qualitativ bestimmen. Die dort genannten Aspekte lassen sich laut VDI (1997) in weitere Kriterien unterteilen und können Tabelle 6 entnommen werden. Ein Kriterium ist der Sicherheitsgewinn. Er wird erreicht, in dem Planungsvorhaben durch eine Simulation bestätigt werden können und das unternehmerische Risiko verringert sowie die Funktionalität des Systems sichergestellt werden kann. Ein weiterer Aspekt sind preiswertere Lösungen. Diese können beispielsweise durch eingesparte Systemelemente, optimierte Pufferplätze oder verbesserte Arbeitsabläufe erreicht werden. Der nächste Aspekt ist das gute Systemverständnis. Die Systemanalyse zur Erstellung des Konzeptmodelles kann helfen, das vorliegende System sehr frühzeitig besser zu verstehen. Dadurch können wesentliche Parameter identifiziert, Engpässe reduziert sowie der Ablauf des Gesamtsystems dargestellt und analysiert werden. Ein weiterer Aspekt ist die preiswertere Prozessführung. Sie wird erreicht, wenn eine Simulationsstudie bei der Behebung von Betriebsproblemen unterstützt, die Anlaufphase verkürzt oder generell zur Prozessoptimierung und Produktivitätssteigerung beiträgt.

Sicherheitsgewinn	Preiswertere Lösungen	Gutes Systemverständnis	Preiswertere Prozessführung
Bestätigung der Planungsvorhaben	Einsparung/Vereinfachung v. System & Steuerungselementen	Verständnis der Parameter	Entscheidungsunterstützung bei Betriebsproblemen
Minimierung des unternehmerischen Risikos	Optimierte Puffergrößen/Lagerbestände	Engpassreduzierung	Prozessoptimierung & Produktivitätssteigerung
Funktionalität des Systems und der Steuerung	Optimierte Arbeitsabläufe	Analyse und Darstellung des gesamten Ablaufs	Verkürzte Anlaufphase

Tabelle 6: Qualitative Bewertungsaspekte einer Simulationsstudie (nach VDI 2014)

Die obengenannten Bewertungsaspekte für Simulationsstudien generell werden im Blatt 4 der VDI - Richtlinie 3633 (1997) um die folgenden Kriterien für Simulationswerkzeuge erweitert:

- Schulungsmöglichkeiten und Unterstützungsangebote
- geeignete Hardware
- benötigtes Vorwissen
- Angebot an nützlichen Bausteinbibliotheken
- flexible Anpassbarkeit
- Animationsmöglichkeiten
- Verifikation und Validierung

Zu den Schulungsmöglichkeiten und Unterstützungsangeboten gehört nach der VDI - Richtlinie 3633 (1997) beispielsweise das Angebot einer Servicehotline oder die Verfügbarkeit von Handbüchern. Bei der Hardware wird im Besonderen der Anspruch des Werkzeuges an den Prozessor und Hauptspeicher betrachtet. Das benötigte Vorwissen wird eingeteilt in keine Erfahrung erforderlich, Grunderfahrung im Umgang mit einem PC, Programmierkenntnisse und Erfahrung in der Simulationsdurchführung. Nützliche Bausteinbibliotheken können u.a. Puffer oder Arbeitsstationen sein. Flexible Anpassbarkeit wird beispielsweise durch die Unterstützung von Programmiersprachen gewährleistet und die Verifikation und Validierung kann durch eine Syntaxkontrolle, aussagekräftige Fehlermeldungen und Debugger unterstützt werden.

4 Vorbereitung der Untersuchung

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein standardisierter Ablaufplan erstellt und dann schrittweise abgearbeitet. Des Weiteren werden Bewertungskriterien zur Beurteilung des Werkzeugeinsatzes ausgewählt.

4.1 Erstellung eines standardisierten Ablaufplanes

Um die Versuche im Simulations- und Tabellenkalkulationsprogramm miteinander vergleichen zu können, sollen sie standardisiert durchgeführt werden. Dazu wird ein Ablaufplan zu Grunde gelegt, der eine Vorgehensweise für beide Versuche vorgibt. Der Ablaufplan wird in Anlehnung an das Vorgehensmodell für Simulationsstudien des VDI erstellt (vgl. Abschnitt 3.5). Dennoch gibt es bei einigen Punkten Unterschiede zum Modell des VDI.

Das in dieser Arbeit verwendete Vorgehensmodell besteht aus insgesamt acht Schritten, die teilweise parallel ablaufen (vgl. Abb. 3). Begonnen wird mit einer Aufteilung der Pfade. Der Hauptpfad startet mit der Auswahl der Problemstellung. Unter diesem Punkt werden die ersten beiden Schritte des VDI - Vorgehensmodells, die Zielbeschreibung und die Aufgabendefinition, zusammengefasst (vgl. Abschnitt 3.5). Mit diesem Ergebnis wird dann das formale Modell erstellt. Parallel zur Auswahl der Problemstellung werden die durchzuführenden Experimente entworfen. Sie sollen für beide Werkzeuge exakt gleich sein, um die Vergleichbarkeit der Werkzeuge zu garantieren. Die entworfenen Experimente werden dann im Schritt der Experimentdurchführung wieder in den Hauptpfad eingespeist.

Der zweite Schritt des Hauptpfades ist die Erstellung des formalen Modells, das für beide Werkzeuge ebenfalls das Gleiche ist. Auch der nächste Schritt, die Datenvorbereitung wird für beide Werkzeuge gleich ausgeführt. Dies ist möglich, da die Eingangsdaten mit Excel aufbereitet werden und dann einerseits von Excel weiterverwendet werden, andererseits in Plant Simulation importiert werden können. Erst beim Schritt der Implementierung wird der Hauptpfad aufgeteilt und nach den Werkzeugen unterschieden (vgl. Abb. 3). In jedem Werkzeug wird das formale Modell implementiert, mit ihm experimentiert und die Ergebnisse ausgewertet. Bei der Beurteilung der Einsatzfähigkeit werden wieder beide Werkzeuge zusammen bewertet.

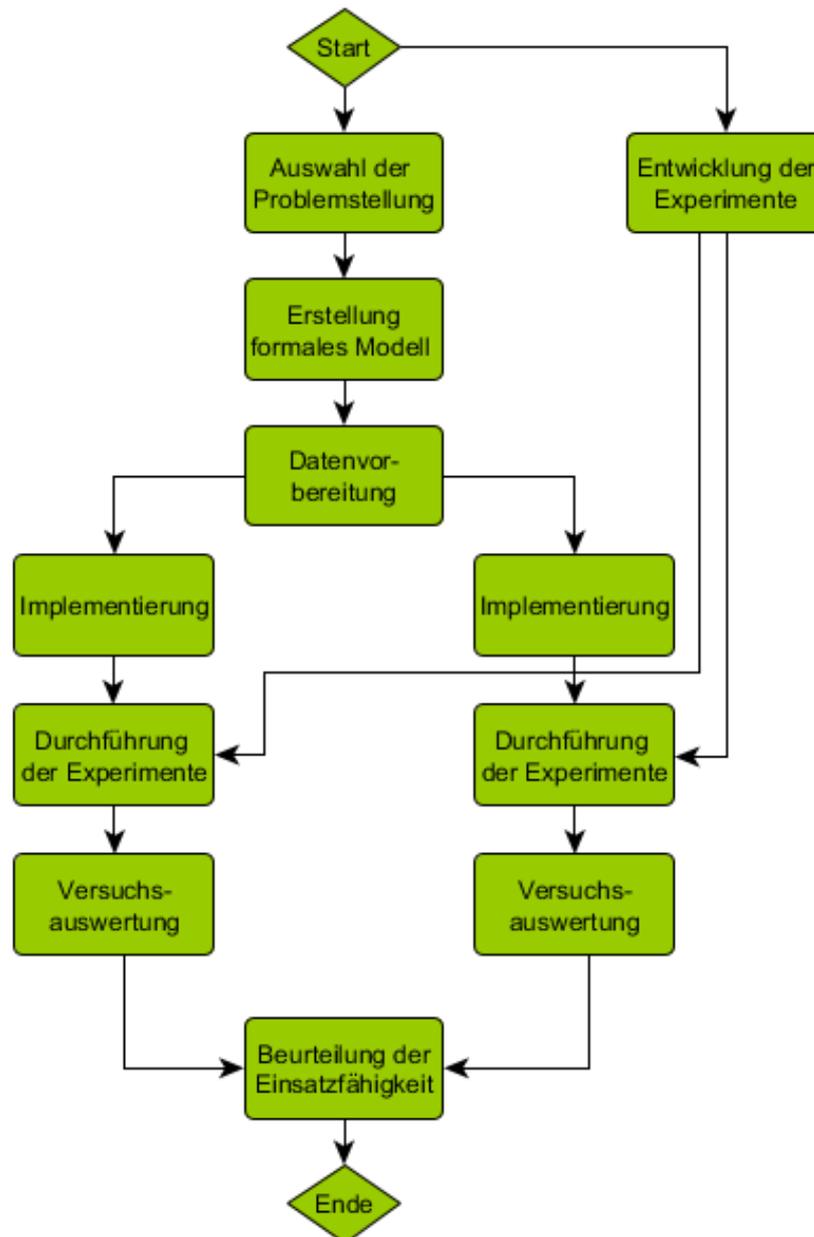


Abbildung 3: Ablaufplan Versuchsdurchführung

4.2 Auswahl der Problemstellungen

Die Herausforderungen und Problemstellungen des Inventory Managements sind äußerst vielfältig (vgl. Abschnitt 2.2). Für die nachfolgenden Versuche sollen die, nach Ansicht der Autoren, bedeutsamsten Problemstellungen ausgewählt werden.

Grundlage der folgenden Untersuchungen ist ein Lagerhaltungsprozess. In einem Lager werden ausschließlich Güter eines Produkttyps eingelagert. Für dieses Produkt gibt es eine Datenbasis, die die zurückliegenden Bestellungen beschreibt. Ausgehend von dieser Basis werden die vier in

Abschnitt 2.3 vorgestellten Lagerhaltungspolitiken (r,q) , (s,q) , (r,S) und (s,S) auf ihre Güte geprüft. Da es sich nicht um verderbliche Güter handelt und alle Güter vom gleichen Typ sind, wird für alle Versuche eine FIFO-Auslagerungsstrategie vorausgesetzt.

Der beschriebene Prozess lässt sich zum einen in den ausgewählten Werkzeugen implementieren. Zum anderen können die verschiedenen Optimierungspotentiale, die sich aus den Problemstellungen ergeben, anhand dieses Prozesses gut dargestellt werden. Grundlegendes Ziel bei Optimierungen im Inventory Management ist die Bestandsreduzierung (vgl. Abschnitt 2.1). Daher sind verringerte Bestände auch bei den Versuchen in dieser Arbeit eines der Hauptziele. Ausgehend von der derzeitigen Bestandssituation sollen mögliche Verfahren zur Bestandsreduzierung in dem Lager simuliert werden. Die hohen Bestände verursachen in der weiteren Betrachtung hohe Kosten. Allein das durch sie gebundene Kapital fehlt in anderen Bereichen für Investitionen. So ist zum Beispiel die Einführung einer intelligenten, schlankeren Produktion sehr teuer. Hohe Bestände und dadurch viel gebundenes Kapital könnte eine Firma daran hindern, die finanziellen Mittel aufzubringen, um die eigene Produktion neu aufzustellen. Des Weiteren bergen Bestände immer ein Verlustrisiko. Dies ist ebenfalls eine Herausforderung des Inventory Managements (vgl. Abschnitt 2.1). Je länger ein Gut im Lager liegt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert des Gutes sinkt. Offensichtlich wird dies bei verderblichen Waren. Lebensmittel zum Beispiel werden unverkäuflich und müssen schnell umgeschlagen werden. Zeitlicher Wertverlust trifft auch Artikel, die einen kurzen Lebenszyklus haben. Beispielsweise sind Kleidungsstücke nach einer Saison oft aus der Mode und sinken im Preis. Technikartikel, wie Smartphones oder Notebooks, entsprechen bereits nach einigen Monaten nicht mehr dem aktuellen Entwicklungsstand. Ein Verlust der Güter kann aber auch durch andere Ereignisse, wie zum Beispiel Diebstahl, Sachbeschädigung oder Unfälle, ausgelöst werden. Trotz dieser Risiken wird ein Lagerbestand benötigt, so dass innerhalb einer akzeptablen Zeit auf alle Kundenwünsche reagiert werden kann. Eine geeignete Balance zwischen niedrigen Beständen und schneller Kundenbelieferung zu finden, ist eine der Hauptproblemstellungen des Inventory Managements.

Der oben beschriebene Lagerhaltungsprozess soll auch die angrenzenden Prozesse der Nachbestellung und der Lagerabgänge berücksichtigen. Daher lassen sich weitere Problemstellungen des Inventory Managements betrachten. Häufig macht es Sinn, größere Mengen bei dem Zulieferer zu ordern. Einerseits gibt es bei großen Abnahmemengen häufig Lieferrabatte, andererseits können Liefer- und Transportkosten eingespart werden. Bei mehreren kleineren Bestellungen treten die Fixkosten einer Bestellung jedes Mal auf. Wird mehr und dafür in zeitlich größeren Abständen bestellt, können Fixkosten eingespart werden. Idealerweise kann durch Zusammenlegung von Transporten auch die Auslastung der Transportmittel erhöht und dadurch einzelne, nur halbvolle Transporte vermieden werden.

Zusammenfassend soll im Versuch „Lagerhaltung“ die beste Lagerhaltungspolitik, die die vorhandenen Bestände reduziert und die auftretenden Verlustrisiken minimiert, gefunden werden. Zudem sollen Nachbestellmengen optimiert werden, um damit verbundene Kosten zu senken. Als weitere wesentliche Rahmenbedingung des Versuches soll jeder Kundenwunsch innerhalb des Simulationslaufes erfüllt werden können. Eine Übersicht der behandelten Problemstellungen gibt Abbildung 4.

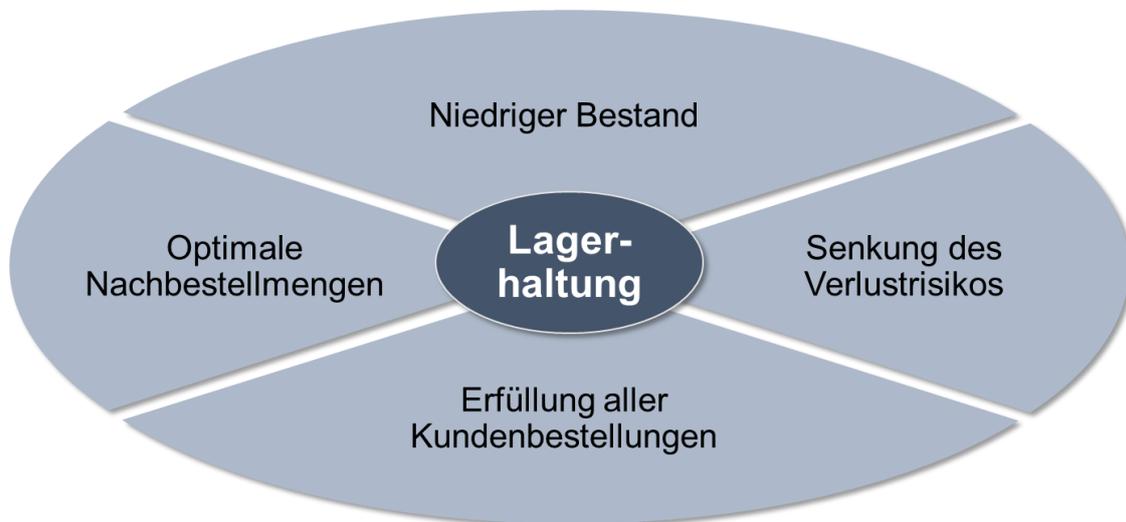


Abbildung 4: ausgewählte Problemstellungen Versuch „Lagerhaltung“

Die Auswertung des Versuches Lagerhaltung erfolgt anhand der in Abschnitt 2.1 definierten Kennzahlen. Dazu werden der durchschnittliche Lagerbestand, die Verweildauer und die Lagerzinsen bestimmt (vgl. Formeln 1 - 3). Wünschenswert wäre die Reduzierung aller drei Kennzahlen, um die Leistungsfähigkeit der Lagerhaltung zu maximieren und gleichzeitig die entstehenden Kosten zu minimieren.

4.3 Entwurf der Experimente

Ausgehend von den definierten Zielen werden mit den beiden Werkzeugen Excel und Plant Simulation die im Folgenden beschriebenen Experimente auf der Grundlage des implementierten Modells durchgeführt. Zunächst wird zwischen den einzelnen Lagerhaltungspolitiken aus Abschnitt 2.3 unterschieden. Innerhalb einer Lagerhaltungspolitik werden zwölf Experimente mit jeweils fünf Replikationen durchgeführt. Die beiden Parameter (z.B. r und q bei der (r,q) -Politik) werden für jedes Experiment zufällig innerhalb eines Intervalls berechnet (vgl. Tabelle 7). Für die Intervalle wurden realistische Annahmen getroffen. Das Bestellintervall liegt dabei zwischen zwei und drei Tagen, da sonst bei der bekannten Abgangsmenge das Lager zu oft leer werden würde. Die konstante Nachbestellmenge wurde zwischen 1000 und 1500 Einheiten festgelegt.

Der Meldebestand beträgt zwischen 774 und 1548 Einheiten und beträgt mindestens den Wert der durchschnittlichen Abgänge je Zweitagesintervall.

Das gewünschte Bestandsniveau variiert zwischen 1500 und 2000 Einheiten. Das Lager soll also mindestens zu 75% gefüllt sein. Maximal kann das Lager 2000 Einheiten aufnehmen.

Lagerhaltungs- politik	Variierter Parameter	Untere Intervallgrenze	Obere Intervallgrenze
(r,q)	r [Tage]	2	3
	q [Stückzahl]	1000	1500
(s,q)	s [Stückzahl]	774	1548
	q [Stückzahl]	1000	1500
(r,S)	r [Tage]	2	3
	S [Stückzahl]	1500	2000
(s,S)	s [Stückzahl]	774	1548
	S [Stückzahl]	1500	2000

Tabelle 7: Intervalle der variierten Simulationsparameter

Im Rahmen der einzelnen Experimente bleiben die beiden Parameter der Lagerhaltungspolitik konstant. In den jeweils fünf Replikationen wird lediglich der Lageranfangsbestand als Startwert variiert. Der Anfangsbestand des Lagers wird für jeden Replikationslauf mit der Zufallsfunktion von Excel ermittelt. Zusammengefasst werden alle Werte in der Exceldatei „Simulationsdaten“, nach der alle Experimente im Folgenden durchgeführt werden.

4.4 Erstellung der formalen Modelle für die Versuchsdurchführung

Damit die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Problemstellungen in Excel und Plant Simulation simuliert und die Ergebnisse miteinander verglichen werden können, muss das Vorgehen bei der Simulation gleich sein. Hierbei hilft der aus dem Vorgehen für Simulationsstudien in Abschnitt 3.5 bekannte Programmablaufplan. Dieser ist vom verwendeten Simulationswerkzeug unabhängig. Der erstellte Programmablaufplan ist in Abbildung 5 zu finden und basiert auf dem ASIM Vorgehensmodell.

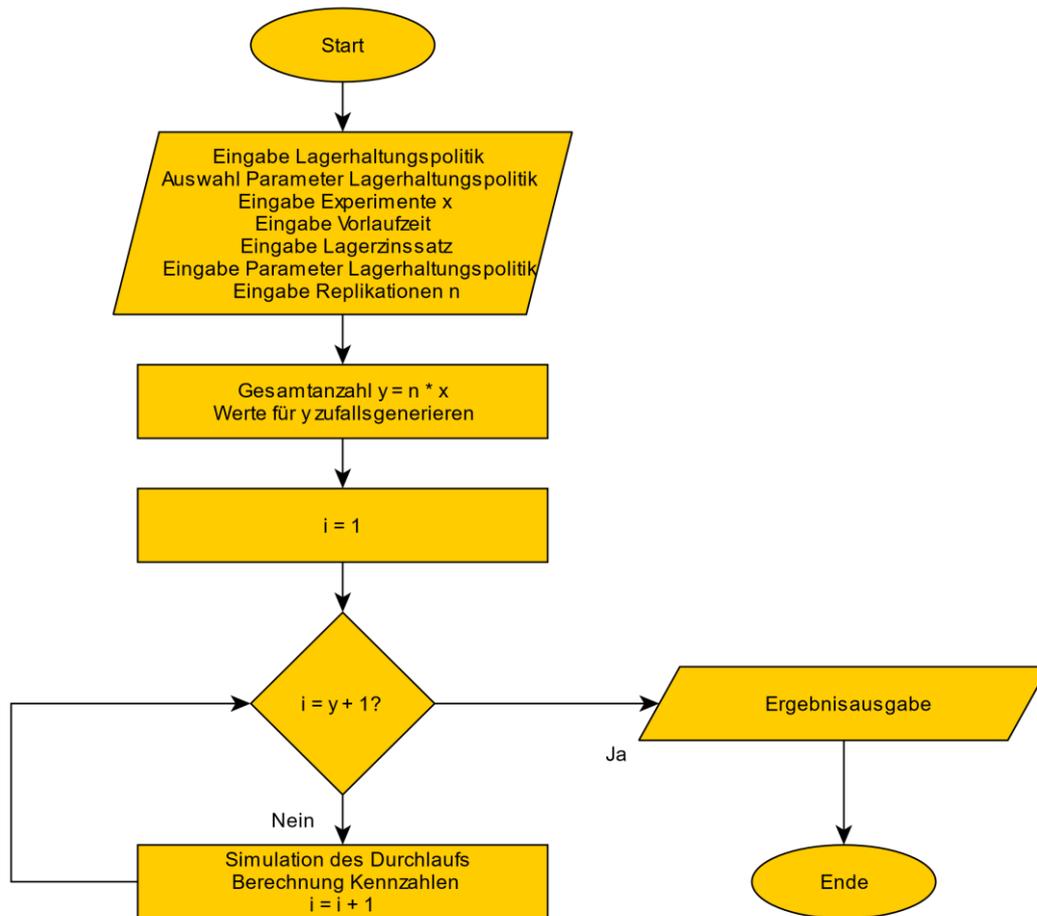


Abbildung 5: Programmablaufplan der Simulation (eigene Darstellung)

Nach dem Start werden verschiedene Eingaben getätigt. Als erstes wird die Lagerhaltungspolitik („Eingabe Lagerhaltungspolitik“) ausgewählt. Hier stehen die (r,q)-, der (s,q)-, der (r,S)- oder der (s,S)-Lagerhaltungspolitik (siehe Abschnitt 2.3) zur Auswahl. Danach folgt die Auswahl des Parameters der Lagerhaltungspolitik, welche zufallsgeneriert werden („Auswahl Parameter Lagerhaltungspolitik“). Es ist möglich einen der Beiden oder beide Parameter zu generieren. Soll beispielsweise eine (r,q) Lagerhaltungspolitik simuliert werden, so kann entweder der Parameter r, der Parameter q oder r und q verändert werden. Mit „Eingabe Experimente x“ wird die Anzahl der auszuführenden Experimente festgelegt. Als vierte Eingabe wird die Vorlaufzeit für die Lieferungen eingegeben („Eingabe Vorlaufzeit“). Zur Berechnung der Lagerzinsen (vgl. Abschnitt 2.1) wird der Lagerzinssatz benötigt. Dieser ist in diesem Schritt einzugeben („Eingabe Lagerzinssatz“). Für die ausgewählte Lagerhaltungspolitik werden im nächsten Schritt die minimalen und maximalen Werte der Parameter festgelegt („Eingabe Parameter Lagerhaltungspolitik“). Die Zufallsgenerierung wird zwischen den hier eingegebenen minimalen und maximalen Werten durchgeführt. Wird nur einer der beiden Parameter zufallsgeneriert, wird der andere auf den eingegebenen Maximalwert gesetzt. Zuletzt erfolgt die Eingabe der Anzahl der Replikationen („Eingabe Replikationen n“).

Anschließend wird die Gesamtanzahl aller Simulationsdurchgänge y berechnet. Sie ist das Ergebnis der Multiplikation der Anzahl der Experimente und der Anzahl der Replikationen. Für diese Gesamtanzahl werden die Werte der Parameter zufallsgeneriert. Um eine übersichtliche Darstellung zu ermöglichen und die Simulation mit gleichen Werten wiederholen zu können, werden alle Werte dem jeweiligen y zugeordnet und in eine Ergebnistabelle eingetragen.

Darauffolgend wird der erste Simulationslauf gestartet („Simulation des Durchlaufs“). Die Grundlage der Simulation ist eine Funktion, mit der über einen gegebenen Zeitraum die Lagerab- und -zugänge mit einem Lagerbestand verrechnet werden. Kommen Fehlbestände vor, müssen diese aufgezeigt und wertmäßig erfasst werden, zusätzlich sollte die Bestellmenge jeder Bestellung angezeigt werden. Für die einzelnen Lagerhaltungspolitiken werden zusätzliche Funktionen benötigt. Diese Funktionen orientieren sich an der Beschreibung der Lagerhaltungspolitiken in Abschnitt 2.3.

Wird eine (r,q) Lagerhaltungspolitik simuliert, muss nach jedem Ablauf des Intervalls r eine Bestellung mit konstanter Bestellmenge ausgeführt werden. Dazu muss eine Funktion überprüfen, ob die Zeit des Intervalls r abgelaufen ist, und daraufhin eine Bestellung auslösen. Bei der Simulation einer (s,q) Lagerhaltungspolitik muss zudem eine weitere Funktion am Ende jedes Tages kontrollieren, ob der Meldebestand s unterschritten wurde. Ist dies der Fall, wird eine Bestellung mit konstanter Bestellmenge ausgeführt. Die Funktion für eine (r,S) Lagerhaltungspolitik überprüft, wann das Intervall r abgelaufen ist, und führt anschließend eine Bestellung bis zum Bestandsniveau aus. Bei der (s,S) Lagerhaltungspolitik wird ebenfalls bis zum Bestandsniveau bestellt. Diese Bestellung wird aber erst ausgelöst, wenn der Meldebestand s unterschritten wurde und dies von einer weiteren Funktion gemeldet wurde.

Am Ende jedes y werden die, in Abschnitt 2.1 eingeführten, Kennzahlen berechnet („Berechnung Kennzahlen“). Die Kennzahlen werden auch in die Ergebnistabelle eingetragen. Dies wird so lange wiederholt, bis der laufende Parameter i gleich der Gesamtanzahl aller Simulationsdurchgänge y plus 1 ist ($i = y + 1$). Mit der Ergebnisausgabe endet die Simulation.

4.5 Auswahl und Aufbereitung der Daten zur Modellimplementierung

Bei der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung für die Simulation in Kapitel 5 kann das Vorgehensmodell aus Abschnitt 3.5 herangezogen werden. Im Falle dieser Arbeit ist der Aufwand für die Datenbeschaffung überschaubar, denn es werden Daten aus dem EU Projekt U-Turn verwendet. Der Zugang dazu wurde vom Fachgebiet IT in Produktion und Logistik der TU Dortmund

bereitgestellt. Da die Daten bereits vorliegen, braucht eine Datenerhebung innerhalb der Datenbeschaffung nicht mehr zu erfolgen. Auch eine Entscheidung über die zu verwendenden Datenquellen entfällt.

Der verwendete Datensatz liegt als Excel Tabelle vor und umfasst die Tabellenblätter „Transports“, „Deliveries“, „Vehicles“ und „location_list“. Die Excel Tabelle ist, dem Vorgehensmodell zur Simulation (Abbildung. 1) folgend, das Phasenergebnis der Datenbeschaffung und wird deswegen im Weiteren als Rohdaten bezeichnet.

Um die Rohdaten in der Simulation verwenden zu können, werden sie der Datenaufbereitung unterzogen (vgl. Abschnitt 3.5). Weil in dieser Arbeit die Simulation verschiedener Lagerhaltungspolitiken im Rahmen des Inventory Managements durchgeführt wird, ist dafür die Art des verwendeten Fahrzeugs zum etwaigen Transport nicht relevant. Aus diesem Grund wird das Tabellenblatt „Vehicles“ und die Spalte „Vehicle’s ID“ in „Transports“ entfernt.

In dem genutzten Datensatz beliefert ein Lagerhaus insgesamt 6500 kodierte Lieferpunkte („Deliverypoint“ in „Deliveries“). Werden die Koordinaten der einzelnen Lieferpunkte in „locations_list“ betrachtet, so wird deutlich, dass für viele Lieferpunkte die gleichen Koordinaten vorliegen. Daraus lässt sich schließen, dass nicht jeder kodierte Lieferpunkt einen einzelnen Kunden darstellt, sondern mehrere der kodierten Lieferpunkte für einen Kunden stehen oder sich mehrere Kunden an einem Standort befinden. Identische Lieferpunkte könnten weiter zusammengefasst werden. Die Simulation in dieser Arbeit betrachtet aber nicht den Weg zum Kunden. Somit können die Standorte der Kunden sowie die Lieferpunkte als irrelevant betrachtet werden. Aus diesem Grund werden das Tabellenblatt „locations_list“, die Spalte „Deliverypoint“ in „Deliveries“ und „Transport Start Point“ in „Transports“ entfernt. Des Weiteren erfolgt die Löschung aller leeren Spalten. Da nur die Auslieferung eines Produktes erfolgt, wird auch die Spalte „Load type“ in „Deliveries“ gelöscht.

Bei der Betrachtung der kodierten Transport IDs („Deliveries“) im Tabellenblatt „Deliveries“ fällt auf, dass einige Transport IDs mehrfach vorkommen. Durch Zusammenfassen dieser häufigen auftretenden Einträge reduziert sich die Anzahl der Datensätze von 50.546 auf 7.951. Beim Zusammenfassen der Datensätze wird die Liefermenge entsprechend aufsummiert.

Im Tabellenblatt „Transports“ kommt jede Transport ID einmalig vor. Zudem ist jeder Transport ID ein Datum zugeordnet. In einem ersten Schritt wird jeder Transport ID in einer neuen Spalte „Liefermenge“ ihre jeweilige Liefermenge zugeordnet. Die Datensätze bestehen jetzt aus der Kombination Transport ID - Datum Transport - Liefermenge. Da die Simulation in dieser Arbeit nur die Kombination Datum Transport - Liefermenge benötigt, entfällt die Spalte mit den Transport IDs. Durch diesen Schritt ergeben sich unterschiedliche Liefermengen an identischen Datumsangaben. Aus diesem Grund werden in einem letzten Schritt die mehrfach vorkommenden

Datumsangaben zusammengefasst und ihre jeweiligen Liefermengen aufsummiert. Hiermit reduzieren sich die Datensätze weiter von 7.951 auf 145.

4.6 Auswahl von Bewertungskriterien zur Versuchsbewertung

Wie in Abschnitt 3.6 dargestellt, ist die Bewertung der Durchführung einer Simulationsstudie nicht trivial. Der Nutzen einer Simulation lässt sich in der Regel nur schwer quantifizieren. Eine detaillierte Analyse ist oft nur im Nachgang zur Studie durchführbar. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Auswertung der Versuchsdurchführungen sowohl für das Simulationswerkzeug als auch für die Tabellenkalkulation in einem Netzdiagramm dargestellt (vgl. Abb. 6). Dazu werden die in Abschnitt 3.6 vorgestellten Kriterien des VDI zugrunde gelegt. Das Netzdiagramm beinhaltet zwölf Kriterien. Jedes Kriterium besitzt die Ausprägungen stark, schwach und mittel. Das Ergebnis eines Werkzeuges wird in jeder Kriterienkategorie in das Netzdiagramm eingetragen.

Zu den wichtigsten Aspekten einer Bewertung zählen die im Rahmen der Simulationsstudie entstehenden zusätzlichen Kosten. Gegen sie muss jeglicher monetäre Gewinn aufgerechnet werden. Auch qualitative Ergebnisse müssen mit den Zusatzkosten ins Verhältnis gesetzt werden. Hierbei kann die Bewertung allerdings schwierig sein, da es keine objektiven Kriterien dafür gibt, bis zu welchen Zusatzkosten sich beispielsweise ein Zugewinn in der Prozessqualität lohnt. Für den Implementierungsaufwand werden die Kosten unter Zuhilfenahme realer Kostensätze auf der Basis von Herstellerangaben geschätzt (vgl. Tabelle 12). Den Kosten gegenüber steht das Potential, mit Hilfe des Werkzeuges mögliche Einsparungen im realen System, die sich durch die in der Untersuchung geprüften Maßnahmen ergeben, zu entdecken. Teilweise können diese Einsparungen direkt sein, wie zum Beispiel Abbildung 2 zu entnehmen ist, oder sie ergeben sich indirekt aus den qualitativen Verbesserungen, die nach der Durchführung einer Simulationsstudie umgesetzt werden. Das Potential, mögliche Einsparungen zu entdecken, ist das zweite Kriterium in dem Netzdiagramm.

Die qualitativen Verbesserungen sind vielfältig und fließen in Anlehnung an die VDI - Richtlinie (vgl. 3.6) in das Netzdiagramm ein. Wichtigster Punkt hierbei ist die Absicherung von Planungsvorhaben. Bei Neuplanungen von Produktionsanlagen oder Logistiknetzwerken sind die realen Betriebsdaten vorher natürlich nicht bekannt, so dass etwaige positive Auswirkungen oder Risiken der Neuplanung nur abgeschätzt werden können. Mit einer Simulationsstudie lassen sich diese Parameter mit Daten untermauern. Bei der Durchführung der Simulationsstudie werden häufig eventuelle Schwachstellen aufgedeckt, die einer erfolgreichen Umsetzung entgegenstehen. Allerdings muss den Aussagen der Werkzeuge vertraut werden können, da sie sich erst nach der

Realisierung des geplanten Vorhabens bestätigen lassen. Bei der Bewertung der beiden Werkzeuge ist es daher von besonderem Interesse, mit welcher Genauigkeit sie die Planungsvorhaben absichern können. Deshalb fließt die Genauigkeit der Absicherung von Planungsvorhaben als drittes Kriterium in das Netzdiagramm ein.

Ein weiteres Kriterium, auf das die Werkzeuge untersucht werden, ist die Fähigkeit, zu einem besseren Systemverständnis beizutragen. Ein gutes Verständnis des realen Systems kann dazu führen, dass Schwachstellen entdeckt werden. Durch eine Beseitigung der Schwachstellen kann die Produktivität des Systems verbessert werden. Komplexe Systeme können durch ein besseres Systemverständnis eventuell vereinfacht und Anlaufzeiten neuer Systeme verkürzt werden. Das Werkzeug soll daher Transparenz schaffen und dabei helfen, das Verständnis für das reale System zu vertiefen. Das Potential eines Werkzeuges, ein besseres Systemverständnis zu erzeugen, ist deshalb das vierte Kriterium im Netzdiagramm. Eng mit dem Systemverständnis verknüpft ist die Reduzierung der benötigten Durchlaufzeiten. Wünschenswert wäre es, wenn das eingesetzte Werkzeug zur Durchlaufzeitenreduzierung beiträgt. Das Potential dazu ist das fünfte Kriterium (vgl. Abb. 6).

Weitere werkzeugbezogene Kriterien sind beispielsweise die Schulungsmöglichkeiten und Unterstützungsangebote. Bewertet wird hier, ob es Schulungen durch Hersteller oder fachlich kompetente Institutionen gibt. Die Unterstützungsangebote umfassen Handbücher, weitere Lehrbücher für den Umgang mit den Werkzeugen, so wie eine ausreichende Anzahl an Möglichkeiten des Austausches verschiedener User. Diese beiden Kriterien werden im Netzwerkdiagramm zusammengefasst. Ebenfalls relevant ist das benötigte Vorwissen. Gerade bei Neueinführungen muss der initiale Schulungs- und Vorbereitungsaufwand der Mitarbeiter berücksichtigt werden. Die VDI - Richtlinie (vgl. Abschnitt 3.6) spricht von verschiedenen Erfahrungsstufen. Dabei wird bewertet, welches Vorwissen der bedienende Mitarbeiter mitbringen muss. Die Erfahrungen können von Grundkenntnissen am PC bis zu umfassenden Simulationserfahrungen reichen. Zusätzlich muss eine geeignete Hardware bereitstehen, die in der Lage ist, die Software auszuführen. Die Kriterien Vorwissen und Hardwareanforderungen werden in dem Netzdiagramm daher ebenfalls dargestellt.

Des Weiteren wird das Werkzeug bezüglich seines Lieferumfangs bewertet. Geprüft wird, ob das Werkzeug bereits nützliche Bibliotheken für Bausteine, Formeln oder Quellcodeblöcke besitzt. Das nächste Kriterium des Netzdiagrammes ist die Flexibilität der Werkzeuge. Sie müssen an ein vorliegendes Modell anpassbar sein. Dies kann entweder durch Tailoring der Bausteine oder aber durch einen eigenständig entwickelten Quellcode erfolgen. Die abschließenden Kriterien sind einmal die Animationsmöglichkeit des Modells und die Fähigkeit des Werkzeuges, bei der Verifikation und Validierung (V&V) zu unterstützen. Bei dem Kriterium der Animationsmöglichkeit wird bewertet, in wie weit die Werkzeuge das formale Modell abbilden können. Des Weiteren soll

überprüft werden, wie die Werkzeuge den Simulationsdurchlauf grafisch darstellen und die Ergebnisse ausgeben können.

Das letzte Kriterium, welches in das Netzdiagramm eingetragen wird, ist die Unterstützung des Werkzeuges bei der Fehlerfindung. Untersucht wird, ob Debugging-Funktionen existieren und Fehler vom Modell gemeldet werden. Weitere Funktionen, wie zum Beispiel die Dialog-basierte Ausgabe von (Zwischen-)Ergebnisse, werden ebenfalls berücksichtigt.



Abbildung 6: Bewertungsvorlage zur Einsatzfähigkeit der Werkzeuge

5 Versuchsdurchführung und Auswertung im Rahmen der Untersuchung

Unter Berücksichtigung des zuvor ausgearbeiteten Ablaufplanes wird das formale Modell in den beiden Werkzeugen Excel und Plant Simulation implementiert und die entwickelten Experimente durchgeführt

5.1 Versuchsdurchführung in Excel

Die Problemstellungen des „Lagerhaltungsprozesses“ aus Abschnitt 2.2 wird für jede der vier Lagerhaltungspolitiken in Excel implementiert. Nach der Implementierung werden die Experimente durchgeführt und ausgewertet.

5.1.1 Implementierung des formalen Modells

Wie im Abschnitt 3.4 erwähnt, ist Excel der bekannteste Vertreter der Tabellenkalkulationsprogramme und wird in kommerzieller Verbreitung als Standardprogramm angesehen. Außerdem existiert die Simulation einer (r,S) Lagerhaltungspolitik mit Excel von Banks et al. bereits und die Datei sowie der VBA Code sind frei zugänglich. Aus diesem Grund wird die Versuchsdurchführung im Tabellenkalkulationsprogramm mit Excel ausgeführt.

Zu Beginn wird das in Abschnitt 4.4 erstellte formale Modell in die Struktur von Excel überführt. Die Eingabe der Lagerhaltungspolitik und die Auswahl des Parameters, welcher zufallsgeneriert wird, erfolgt mit Hilfe von Drop Down Menüs im Tabellenblatt „Parameter“. Im gleichen Tabellenblatt werden in den grün eingerahmten Zellen die Anzahl der Experimente, die Vorlaufzeit, der Zinssatz für die Kennzahlberechnung sowie die Anzahl der Replikationen eingegeben.

Die Anzahl der Experimente für diese Arbeit beträgt 12. Die Vorlaufzeit wird mit 2 Tagen angegeben und der Lagerzinssatz ist auf 1,5% gesetzt. Während jedes Simulationslaufs werden drei Messwerte erhoben. Dies sind der erste (Zelle G11) und letzte Wert (Zelle G196) des Lagerbestands am Tagesende sowie die Summe aller Lagerabgänge (Bereich F11: F195). Nach Gutenchwager et al. (2017, S. 187 f.) kann bei einfachen Simulationen die Anzahl der Messgröße mit der Anzahl der Replikationen gleichgesetzt werden. In diesem Fall wäre die Anzahl der Replikationen gleich 3. Um statistisch abgesichert zu sein, haben die Autoren die Anzahl der Replikationen auf 5 erhöht. Pro Experiment werden somit 5 Replikationen durchgeführt, was sich zu 60 Simulationsdurchgängen summiert.

Außerdem werden in den grün umrahmten Zellen die minimalen und maximalen Werte der Parameter sowie des Anfangslagerbestands eingetragen. Zwischen diesen Werten findet die Zufallsgenerierung statt. Mit einem Mausklick auf „Bestandsparameter generieren“ startet die Zufallsgenerierung. In dieser Arbeit wird die Zufallsgenerierung mit folgender Funktion durchgeführt:

```
Function RandomNumber(x As Integer, y As Integer) As Integer
    Randomize
    RandomNumber = Int((y - x + 1) * VBA.Rnd + x)
End Function
```

(4)

Als Eingabevariablen besitzt die Funktion x und y . Für x wird der minimale Wert des Parameters eingesetzt und für y der Maximale. Mit Hilfe von „Randomize“ wird der Startwert des Zufallsgenerators „VBA.Rnd“ auf die aktuelle Systemzeit des verwendeten PCs gesetzt. „Int“ entfernt die Nachkommastelle des Ergebnisses von „ $(y - x + 1) * \text{VBA.Rnd} + x$ “. So kann ein zufälliger, ganzzahliger Wert zwischen den Eingabevariablen x und y erzeugt werden. Nach Banks et al. (2014a) ist der Zufallsgenerator von Excel aber nicht wissenschaftlich genug und aus diesem Grund sollte nach Meinung von Banks et al. ein anderer Zufallsgenerator verwendet werden. Da in dieser Arbeit aber nur ein Vergleich von einem Simulationsprogramm mit Excel stattfindet, sind die Ergebnisse des Zufallsgenerators für diese Arbeit zweitrangig. Aus diesem Grund ist der von Excel bereitgestellte Zufallsgenerator für die Autoren dieser Arbeit ausreichend.

Wie im vorherigen Abschnitt angesprochen, werden pro Experiment 5 Replikationen durchgeführt. Das heißt, dass für die 5 Replikationen eines Experiments die Parameter der Lagerhaltungspolitik die gleichen Werte haben. Nur der Anfangslagerbestand verändert sich, da für seine Zufallsgenerierung bei jeder Replikation ein neuer Startwert festgelegt wird. Für alle Simulationsdurchgänge können die Werte der Parameter und die Größe des Anfangslagerbestands in dem Tabellenblatt „Parameter“ in den Spalten I bis M vorgefunden werden. Außerdem werden sie im Tabellenblatt „Ergebnistabelle“ in den Spalten D bis H aufgeführt.

Im Tabellenblatt „Daten“ werden die Daten hinterlegt, welche für die Simulation genutzt werden. In dieser Arbeit wird der Warenabgang pro Tag aus einem Lager genutzt (vgl. Abschnitt 4.5). Die Datumsangaben werden in der Spalte A eingetragen, ihre jeweiligen Warenabgänge in Spalte B. Im Tabellenblatt „Durchlauf“ findet die eigentliche Simulation statt. Dieses wird für jeden Simulationsdurchgang mit den dazugehörigen Werten neu berechnet. Die Vorgehensweise wurde von Banks et al. (vgl. Abschnitt 3.4) übernommen. Um dem Leser einen Überblick über die Funktionen dieses Tabellenblatts zu ermöglichen, wird in den folgenden Absätzen zuerst der Aufbau des Tabellenblatts erklärt. Anschließend wird das allgemeine Vorgehen zum Umgang mit diesem Blatt sowie beispielhaft der Aufbau einer verwendeten Formel und Teile des verwendeten VBA Codes erläutert.

Der Aufbau des Tabellenblatts „Durchlauf“ basiert auf dem Tabellenblatt „One Trial“ in der von Banks et al. (2014b) bereitgestellten Excel Datei (vgl. Abschnitt 3.4). Der Bereich B9 bis K9 wurde ins Deutsche übersetzt, entspricht aber ansonsten dem Bereich B14 bis K14 aus „One Trial“. Ein Unterschied zu Banks et al. sind die Datumsangaben, die in dem verwendeten Datensatz vorliegen (vgl. Abschnitt 4.5, die in Spalte A dargestellt werden. Ein weiterer Unterschied ist die Erzeugung der fortlaufenden Nummer des Tages, die Banks et al. fest in die Tabelle eingefügt haben. In dieser Simulation werden die Nummern mit Hilfe eines VBA Codes erzeugt. Der Bedarf ist in dieser Simulation durch den Warenabgang pro Tag vorgegeben und auch die Vorlaufzeit ist nicht variabel, sondern für alle Simulationsdurchgänge gleich. Aus diesem Grund werden die bekannten Eingabemöglichkeiten von Banks et al. für den täglichen Bedarf sowie die Vorlaufzeit entfernt. Dadurch entfällt auch die Verwendung der Funktion zur Berechnung der diskreten empirischen Verteilung. Die Werte für die Parameter der Lagerhaltungspolitiken, der Vorlaufzeit sowie der Anfangslagerbestand sind unter „Simulationswerte“ im Bereich B1 bis D7 (schwarz umrandet) zu finden.

Um den Durchlauf für die Simulation zu konfigurieren, klickt der Nutzer auf die Schaltfläche „Setup Durchlauf“. Die Daten aus „Daten“ werden in die Spalten A und F (rot umrandet) kopiert. Basierend auf der Entscheidung des Nutzers bezüglich der Lagerhaltungspolitik im Tabellenblatt „Parameter“, wird der Bereich B12 bis K195 des Tabellenblatts „Durchlauf“ mit den passenden Formeln konfiguriert. Die Formeln für jede Lagerhaltungspolitik sind im VBA Code hinterlegt. Je nach gewählter Lagerhaltungspolitik werden die zugehörigen Parameter im Bereich B1 bis D7 hellgrün unterlegt. Außerdem werden die Werte für die Parameter, die Vorlaufzeit und den Anfangslagerbestand aus dem Tabellenblatt „Parameter“ (Bereich I2 bis M2) in „Simulationswerte“ eingefügt. Damit entspricht dieser Zustand dem ersten Simulationsdurchlauf. Im Bereich A200 bis D204 (blau umrandet) werden die Kennzahlen berechnet. Diese Kennzahlen wurden in Abschnitt 2.1 ausführlich erläutert. Möchte der Nutzer später einzelne Datensätze überprüfen und nochmals manuell simulieren, so muss er oder sie auf „Setup Durchlauf“ klicken, um die benötigten Excel Formeln einzufügen und kann dann im Bereich B1 bis D7 die passenden Werte eingeben. Ein Klick auf „Durchlauf neu berechnen“ sorgt für die Neuberechnung des Durchlaufs.

Durch die Implementierung der vier Lagerhaltungspolitiken ergeben sich diverse Abweichungen zur Vorlage von Banks et al.. Diese Abweichungen werden in den folgenden Abschnitten aufgezeigt. Die Berechnung in den Spalten D („Tag innerhalb des Intervalls“) bis H („Fehlbestand“) wurde von Banks et al. übernommen.

Bei einer (r,q) Lagerhaltungspolitik wird am Ende eines vorgegebenen Intervalls eine gewählte konstante Bestellmenge ausgelöst (vgl. Abschnitt 2.3). Um diese Lagerhaltungspolitik implementieren zu können, muss lediglich die Berechnung der Bestellmenge aus der Excel Datei von Banks et al. durch die konstante Bestellmenge ersetzt werden (Zelle D7).

Trotz gleicher Bezeichnung ist es nicht möglich die (r,S) Lagerhaltungspolitik von Banks et al. vollständig für die (r,S) Lagerhaltungspolitik in dieser Arbeit zu übernehmen. Der Unterschied besteht hier ebenfalls in der Berechnung der Bestellmenge. Bei Banks et al. wird die Liefermenge aus dem vorgegebenen Bestandsniveau plus möglicher Fehlbestände abzüglich des Lagerbestands am Tagesende berechnet (siehe Abschnitt 3.4). Dabei gilt jedoch die Einschränkung, dass das Intervall r größer als die Vorlaufzeit sein muss. Durch diese Einschränkung wird eine zweite Bestellung innerhalb der Vorlaufzeit einer ersten Bestellung verhindert, da die erste Bestellung das Lager erreicht hat, bevor der letzte Tag innerhalb des Intervalls beendet ist. Da in der Realität eine Bestellauslösung am gleichen Tag eines Wareneingangs durchaus möglich ist, halten die Autoren diese Beschränkung für unrealistisch. Aus diesem Grund wird die Beschränkung eingeführt, dass das Intervall r größer gleich der Vorlaufzeit sein darf. Damit zwei aufeinander folgende Bestellungen nicht zu einer Überschreitung des Bestandsniveau führen, wird die eintreffende Bestellmenge von der Bestellmenge der zweiten Bestellung abgezogen. Damit ergibt sich für die Berechnung der Bestellmenge in dieser Simulation die Formel:

$$\text{vorgegebenes Bestandsniveau} + \text{möglicher Fehlbestände} - \text{Lagerbestand am Tagesende} - \text{eintreffende Bestellmenge} \quad (5)$$

Für die Implementierung der (s,q) Lagerhaltungspolitik gilt für den Parameter q die gleiche Ergänzung wie für die Implementierung von q in der (r,q) Lagerhaltungspolitik. Bei der (s,S) Lagerhaltungspolitik gilt für das Bestandsniveau S auch die Ergänzung der (r,S) Lagerhaltungspolitik. Zusätzlich dazu muss beachtet werden, dass die Bestellauslösung bei beiden letztgenannten Lagerhaltungspolitiken nicht am Ende eines Intervalls erfolgt, sondern bei Unterschreitung eines Meldebestands stattfindet (vgl. Abschnitt 2.3). Dafür muss die Berechnung der Bestellmenge angepasst werden. Im nächsten Abschnitt wird die Formel erklärt, welche für die neue Bestellmenge genutzt wird. Die Einfärbung soll den Leser beim Verständnis der folgenden Formel unterstützen:

$$\text{WENN}(G14 < D6; \text{WENN}(G14 + I13 < D6; \text{WENN}(K13 > 1; I13; D7); \text{WENN}(K13 > 1; I13; 0)); \text{WENN}(K13 > 1; I13; 0)) \quad (6)$$

Der erste Teil der Formel ($G14 < D6$) stellt eine Unterschreitung des Meldebestands durch den Lagerbestand am Tagesende (Spalte G) fest. In diesem Fall prüft $G14 + I13 < D6$, ob der Lagerbestand am Tagesende addiert mit der Bestellmenge einer möglicherweise früher ausgelösten Bestellung ebenfalls den Meldebestand unterschreitet. Eine erneute Unterschreitung des Meldebestands löst $\text{WENN}(K13 > 1; I13; D7)$ aus. Dieser Teil der Formel überprüft, ob eine Bestellung ausgeführt ($K13 > 1$) wurde oder ausgeführt werden soll und kopiert dann die jeweilige Bestellmenge (I13 für die bestehende Lieferung, D7 für die neue Bestellung). Findet keine Unterschreitung des Meldebestands bei der ersten (roter Teil) oder zweiten (grüner Teil) Prüfung statt wird durch $\text{WENN}(K13 > 1; I13; 0)$ lediglich kontrolliert, ob eine Bestellung vorliegt. Liegt eine Bestellung

vor (K13>1), wird die Bestellmenge vom Vortag übertragen (I13) oder eine 0 eingetragen (keine Bestellung).

Für die vorliegende Arbeit sollen insgesamt 60 Simulationsdurchgänge durchgeführt werden, y ist somit 60 (vgl. Abschnitt 4.4). Jede Zeile der Spalten I bis M im Tabellenblatt „Parameter“ beinhaltet die Werte der Parameter und des Anfangslagerbestands für jeweils einen der 60 Simulationsdurchgänge. Um die 60 Simulationsdurchgänge mit Excel automatisch durchführen zu können, wird das Tabellenblatt „Ergebnistabelle benutzt“. Ein Mausklick auf „Experimente starten“ führt den VBA Code aus.

Mit Hilfe des folgenden VBA Codes

```
wsDu.Range("D7").Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 11).Value
wsDu.Range("D4").Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 10).Value
wsDu.Range("D3").Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 13).Value
```

(7)

werden, beginnend bei der zweiten Zeile, im Bereich I bis M die Werte der Parameter und des Anfangslagerbestands aus dem Tabellenblatt „Parameter“ in den Bereich „Simulationswerte“ innerhalb des Tabellenblatts „Durchlauf“ kopiert. Die Zeilen

```
wsDu.EnableCalculation = True
wsDu.EnableCalculation = False
```

(8)

sorgen für eine erneute Berechnung des Tabellenblatts „Durchlauf“. So wird ein Simulationsdurchgang durchgeführt. Um eine umfassende Übersicht über alle Simulationsdurchgänge zu ermöglichen, kopiert der folgende VBA Code

```
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 6).Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 10).Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 7).Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 11).Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 4).Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 9).Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 5).Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 12).Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 8).Value = wsP.Cells(current_line_du3 + 1, 13).Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 9).Value = wsDu.Range("D200").Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 10).Value = wsDu.Range("D201").Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 11).Value = wsDu.Range("D202").Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 12).Value = wsDu.Range("D203").Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 13).Value = wsDu.Range("D204").Value
wsEt.Cells(current_line_du3 + 3, 14).Value = wsDu.Range("D205").Value
```

(9)

jeweils die aktuellen Werte der Experimentnummer, der Replikation, der Parameter sowie des Anfangslagerbestands aus dem Tabellenblatt „Parameter“ und die aktuellen Werte der Kennzahlen aus dem Tabellenblatt „Durchlauf“ in die zugehörigen Spalten im Tabellenblatt „Ergebnistabelle“. Außerdem wird die Anzahl der Tage mit Fehlbeständen übertragen. Damit der nächste Simulationsdurchgang durchgeführt wird, erhöht die Codezeile `„current_line_du3 = current_line_du3 + 1“` die Laufvariable `„current_line_du3“` um 1. Um die Schleife aus Abbildung 5 zu erhalten, wird im VBA Code der Befehl `„Do, Loop Until“` verwendet. Damit die Simulation nach allen Simulationsdurchgängen (`„anzahl_exp_rep“`) aufhört, wird als Abbruchbedingung `„current_line_du3 = anzahl_exp_rep + 1“` festgelegt. Die Variable `„anzahl_exp_rep“` steht für die Gesamtanzahl aller Simulationsdurchgänge, in diesem Fall 60 (vgl. Abschnitt 4.4), und wird in Abbildung 5 mit i bezeichnet. Dieses Vorgehen ist für alle Lagerhaltungspolitiken gleich, nur die verwendeten Formeln und Werte der Parameter ändern sich.

5.1.2 Experimentdurchführung

Mit dem implementierten Modell aus Abschnitt 5.1.1 werden die verschiedenen Lagerhaltungspolitiken simuliert. Die Durchführung der Simulation richtet sich nach dem Experimentplan, der in Abschnitt 4.3 erarbeitet wurde. Zudem ist es wichtig zu beachten, dass alle verwendeten Werte in der Datei `„Simulationsdaten“` aufgeführt sind und vor dem Start der Simulation generiert wurden. Die Zufallsgenerierung der Werte ist von der aktuellen Systemzeit des verwendeten PCs abhängig und würde dadurch bei jeder Simulation neue Werte erzeugen (Stichwort `„Randomize“` in Abschnitt 5.1.1). Damit die Simulationen aus Excel mit denen aus Plant Simulation verglichen werden können, wird auf die Daten in `„Simulationsdaten“` zurückgegriffen. Im Folgenden wird das Vorgehen für die Simulation einer (r,q) Lagerhaltungspolitik erläutert. Dieses Vorgehen lässt sich aber auch genauso für alle anderen Lagerhaltungspolitiken anwenden. Zusätzlich kann das hier beschriebene Vorgehen analog auch für eigenständige Simulationen des Anwenders herangezogen werden. Folgen keine weitergehenden Erklärungen, so sind die verwendeten Werte für diese Simulation in Klammern geschrieben.

Zuerst sind die Lagerhaltungspolitik und die Anzahl der veränderten Parameter in den Drop-Down-Menüs auszuwählen. In dieser Simulation ist das die (r,q) Lagerhaltungspolitik sowie `„beide Parameter“`. Anschließend wird die Anzahl der Experimente (12), die Anzahl der Replikationen (5), die Vorlaufzeit (2 Tage), der Zinssatz (1,5%) für die Kennzahlenberechnung und die minimalen sowie maximalen Werte der Parameter (r,q) eingegeben. Danach werden möglicherweise bestehende Konfigurationen mit einem Mausklick auf `„Parametertabelle leeren“` gelöscht und durch `„Bestandsparameter generieren“` neu erzeugt. Werden eigenständige Simulationen vom Anwender durchgeführt, so kann der folgende Schritt übersprungen werden. Für die Simulationen

in dieser Arbeit, werden die Werte für die Parameter der (r,q) Lagerhaltungspolitik allerdings aus der Datei „Simulationsdaten“ in den Bereich I2 bis M61 im Tabellenblatt „Parameter“ kopiert.

Anschließend wird in das Tabellenblatt „Durchlauf“ gewechselt. Ein Mausklick auf „Setup Durchlauf“ fügt die Formeln, die für die Simulation der (r,q) Lagerhaltungspolitik benötigt werden, und die Werte für den ersten Simulationsdurchlauf ein. Hier besteht für den Anwender nochmals die Möglichkeit zu überprüfen, ob die Werte aus dem Bereich I2 bis M2 im Tabellenblatt „Parameter“ in den Bereich B1 bis D7 in „Durchlauf“ fehlerfrei eingefügt wurden. Ein Wechsel ins Tabellenblatt „Ergebnistabelle“ und ein Mausklick auf „Experimente starten“ führt alle Simulationsdurchgänge aus. Für den Anwender sind in diesem Tabellenblatt außerdem alle verwendeten Daten, die Anzahl der Tage mit Fehlbeständen sowie die Ergebnisse in Form der Kennzahlen den Simulationsdurchgängen übersichtlich zugeordnet.

5.1.3 Auswertung

Die Simulationen der vier Lagerhaltungspolitiken, werden in diesem Abschnitt ausgewertet. Die Kennzahlen aus Abschnitt 2.1 werden zur Unterstützung der Auswertung eingesetzt und umfassen den durchschnittlichen Lagerbestand, die Umschlagshäufigkeit, die Verweildauer, den Lagerzinsatz sowie die Lagerzinsen. Die benutzten Kennzahlen werden im Folgenden für den Leser nochmals kurz zusammengefasst. Für eine ausführliche Erklärung wird auf den Abschnitt 2.1 sowie die Tabelle 11 im Anhang verwiesen.

Um mögliche Kapitalbindungskosten so gering wie möglich zu halten, muss der durchschnittliche Lagerbestand ausreichend hoch sein um alle Lagerabgänge abdecken zu können, und zugleich aber nicht so hoch, dass hohe Kapitalbindungskosten entstehen. Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, ist dies eine der typischen Problemstellungen innerhalb des Inventory Managements.

Die Umschlagshäufigkeit zeigt dem Anwender, wie oft der durchschnittliche Lagerbestand das Lager verlässt. Diese Kennzahl sollte möglichst hoch sein, um Kapitalbindungskosten zu vermeiden. Aus der Umschlagshäufigkeit wird die Verweildauer berechnet (vgl. Tabelle 11 im Anhang). Die Verweildauer ist niedrig, wenn sich Bestände nur kurz im Lager befinden und sollte deswegen möglichst gering sein. Da die Lagerzinsen proportional mit hohen Beständen steigen, sind diese eine weitere Möglichkeit um hohe Kapitalbindungskosten ausfindig zu machen.

Um die vorliegenden Kennzahlen zu berechnen, werden am Ende jedes Simulationsdurchgangs der Lagerbestand am Tagesende des ersten und des letzten Tages sowie die Summe aller Lagerabgänge aufgenommen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Um die einzelnen Experimente einfacher miteinander vergleichen zu können wird das arithmetische Mittel über die Kennzahlen der jeweils 5 Replikationen eines Experiments gebildet. So ergeben sich für jedes Experiment Durchschnittswerte

für die Kennzahlen. Die Parameter der Lagerhaltungspolitiken müssen hingegen nicht gemittelt werden, da diese innerhalb eines Experiments den identischen Wert besitzen (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Ein Vergleich der Formeln für die Berechnung der Kennzahlen zeigt eine Abhängigkeit der genutzten Kennzahlen von der Kennzahl des durchschnittlichen Lagerbestands. Aus diesem Grund reicht es aus, für einen Vergleich der Experimente nur die Kennzahl des durchschnittlichen Lagerbestands abzubilden. Dies erhöht für den Leser in den folgenden Diagrammen die Übersicht. So ergeben sich für jedes Diagramm drei Graphen. Der erste Graph bildet die gemittelte Kennzahl ab (blauer Graph). Mit dem zweiten Graphen wird der erste Bezeichner der Lagerhaltungspolitik abgebildet (orangener Graph). Dies können das Intervall oder der Meldebestand sein. Die konstante Bestellmenge oder das Bestandsniveau werden durch den dritten Graphen abgebildet (grauer Graph).

Der durchschnittliche Lagerbestand kann bei der (r,q) Lagerhaltungspolitik im fünfstelligen Bereich liegen. Da die konstante Bestellmenge im niedrigen vierstelligen Bereich liegt, kann die Darstellung dieses Parameters und der Kennzahl im selben Diagramm unübersichtlich sein. Aus diesem Grund werden der durchschnittliche Lagerbestand, die konstante Bestellmenge (q), der Meldebestand (s) und das Bestandsniveau (S) auf den Bereich von 0 bis 1 skaliert. Für das Intervall (r) gilt, dass 2 Tage im skalierten Bereich der 0 entspricht und 3 Tage der 1.

Als erstes wird die (r,q) Lagerhaltungspolitik ausgewertet. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, schwankt der durchschnittliche Lagerbestand sehr stark.

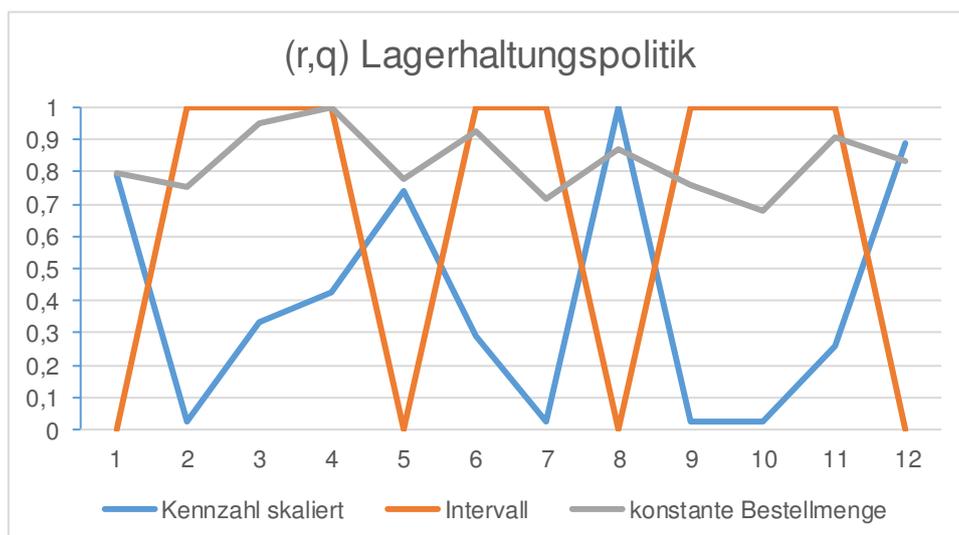


Abbildung 7: Auswertung (r,q) Lagerhaltungspolitik

Die Schwankungen im durchschnittlichen Lagerbestand sind auf die variierenden konstanten Bestellmengen und Intervalle der einzelnen Experimente zurückzuführen. Wie Eingangs dieses Abschnitts erläutert, sollte der durchschnittliche Lagerbestand möglichst niedrig sein. Dieser ist in

den Experimenten 2, 7, 9 und 10 besonders niedrig. Hierbei gilt es aber zu beachten, dass am Ende dieser Experimente das Lager leer ist und in mindestens 176 von 184 Tagen Fehlbestände vorkommen. Aus diesem Grund sind diese Experimente nicht positiv zu bewerten.

Werden die Bestellungen in einem Intervall von 2 Tagen ausgeführt, so ergeben sich hohe durchschnittliche Lagerbestände. Dies lässt sich dadurch begründen, dass bei der (r,q) Lagerhaltungspolitik Bestellungen ohne Berücksichtigung der Lagerabgänge ausgeführt werden. Dieser Effekt wird durch eine hohe konstante Bestellmenge verstärkt. Wird das Intervall wie in den weiteren Experimenten auf 3 Tage erhöht, sinken die durchschnittlichen Lagerbestände (vgl. Abbildung 7). Das Sinken der durchschnittlichen Lagerbestände geht mit einem Anstieg von Tagen, an denen Fehlbestände auftreten, einher.

Ist es das Ziel, jeden Kundenbedarf möglichst sofort decken zu können, so sollten die Tage mit Fehlbeständen gering sein. Dabei steigt aber der durchschnittliche Lagerbestand. Diesem Ziel kommt Experiment 8 am nächsten. Soll ein möglichst geringer durchschnittlicher Lagerbestand erreicht werden, ist Experiment 11 der beste Vertreter.

Als zweites folgt die Auswertung der (r,S) Lagerhaltungspolitik. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, liegen die Graphen des durchschnittlichen Lagerbestands und des Bestandsniveaus sehr nah beieinander. Auch lässt sich aus dem Verlauf der Graphen kein Zusammenhang zwischen der Kennzahl des durchschnittlichen Lagerbestands und des Intervalls der Bestellauslösung herstellen.

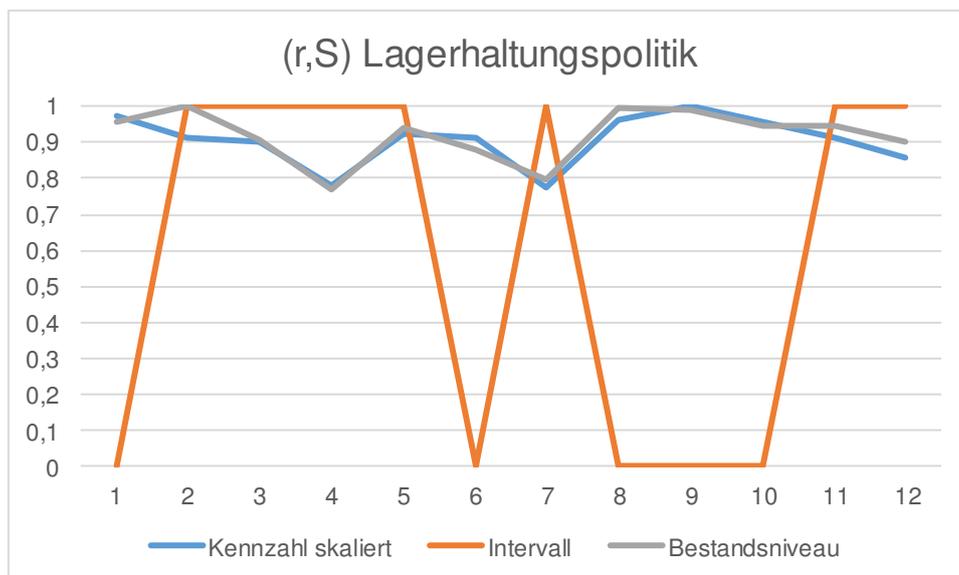


Abbildung 8: Auswertung (r,S) Lagerhaltungspolitik

Bei dieser Lagerhaltungspolitik ist der durchschnittliche Lagerbestand von der Höhe des Bestandsniveaus und der Warenabgänge abhängig, denn die Liefermenge entspricht höchstens dem Bestandsniveau. So werden große Lagerbestände wie bei der (r,q) Lagerhaltungspolitik und ein

Einfluss des Intervalls der Bestellausführungen auf den durchschnittlichen Lagerbestand vermieden. In den durchgeführten Experimenten liegen die Tage mit Fehlbeständen zwischen 34 und 89. Es ist also mit keiner der simulierten Parameterkombinationen möglich, den Bedarf der Kunden zu erfüllen.

Das Experiment mit dem niedrigsten durchschnittlichen Lagerbestand (853) ist Experiment 7 und wird deswegen für den Vergleich der Lagerhaltungspolitiken ausgewählt. Das Experiment mit dem höchsten durchschnittlichen Lagerbestand ist Nummer 9 und deswegen das am wenigsten geeignete der Experimente.

Die dritte Auswertung ist die der (s,q) Lagerhaltungspolitik. Aus Abbildung 9 geht hervor, dass ein Zusammenhang zwischen dem Meldebestand und dem durchschnittlichen Lagerbestand besteht. Grund dafür ist der Meldebestand, denn dieser wird als der Wert definiert, bei dessen Unterschreitung eine Bestellung ausgelöst wird. Dadurch führt ein hoher Meldebestand zu einem hohen durchschnittlichen Lagerbestand. Zusätzlich dazu hat die konstante Bestellmenge Einfluss auf den durchschnittlichen Lagerbestand. Ist die konstante Bestellmenge höher als der Meldebestand, so wird der Einfluss des Meldebestands auf den durchschnittlichen Lagerbestand verringert. Eine hohe konstante Bestellmenge führt zu einem höheren durchschnittlichen Lagerbestand.

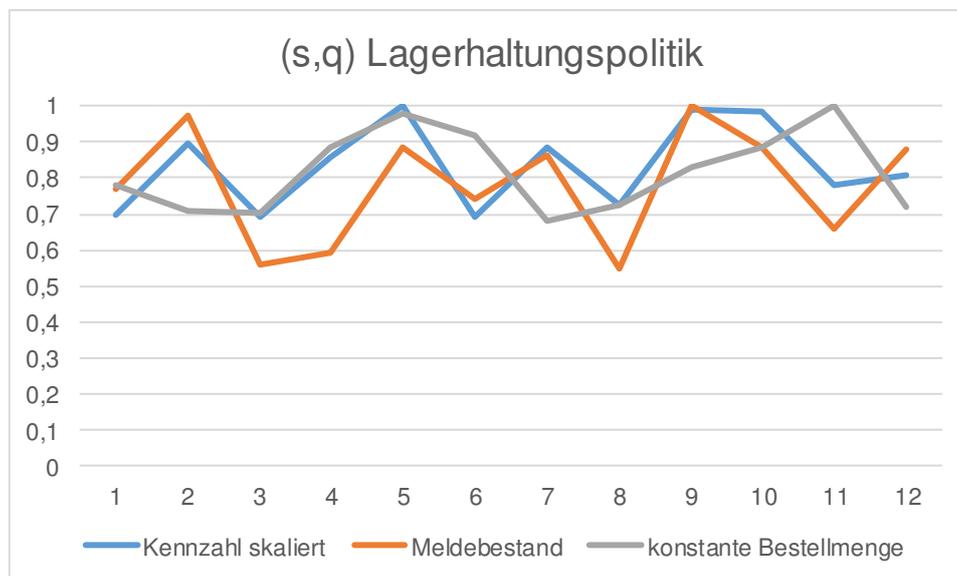


Abbildung 9: Auswertung (s,q) Lagerhaltungspolitik

Der niedrigste Wert des durchschnittlichen Lagerbestands (903) wird mit Experiment 3 erreicht. Die Tage mit Fehlbeständen liegen hier aber bei 118. Experiment 6 hingegen hat einen durchschnittlichen Lagerbestand von 908 und einen Wert für die Tage mit Fehlbeständen von 32. Deswegen ist Experiment 6 für den Vergleich der Lagerhaltungspolitiken geeignet. Experiment 5 hat mit 20,4 Tagen den niedrigsten Wert für die Tage mit Fehlbeständen, allerdings beträgt der durchschnittliche Lagerbestand 1308.

Zuletzt wird die (s,S) Lagerhaltungspolitik ausgewertet. Der Verlauf der Graphen in Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit des durchschnittlichen Lagerbestandes vom Bestandsniveau. Dies war insofern nicht anders zu erwarten, als dass das Bestandsniveau die maximale Menge des Lagerbestandes darstellt.

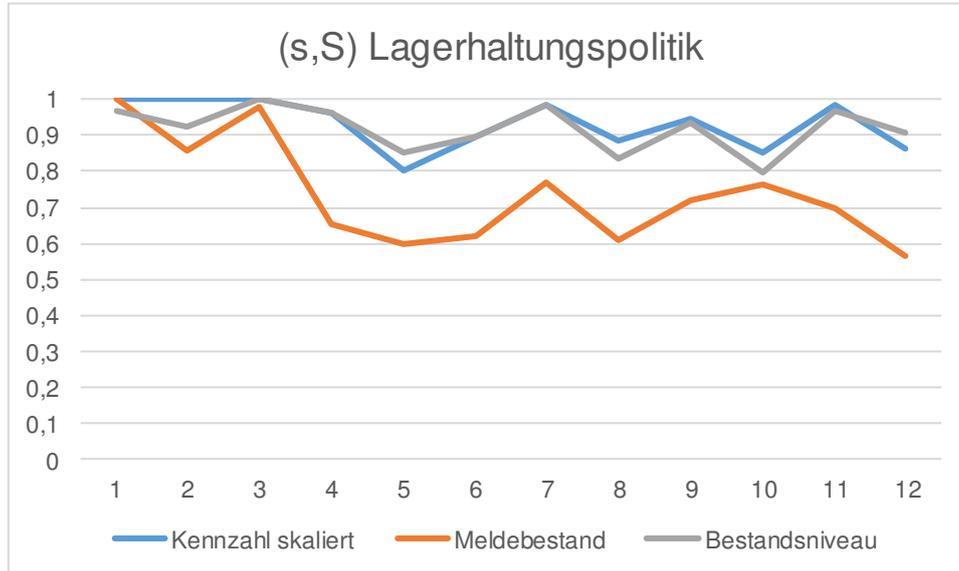


Abbildung 10: Auswertung (s,S) Lagerhaltungspolitik

Der geringste Wert für den durchschnittlichen Lagerbestand kommt mit 853 in Experiment 5 vor. Die Tage mit Fehlbeständen sind bei diesem Experiment mit 73 von 184 aber sehr hoch. Der Wert für die Tage mit Fehlbeständen beträgt bei Experiment 3 48, jedoch ist dabei der durchschnittliche Lagerbestand mit 1062 entsprechend hoch. Aus diesem Grund wird für den Vergleich der Lagerhaltungspolitiken das fünfte Experiment ausgewählt.

In Tabelle 8 sind die ausgesuchten Experimente der Lagerhaltungspolitiken mit ihrer Bezeichnung, dem dazugehörigen Lagerbestand sowie den Tagen mit Fehlbeständen aufgeführt.

Lagerhaltungspolitik [Parameter]	Experiment [Nr.]	Durchschnittliche Lagerbestand [Stück]	Tage mit Fehlbestand [Tage]
(r,q)	11	6161	75
(r,S)	7	853	82
(s,q)	6	908	32
(s,S)	5	853	73

Tabelle 8: Vergleich der ausgesuchten Experimente

Ist das Ziel den, durchschnittlichen Lagerbestand möglichst gering zu halten, so sind aus den vier ausgesuchten Experimenten die (r,S) oder die (s,S) Lagerhaltungspolitik diejenigen Lagerhaltungspolitiken, die am geeignetsten sind, dieses Ziel zu erreichen. Sollen zusätzlich die Tage mit Fehlbestand gering sein, so sind die (r,S) und die (s,S) Lagerhaltungspolitik mit 82 und respektive 73 Tagen mit Fehlbestand für die Erfüllung dieses Ziels ungeeignet. Mit der (s,q) Lagerhaltungspolitik kann dieses Ziel erreicht werden. Auch der Wert des durchschnittlichen Lagerbestands ist mit 908 Stück mit den Werten der anderen beiden vergleichbar (beide 853 Stück).

In Tabelle 9: Vergleich Lagerhaltungspolitiken sind die minimalen und maximalen Werte des durchschnittlichen Lagerbestands und der Tage mit Fehlbestand aus allen Simulationsdurchgängen für die vier Lagerhaltungspolitiken eingetragen. Die (r,q) Lagerhaltungspolitik besitzt sowohl beim durchschnittlichen Lagerbestand als auch bei den Tagen mit Fehlbestand die größte Streuung der Werte. Dadurch ergeben sich hohe Kapitalbindungskosten und unzufriedene Kunden. Der durchschnittliche Lagerbestand verringert sich durch die Verwendung einer (s,q) Lagerhaltungspolitik signifikant, die Streuung der Tage mit Fehlbestand wird aber nur geringfügig reduziert. Um hier eine weitere Verbesserung zu erzielen, kann eine (r,S) Lagerhaltungspolitik verwendet werden, denn hierbei halbieren sich die Tage mit Fehlbestand und auch der durchschnittliche Lagerbestand sinkt nochmals. Die (s,S) Lagerhaltungspolitik unterscheidet sich zur (r,S) Lagerhaltungspolitik durch eine geringere Streuung in den Tagen mit Fehlbestand.

Lagerhaltungspolitik [Parameter]	Min, Max	Durchschnittliche Lagerbestand [Stück]	Tage mit Fehlbestand [Tage]
(r,q)	Min	504	2
	Max	24105	182
(r,S)	Min	787	34
	Max	1206	89
(s,q)	Min	759	17
	Max	1550	165
(s,S)	Min	775	48
	Max	1158	79

Tabelle 9: Vergleich Lagerhaltungspolitiken

Insgesamt werden die Erwartungen aus Abschnitt 2.3 bestätigt. Die (r,q) Lagerhaltungspolitik führt zu sehr hohen Beständen und dadurch zu hohen Kapitalbindungskosten, da Bestellungen in Intervallen ausgeführt werden und die Nachfrage nicht berücksichtigt wird. Die erwarteten höheren Gesamtkosten der (r,S) Lagerhaltungspolitik lassen sich mit den getätigten Experimenten aber

nicht bestätigen. Hinsichtlich der Kosten liegen die (r,S), die (s,q) und die (s,S) Lagerhaltungspolitik nahe beieinander. Da die Ergebnisse mit den Erwartungen der Literatur (vgl. Abschnitt 2.3) vergleichbar sind, ist davon auszugehen, dass die Simulation in Excel realistische Werte erzeugt und damit für Simulation im Inventory Management verwendet werden kann.

5.2 Versuchsdurchführung in Plant Simulation

Die aus den Problemstellungen des Inventory Managements ausgewählte Aufgabe „Lagerhaltungsprozess“ wird in Plant Simulation für jede der vier Lagerhaltungspolitiken in einem eigenen Projekt implementiert. Für die einzelnen Experimente und Replikationen innerhalb einer Lagerhaltungspolitik kann dagegen immer das gleiche Modell verwendet werden.

5.2.1 Implementierung des formalen Modells

Grundsätzlich bestehen alle vier Modelle aus den Bausteinen Quelle, Senke, zwei Puffern und einem bzw. zwei Förderbändern. Die einzulagernden Güter werden im Modell durch die Bewegten Elemente (BEs) dargestellt. Diese treten durch die Quelle in das Modell ein und verlassen auf Bestellung das Modell durch die Senke. In der Zwischenzeit werden die BEs im Baustein „Lager“ eingelagert. Dieser Baustein ist vom Typ Puffer und nicht vom Typ Lager, da er so eine bessere Steuerbarkeit gewährleistet. Der Baustein „Lager“ repräsentiert das eigentliche Lager und hat eine Kapazität von 2000 Lagerplätzen.

Bei den verschiedenen Lagerhaltungspolitiken werden immer wieder mehr Bewegte Elemente bestellt, als eingelagert werden können. Es ist davon auszugehen, dass in der Realität Mengen, die nicht mehr eingelagert werden können, an passender Stelle zwischengelagert werden. Dafür wurde ein zweiter Baustein vom Typ Puffer mit dem Namen „Wareneingang“ eingefügt. Sobald im „Lager“ Plätze frei werden rücken die BEs vom „Wareneingang“ nach.

Die Abgänge der BEs aus dem System liegen in Listenform vor. In der realen Ausgangsliste sind für jeden Tag des betrachteten Zeitraumes die Abgänge eingetragen. Gibt es an einem Tag keinen Abgang, so ist dort der Wert null eingetragen. Für die Abrufliste in Plant Simulation wurden die Werte aufsummiert, so dass mit kumulierten Abrufwerten gearbeitet wird. Für das Abbruchkriterium wird nach dem Simulationszeitraum ein negativer Abrufwert eingetragen. Die Eingänge werden in einer Lieferliste abgespeichert. Diese ist nach den Kriterien der Quellensteuerung formatiert und enthält die Spalten „Lieferzeit“, „BE“ und „Anzahl“. Die Lieferliste wird in Abhängigkeit der Lagerhaltungspolitik gefüllt. Die Steuerung der BEs erfolgt über mehrere Methoden. Diese unterscheiden sich jedoch stark zwischen den einzelnen Modellen. Die Methoden werden durch BEs ausgelöst, die Sensoren auf den Förderstrecken passieren.

(r,q)-Politik

Bei der (r,q)-Politik gibt es nur eine Steuerungsmethode, in der zunächst der Wert der Variablen „Anzahl“ geprüft wird. Die Variable „Anzahl“ gibt die kumulierten Bestellungen an. Solange „Anzahl“ größer oder gleich null ist wird die Methode ausgeführt. Zu Beginn der Simulation ist der Wert gleich null. Danach wird immer der Wert aus der i-ten Zeile der Abrufliste verwendet. Jede Zeile steht für einen 24-Stunden-Zeitraum. Nach Ablauf von 24 Stunden im Simulationsmodell wird die Variable „i“ um eins erhöht. Im Folgenden wird jedes „i“ als Zeitfenster bezeichnet. Nach Prüfung des Anzahlwertes des vorherigen Durchlaufs wird die Variable „Anzahl“ mit dem aktuellen Wert überschrieben. Danach wird als nächstes der Output definiert. Der Outputwert zählt die Anzahl der BEs, die die Senke und damit das System verlassen. Ist der Outputwert kleiner als der Anzahlwert wurden noch nicht alle Abrufe erfüllt und BEs werden in die Senke umgelagert. Sobald alle Abrufe erfüllt wurden, ist der Outputwert gleich dem Anzahlwert. Die Förderstrecke, die die BEs vom „Puffer“ zur Senke bringen, wird gestoppt und eine Variable mit dem Namen „Bestellzeit“ wird berechnet. Diese zählt immer 24 Stunden weiter und wird mit der Zeit des Simulationslaufes verglichen. Die Simulation stoppt dadurch für 24 Stunden und die Variable „i“ wird um einen erhöht. Diese Variable zählt die vergangenen 24-Stunden-Zeiträume und gibt darüber die zum Zeitraum gehörige Zeile der Abrufliste mit dem neuen Anzahlwert aus.

Bei der (r,q)-Politik ist die Lieferliste vorgegeben, da während einer Replikation in immer gleichen Abständen die gleiche Liefermenge abgerufen wird. Die Lieferdaten und Mengen wird in der Lieferliste vor dem Start des Simulationslaufes eingetragen. Als Abbruchbedingung für die Methode wird geprüft, ob der Anzahlwert aus der Abrufliste kleiner null ist. Sobald der Anzahlwert negativ wird, stoppt das Förderband zur Senke und die Simulation wird nach der letzten Lieferung, die zeitlich parallel zum letzten Abruf erfolgt, beendet.

Die Steuerungsmethode der (r,q)-Politik dient als Grundlage für die weiteren Lagerhaltungspolitiken.

(r,S)-Politik

Bei der (r,S)-Politik kommen häufiger Fehlmengen vor. Da im Ereignisverwalter mit der Steuerung der (r,q)-Politik keine weiteren Ereignisse eingetragen werden, würde im Fall der Fehlmengen die Simulation abbrechen. Daher sind zwei weitere Methoden, die die BEs direkt nach der Quelle (Inputwert) und nach dem „Lager“ (Zwischenzahlwert) zählen, notwendig (vgl. Formel 10). Mit beiden Werten wird die Auslagerung der BEs gesteuert.

$$\text{Input} := \text{Input} + 1 \quad (10)$$

Die Steuerungsmethode läuft grundsätzlich nach der gleichen Logik wie bei der oben vorgestellten Politik ab (vgl. Formel 11). Der Definitionspart wird allerdings um die Variable „S“ erweitert,

die das gewünschte Bestandsniveau angibt. Innerhalb einer Replikation bleibt S konstant, verändert sich aber in den einzelnen Experimenten.

```
Anzahl := AnzahlBestellung[1,i];
Output := Senke.StatVernichtet;
S := 1764;
```

(11)

Solange der Outputwert kleiner als der Anzahlwert ist, wird zunächst ein Abgleich des Zwischenzählers und dem Inputwert durchgeführt. Der Sensor für die Zwischenzählung befindet sich auf der Förderstrecke zur Senke. Wenn am Zwischenzähler das letzte sich im Simulationsmodell befindliche BE angekommen ist, ist der Zwischenzahlwert gleich dem Inputwert. Die Förderstrecke wird gestoppt und es wird eine Bestellung zur Auffüllung des Lagers ausgelöst. Da es sich um das letzte BE handelt, dass den Sensor auslöst und der Sensor hinter dem Lager liegt, bedeutet dies, dass das Lager komplett geleert ist. Daher ist die Bestellmenge gleich dem gewünschten Bestandsniveau (vgl. Formel 12).

```
if Output < Anzahl then
  if Zwischenzahl = Input then
    Förderstrecke.Geschwindigkeit:=0;
    Lieferungen[3,i+1]:=S;
```

(12)

Die Bestellmenge wird mit dem Befehl `Lieferungen[S,Z]:=...` in die Lieferliste eingetragen. Dabei bezeichnet „Lieferungen“ den Namen der Lieferliste. Die Werte in den Klammern beziehen sich auf die Spalte und Zeile. Da Bestellungen erst im nächsten Zeitfenster geliefert werden, werden sowohl die Bestellzeit als auch die Bestellmenge in der Zeile $i+1$, also in der Zeile des nächsten Zeitfensters, eingetragen.

Die Bestellzeit berechnet sich hier über die Variable „Hilfszeit“ (vgl. Formel 13). Da im Versuch der Lieferprozess des Zulieferers nicht betrachtet wird, wird die Bestellzeit gleich der Lieferdauer gesetzt. Im unten gezeigten Beispielcode beträgt die Lieferdauer drei Tage. Daher ist die Hilfszeit immer aktuelles Zeitfenster * 3 Tage, die in Sekunden angegeben sind. Der Befehl „`num_to_time`“ wandelt den Datentyp Integer in einen Zeitcode um.

Sobald die nächste Lieferung eingetroffen ist, wird der Wert von Input erhöht und die Förderstrecke wird wieder gestartet. Die Auslieferungen können fortgesetzt werden (Fortsetzung der Formel 12):

```
Lieferungen[3,i+1]:=S;
Hilfszeit:=i*259200;
num_to_time(Hilfszeit);
Lieferungen[1,i+1]:=Hilfszeit;
waituntil Input > Zwischenzahl;
Förderstrecke.Geschwindigkeit:=1;
end;
if Zwischenzahl < Input then
```

(13)

```
@.umlagern(Senke);
end;
```

Sind genügend BEs im System vorhanden ist der Wert von Zwischenzahl kleiner als der Inputwert und die BEs werden zur Senke umgelagert.

Sobald alle Bestellungen abgearbeitet sind, ist der Outputwert gleich dem Anzahlwert (vgl. Formel 14). Die Förderstrecke zur Senke wird gestoppt, so dass keine weiteren BEs mehr das System verlassen können. Es wird die Menge der sich im System befindlichen BEs bestimmt und daraus die Nachbestellmenge berechnet. Analog zur obigen Nachbestelllogik wird die Bestellzeit über die Hilfszeit berechnet und die Menge und Zeit werden in die Lieferliste eingetragen. Geprüft wird hier allerdings noch, dass nur Liefermengen größer oder gleich 0 eingetragen werden können.

```
if Output >= Anzahl then
  Förderstrecke.Geschwindigkeit :=0;
  PufferAnzahl:=Puffer.AnzahlBEs;
  Nachbestellmenge:= S - PufferAnzahl;
  Hilfszeit:=i*259200;
  num_to_time(Hilfszeit);
  Lieferungen[1,i+1]:=Hilfszeit;
  if Nachbestellmenge < 0 then
    Lieferungen[3,i+1]:=0;
  else
    Lieferungen[3,i+1]:=Nachbestellmenge;
  end;
end;
```

(14)

Als nächstes wird die darauffolgende Bestellzeit berechnet. In diesem Beispiel beträgt der Bestellabstand drei Tage. Das bedeutet, dass alle drei Tage nachgeliefert werden soll. Sobald die Simulationszeit die nachfolgende Bestellzeit erreicht hat wird die Förderstrecke wieder gestartet und der Zähler der Zeitfenster, „i“, wird um 1 erhöht. Dadurch, dass die Förderstrecke wieder fährt, kann das nächste BE den Sensor auf der Strecke erreichen und damit die Steuerungsmethode neu auslösen.

```
Bestellzeit := i*259200;
num_to_time(Bestellzeit);
if ereignisverwalter.zeit >= Bestellzeit then
  Förderstrecke.Geschwindigkeit :=1;
  i := i+1;
end;
if ereignisverwalter.zeit < Bestellzeit then
  waituntil ereignisverwalter.zeit >=Bestellzeit
  Förderstrecke.Geschwindigkeit :=1;
end;
```

(15)

Sobald die Simulationszeit länger als der betrachtete Zeitraum von 183 Tagen ist, wird die Simulation beendet.

(s,q)-Politik

Bei der Implementierung der (s,q)-Politik wird das Modell der (r,S)-Politik als Grundlage verwendet. An der Steuerungsmethode werden jedoch einige Änderungen vorgenommen. Zum einen wird die Prüfung rausgenommen, ob es sich um das letzte BE handelt (vgl. Formel 12). Zum anderen wird die Methode um die Berechnung eines Bestandslevels erweitert:

$$\begin{aligned} &\text{if Output} \geq \text{Anzahl then} \\ &\quad \text{Förderstrecke.Geschwindigkeit} := 0; \\ &\quad \text{Bestandslevel} := \text{Input} - \text{Output}; \end{aligned} \quad (16)$$

Wenn das Bestandsniveau unter den vorgegebenen Wert des Meldebestandes fällt, wird in die Lieferliste der vorgegebene Bestellmenge q eingetragen. Die weitere Steuerung unterscheidet sich nur in der Abbruchbedingung. Die Simulation endet nicht nach 183 Tagen, sondern sobald alle Bestellungen erfüllt wurden.

(s,S)-Politik

Schließlich wird die (s,S)-Politik implementiert. Bei ihr wird das Modell der (s,q)-Politik weiterentwickelt. Die Steuerungsmethode unterscheidet sich lediglich bei der Ermittlung der Bestellmenge. In dieser Politik wird nicht der konstante Wert q verwendet, sondern analog zur (r,S)-Politik die Menge ausgerechnet (vgl. Formel 14).

5.2.2 Experimentdurchführung

Mit den zuvor implementierten Modellen wird der Experimentplan aus Abschnitt 4.3 abgearbeitet. Je Lagerhaltungspolitik werden zwölf Experimente á fünf Replikationen durchgeführt. Die Berechnung der Parameterwerte kann Abschnitt 5.1 entnommen werden. Zunächst werden die Experimente der (r,q)-Politik durchgeführt. Dabei werden vier Experimente mit einem Bestellintervall (r) von zwei Tagen und acht Experimente mit einem Bestellintervall von drei Tagen durchgeführt. Bei jedem Experiment wird zudem die feste Bestellmenge (q) zwischen 1005 und 1485 variiert. Für jedes der zwölf Experimente wird eine eigene Lieferliste mit Hilfe von Excel erstellt. Diese ist nach den Anforderungen von Plant Simulation formatiert und enthält in der ersten Spalte die Lieferzeitpunkte, in der zweiten das zu liefernde Gut und in der dritten Spalte die Menge der zu liefernden Güter. Zudem beinhaltet die erste Zeile der Lieferliste die Lieferung zum Zeitpunkt 0, also direkt zu Beginn der Simulation. In dieser Zeile wird jedoch nicht der Wert für q eingetragen, sondern der Anfangsbestand des Lagers, der sich in jeder Replikation unterscheidet. Vor dem Start jeder Replikation müssen einige Punkte beachtet werden. Da zum Simulationsende die Förderstrecke gestoppt wird, muss zu Beginn der nächsten Simulation die Förderstrecke wieder gestartet werden. Des Weiteren wird manuell der Endbestand des Lagers erfasst und in einer separaten Excel-Tabelle zur Auswertung gespeichert.

Als nächste Lagerhaltungspolitik wird die (r,S) -Politik getestet. Auch hier werden zwölf Experimente á fünf Replikationen durchgeführt. Die Lieferliste wird ähnlich wie bei der (r,q) -Politik erstellt. In die erste Spalte werden wieder die Bestellzeiten eingetragen, die in den Experimenten ebenfalls zwischen zwei und drei Tagen variieren. In der zweiten Spalte steht der Bezeichner des zu liefernden Gutes, die dritte Spalte bleibt jedoch leer, da die nachbestellte Menge innerhalb des Simulationslaufes mehrmals berechnet wird. Die zweite Variation der Experimentreihe betrifft das gewünschte Bestandsniveau S , das immer wieder erreicht werden soll. S schwankt in den 60 Durchläufen zwischen 1507 und 1957 Einheiten. Innerhalb eines Experimentes ist sowohl die Nachbestellzeit als auch das gewünschte Bestandsniveau konstant.

Der Lageranfangsbestand variiert jedoch in jeder Replikation. Am Ende eines Durchlaufes muss wiederum die Geschwindigkeit der Förderstrecken gleich eins gesetzt werden und der Endbestand aufgeschrieben werden. Als dritte Lagerhaltungspolitik wird die (s,q) -Politik getestet. In den zwölf Experimenten wird immer eine unterschiedliche Nachbestellmenge zwischen 1008 und 1479 Einheiten verwendet. Auch der Meldebestand s wird zwölf Mal variiert. Der minimale Meldebestand liegt bei 841 Einheiten und der maximale bei 1533 Einheiten. Als Besonderheit ist zu nennen, dass bei diesen Simulationsläufen die Förderstrecken mit einer Initialisierungsmethode automatisch wieder gestartet und der Endbestand direkt sichtbar angezeigt wird. In den Experimenten zur (r,q) - und (r,S) -Politik muss der Endbestand per Hand berechnet werden. Dazu wird von jedem Baustein das Statistik-Fenster geöffnet und die Anzahl der sich im Baustein befindlichen BEs addiert. Auch bei der (s,q) -Politik wird eine Lieferliste vorbereitet. Bei dieser bleibt jedoch die erste Spalte leer, da die Werte für die Nachbestellzeit in Abhängigkeit des Meldebestandes bzw. des Zeitpunktes, wann der Meldebestand erreicht wird, errechnet wird. Die zweite Spalte ist wieder mit dem Bezeichner der zu liefernden Güter gefüllt und in der dritten Spalte stehen die Werte für q die zwölf Mal variieren.

Die letzte Experimentreihe beschäftigt sich mit der (s,S) -Lagerhaltungspolitik. Bei dieser werden für jedes Experiment im Quellcode die Werte für S und s angepasst. Der Meldebestand (s) variiert dabei zwischen 838 und 1483 Einheiten. Das gewünschte Bestandsniveau variiert zwischen 1516 und 1908 Einheiten. Wie bereits in der vorherigen Experimentreihe startet die Förderstrecke mit der Initialisierungsmethode, und auch hier kann der Endbestand direkt durch die Variable abgelesen werden. Wie bei allen Durchläufen variiert auch hier der Anfangslagerbestand. Die Lieferliste ist in den Spalten eins und drei leer, da dort durch die Steuerungsmethode die Werte während des Simulationslaufs eingetragen werden.

5.2.3 Auswertung

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen Experimente ausgewertet. Dazu sollen die Kennzahlen durchschnittlicher Lagerbestand, Verweildauer und Lagerzinsen betrachtet werden. Jedes Experiment beinhaltet fünf Replikationen. In jeder Replikation wird der Anfangslagerbestand, der Endlagerbestand und die Summe der Abrufe erfasst. Alle durchgeführten Experimente und Replikationen laufen über den gleichen Zeitraum ab. Dieser wird im Folgenden als Experimentdauer bezeichnet und beträgt in dieser Arbeit 183 Tage. Mit den Werten des Anfangs- und Endlagerbestandes wird nach der Formel 17 der durchschnittliche Lagerbestand (LB) berechnet:

$$LB = \frac{\text{Anfangsbestand} + \text{Endbestand}}{2} \quad (17)$$

Mit dem durchschnittlichen Lagerbestand und der Gesamtzahl der Abrufe (Gesamtverbrauch) kann nach Formel 18 die Umschlagshäufigkeit bestimmt werden, die sich implizit auf die Experimentdauer bezieht.

$$\text{Umschlagshäufigkeit} = \frac{\text{Gesamtverbrauch}}{LB} \quad (18)$$

Schließlich wird mit der Umschlagshäufigkeit die Verweildauer (VD) berechnet (Formel 19).

$$\text{Verweildauer (VD)} = \frac{\text{Experimentdauer}}{\text{Umschlagshäufigkeit}} \quad (19)$$

Für die Lagerzinsen muss zunächst der Lagerzinssatz berechnet werden. In der Formel dazu wird als Eingangsgröße ein marktüblicher Zinssatz verwendet (Zinssatz p. a.).

$$\text{Lagerzinssatz} = \frac{\text{Zinssatz p. a.} * VD}{360} \quad (20)$$

$$\text{Lagerzinsen} = \frac{LB * \text{Lagerzinssatz}}{100} \quad (21)$$

Die Kennzahlen werden für jede Replikation bestimmt und dokumentiert. Zur besseren Vergleichbarkeit der Experimente einer Lagerhaltungspolitik untereinander, wird das arithmetische Mittel der Kennzahlen der einzelnen Replikationen eines Experiments bestimmt. Dadurch werden immer fünf Replikationen zu einem Durchschnittswert zusammengefasst.

Die Kennzahlen sind voneinander abhängig, unterscheiden sich jedoch stark in ihren absoluten Werten. Die Abhängigkeit ergibt sich daraus, dass in allen Experimenten der gleiche Gesamtverbrauch zu Grunde liegt. Die betrachtete Experimentlänge ist ebenfalls immer konstant und beträgt 183 Tage. Daher sind lediglich der Anfangs- und Endlagerbestand variabel. Alle Änderungen der

Kennzahlen lassen sich auf diese beiden Werte zurückführen (vgl. Tabelle 11). Der durchschnittliche Lagerbestand liegt meist im vierstelligen Bereich, die Verweildauer ist jedoch nur zweistellig. Für die Auswertung bedeutet dies, dass die Graphen bei Nutzung der absoluten Werte sehr unleserlich werden und schlecht auszuwerten sind. Deshalb werden die Werte der Kennzahlen, sowie der variierten Parameter der Lagerhaltungspolitik auf den Wertebereich zwischen null und eins skaliert. Dazu wird aus den zwölf Werten eines Experimentes für jede Kennzahl, bzw. jeden Parameter, das Maximum bestimmt. Alle zwölf Werte einer Kennzahl, bzw. eines Parameters, werden dann durch den maximalen Wert innerhalb des Experimentes geteilt. Da die Kennzahlen voneinander abhängen, sind die Verhältnisse der Kennzahlen gleich. Daraus resultiert für alle drei Kennzahlen die gleiche skalierte Kurve. Jeder Graph besteht deshalb aus drei Kurven, eine für die Kennzahlen, eine für die Bestellmenge und eine für den Bestellzeitpunkt bzw. das Bestellintervall.

Als erste der vier Lagerhaltungspolitiken wird die (r,q) -Politik betrachtet. Dabei werden zunächst einige interessante Ergebnisse aus der Analyse der Simulations-Daten betrachtet. Bei der (r,q) -Politik gibt es zwischen den einzelnen Experimenten starke Unterschiede für die Endbestandsmenge. Die Experimente zwei, sieben, neun und zehn enden mit einem leeren Lager, nicht alle Abrufe können in diesen Experimenten bedient werden. Bei dieser Lagerhaltungspolitik kommt es zu großen Fehlmengen, die bis zu 10% der jeweiligen Abrufe betragen. Dadurch, dass das Lager regelmäßig vollständig geleert wird, ist die Verweildauer bei den Experimenten mit Fehlmengen relativ gering und liegt nur bei wenigen Tagen. Bei den übrigen Experimenten der (r,q) -Politik ergibt sich aber ein deutlich anderes Bild. Hier liegt die Verweildauer teilweise bei bis zu zwei Monaten, weicht also erheblich ab von den anderen Szenarien. Die Schwankungen der Verweildauer, des durchschnittlichen Lagerbestandes sowie der Lagerzinsen auf der Grundlage der skalierten Werte kann der Abbildung 11 entnommen werden. Hier lässt sich gut erkennen, dass die Schwankungen der blauen Kurve fast über die gesamte Bandbreite des Wertebereiches von null bis eins gehen.

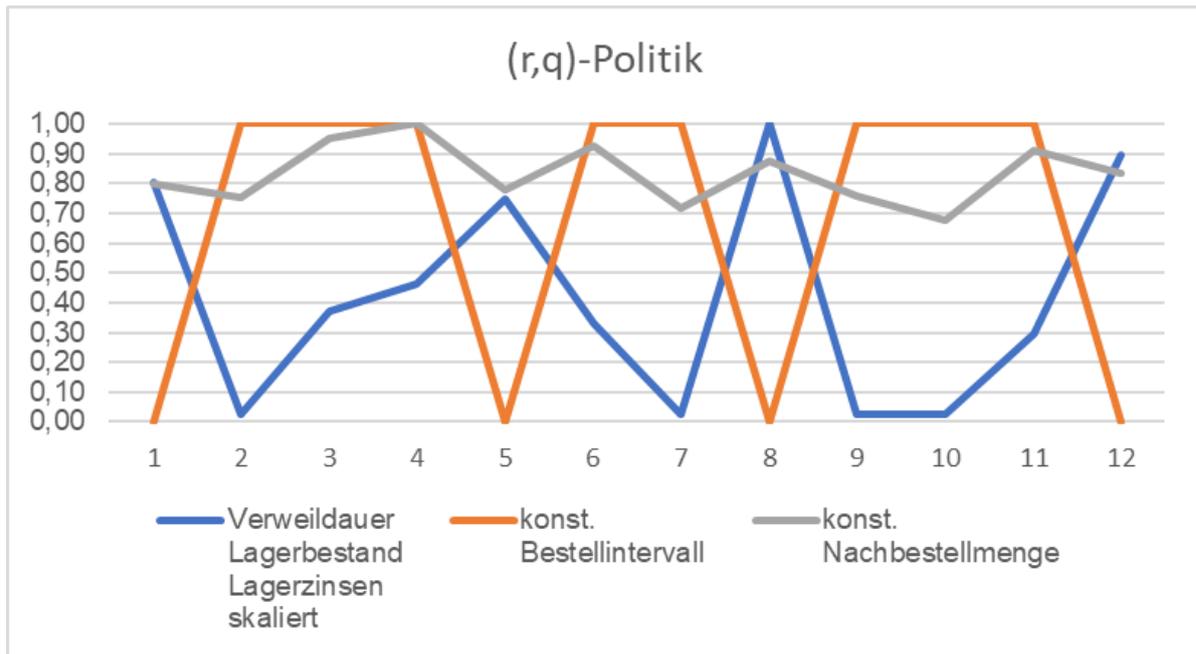


Abbildung 11: Kennzahlen (r,q)-Politik

Im Folgenden sollen zunächst die Kurven der Abbildung 11 näher erläutert werden. Wie bereits festgestellt, sind die Schwankungen der skalierten Kennzahlen zwischen den einzelnen Experimenten sehr groß und decken nahezu den ganzen 100%-Bereich ab. Sowohl der geringe durchschnittliche Lagerbestand, als auch die geringen Verweildauern liegen vor allem bei den Experimenten vor, wo das Bestellintervall drei Tage beträgt. Das Bestellintervall ist in den einzelnen Experimenten konstant und wird durch die orangene Linie dargestellt. Als konkrete Werte wurden in den Experimenten 2 und 3 Tage definiert, die durch die Skalierung auf die Werte null (2 Tage) und eins (3 Tage) abgebildet werden. Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass die in den einzelnen Experimenten konstanten Nachbestellmengen zwischen den Experimenten um bis zu 30% variieren. Wie bereits in Abschnitt 2.1 dargestellt, ist ein wesentliches Ziel einer Lagerhaltungspolitik, eine möglichst kleine Verweildauer, einen geringen Durchschnittsbestand und geringe Lagerzinsen zu erreichen. Gemäß der Abbildung liegt dies besonders dann vor, wenn das konstante Bestellintervall drei Tage beträgt. Diese Fälle sollen nun näher betrachtet werden. Abgesehen von den Werten nahe Null werden kleine Werte für die Kennzahlen nahe der 30%-Linie insbesondere in den Experimenten drei, sechs und elf erreicht. Wie bereits oben beschrieben, liegt bei den Experimenten mit sehr kleinen Kennzahlen (2, 7, 9, 10) eine sehr hohe Fehlmenge vor, weswegen diese Experimente nicht positiv zu bewerten sind.

Bei Experimenten mit einem Bestellintervall von zwei Tagen werden sehr hohe Kennzahlenwerte erreicht. Dies erklärt sich dadurch, dass ohne Rücksicht auf reale Nachlieferbedarfe hohe Mengen an Gütern in einer hohen Frequenz nachgeordert und geliefert werden. Die graue Linie repräsentiert die Nachbestellmenge. Ist diese hoch, so steigen tendenziell auch die Kennzahlen. In Experiment acht liegt ein kleines Nachbestellintervall und eine große Nachbestellmenge vor. Beides

in Kombination führt zu den größten Kennzahlen der Lagerhaltungspolitik. Für einen Vergleich der einzelnen Lagerhaltungspolitiken wird von jeder Politik das beste und schlechteste Experiment ausgewählt. Für die (r,q) -Politik ist das schlechteste Experiment Nummer acht, da dort die höchsten Kennzahlen vorliegen. Das beste Experiment ist Nummer elf, da dort die kleinsten Kennzahlen ohne Fehlmengen vorkommen.

Als nächstes wird die (r,S) -Politik ausgewertet. Werden die Kennzahlen in der Excel-Tabelle analysiert, so fällt zunächst auf, dass innerhalb eines Experimentes die Endbestandswerte des Lagers immer die gleichen sind. Dies erklärt sich dadurch, dass immer die Differenzmenge zum gewünschten Bestandsniveau nachbestellt wird. Da die Abgänge in allen Experimenten gleich sind, ist und bleibt der Bestand nach der ersten Bestellung zwischen den Replikationen eines Experimentes identisch. Analog zu Abbildung 11 werden in Abbildung 12 die skalierten Experimentwerte der (r,S) -Politik dargestellt. Zunächst fällt dabei auf, dass die Kennzahlen bei dem größeren Bestellintervall größer sind, als beim kleineren Bestellintervall – allerdings mit einer Ausnahme. Die blaue Linie gibt die Kennzahlen aller zwölf Experimente an. Es ist gut zu erkennen, dass das erste Experiment eine starke Abweichung gegenüber den anderen Experimenten aufweist.

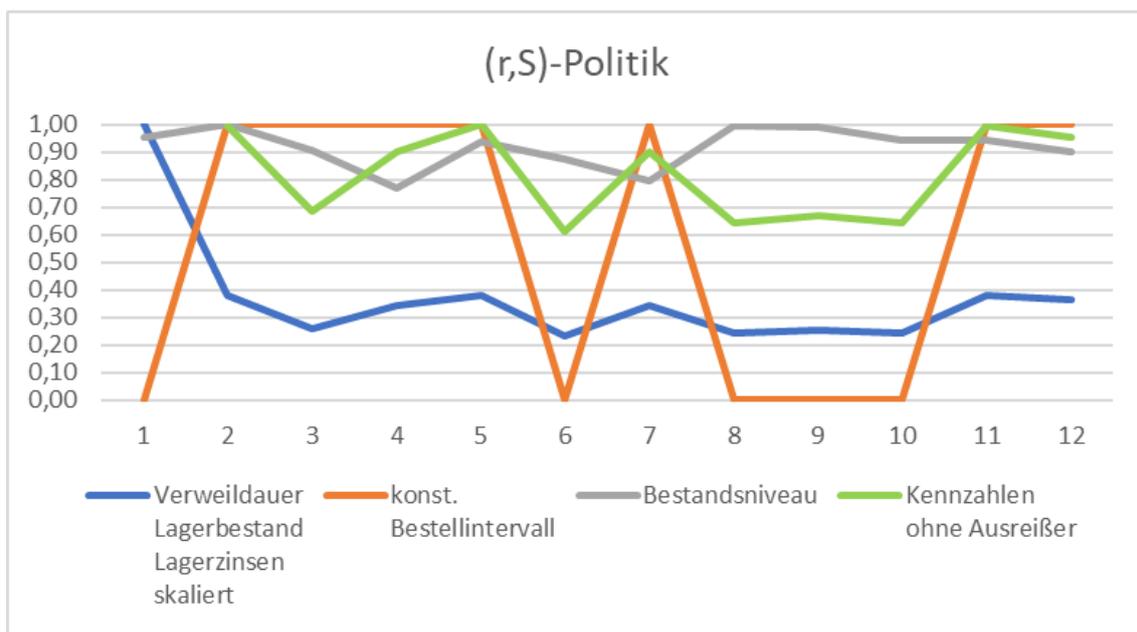


Abbildung 12: Kennzahlen (r,S) -Politik

Um die Auswertungsergebnisse nicht zu verfälschen, wurde die grüne Linie in die Abbildung 8 aufgenommen. Sie stellt den Verlauf der Kennzahlen dar, wenn das erste Experiment aus der Auswertung genommen und bei der Skalierung nicht berücksichtigt wird. Der Zusammenhang von kleinen Bestellintervallen mit geringen Bestandsniveaus lässt sich im Verlauf der grünen Linie noch besser erkennen. Für den Vergleich der Lagerhaltungspolitiken wird das Experiment sechs als bestes und das Experiment fünf als schlechtestes ausgewählt.

Die dritte Lagerhaltungspolitik, die betrachtet wird, ist die (s,q) -Politik. Sobald der Meldebestand erreicht ist, wird eine konstante Menge an Gütern nachbestellt. Darstellung und Skalierung der Experimentdaten in Abbildung 13 entspricht dem Vorgehen zu den vorhergehenden Abbildungen. Die Kennzahlen sind daher wiederum in blau dargestellt. Es ist sofort zu erkennen, dass es auch hier wieder einen Ausreißer gibt - Experiment fünf (vgl. Abb. 13), das analog zur Vorgehensweise bei der (r,S) -Politik aus der Auswertung herausgenommen wird. Die neue Kennzahlenlinie ist in grün dargestellt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass gute Kennzahlen tendenziell dann vorliegen, wenn ein geringer Meldebestand und eine kleine konstante Bestellmenge benutzt wird. Als bestes Experiment wird Nummer acht für den Vergleich aller Politiken gewählt. Das schlechteste Experiment ist Experiment Nummer neun.

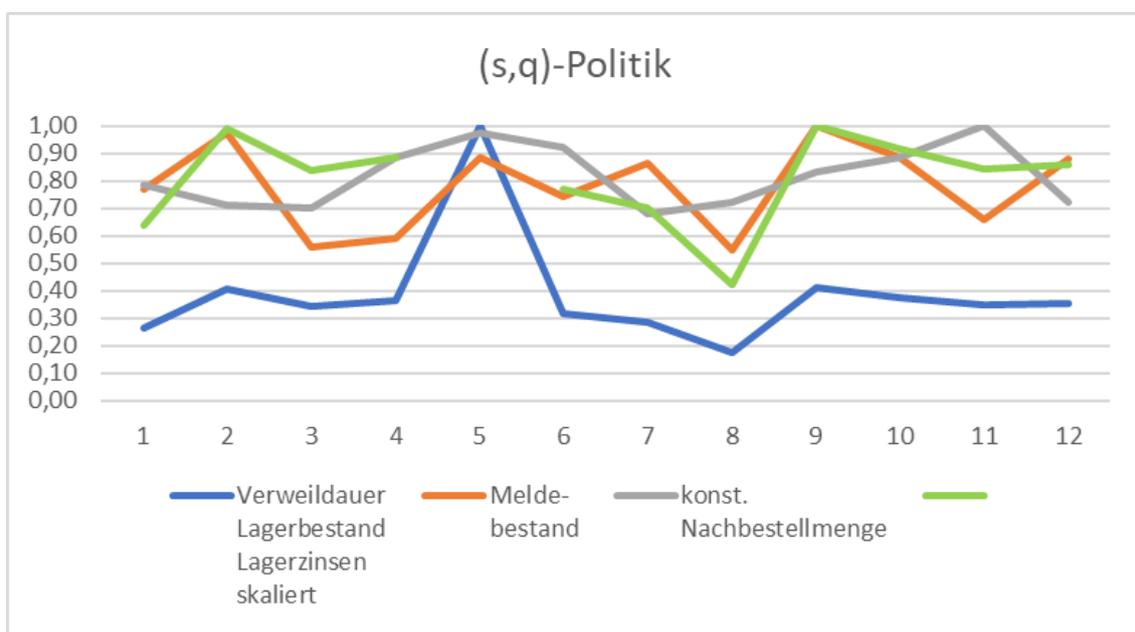


Abbildung 13: Kennzahlen (s,q) -Politik

Zuletzt wird die (s,S) -Lagerhaltungspolitik betrachtet. Sobald der Meldebestand erreicht ist, wird eine bedarfsorientierte Menge an Gütern nachbestellt. Bei der Auswertung der Ergebnisse fällt auf, dass die Endbestände innerhalb eines Experimentes gleich sind. Analog zur (r,S) -Politik liegt dies daran, dass auf ein festes definiertes Bestandsniveau bestellt wird und die Abgänge in den Replikationen jeweils gleich sind. Auch für die (s,S) -Lagerhaltungspolitik werden die Ergebnisse der Experimente wieder skaliert in einer Grafik dargestellt. In Abbildung 14 ist kein klares Muster der drei Kurven erkennbar. Bei Experiment zwei liegen geringe Kennzahlen vor, der Meldebestand und die Nachbestellmenge ist jedoch sehr hoch. Allerdings kann dadurch auch nicht auf ein antiproportionales Verhalten geschlossen werden. Im zehnten Experiment liegen relativ kleine Werte für den Meldebestand und die Nachbestellmenge vor und auch die Kennzahlen sind relativ klein. Zusammenfassend ergibt sich also kein unmittelbarer qualitativer Zusammenhang zwischen Meldebestand und Bestandsniveau einerseits und den Kennzahlen andererseits.

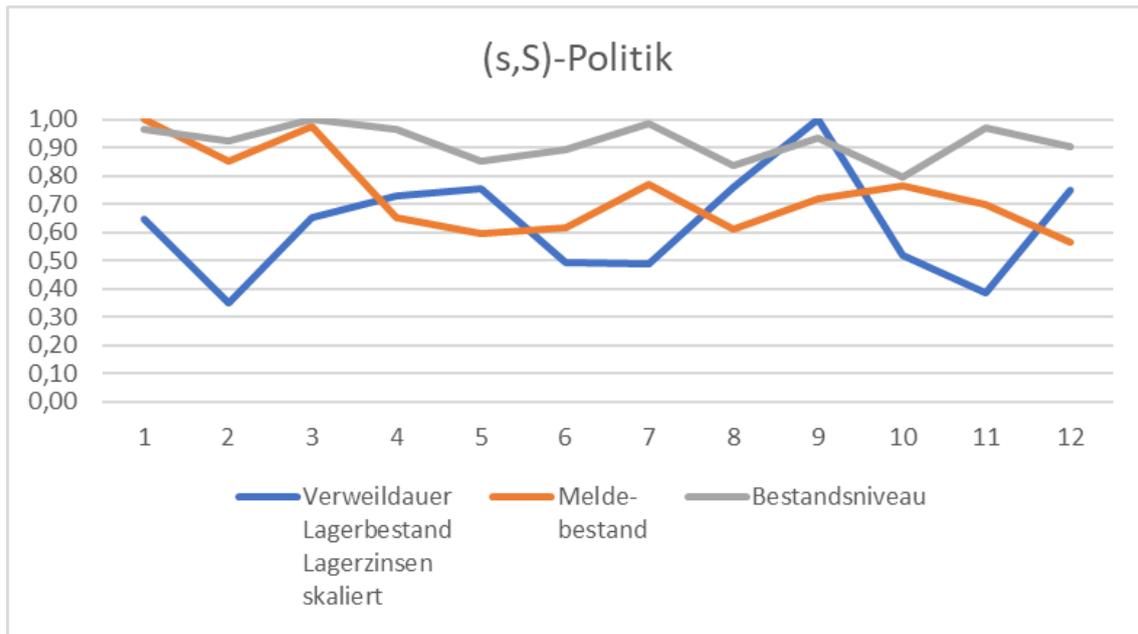


Abbildung 14: Kennzahlen (s,S)-Politik

Für den Politikenvergleich wird Experiment zwei als bestes und Experiment neun als schlechtestes gewählt.

In Tabelle 10 werden die vier Lagerhaltungspolitiken einander gegenübergestellt. Für jede der Politiken werden für das Experiment mit dem besten und schlechtesten Ergebnis der durchschnittliche Lagerbestand, die Verweildauer, die Lagerzinsen sowie das Verhältnis der jeweiligen Kennzahlen bezogen auf das Max-Niveau der (r,q)-Politik dargestellt. Die vier Lagerhaltungspolitiken unterscheiden sich erwartungsgemäß stark voneinander (vgl. Tabelle 10). Die (r,q)-Politik kann eindeutig als schlechteste Politik identifiziert werden. Die besten Werte der Politik (minimale Werte) sind immer noch knapp dreimal so groß, wie der schlechteste Max-Wert der anderen Lagerhaltungspolitiken. Des Weiteren beträgt der durchschnittliche Lagerbestand im schlechtesten Falle mehr als das Zwölffache der Lagerkapazität, welche für alle Versuche 2000 Einheiten betrug. Dies bedeutet, dass die Bestände in zusätzlichen Lagern zwischengepuffert werden müssen. Auch die Verweildauer und Lagerzinsen sind wesentlich höher. Die kleinsten Werte besitzt erwartungsgemäß die (s,S)-Politik. Sie betragen gerade einmal 3,7% des maximalen Wertes der (r,q)-Politik.

Lagerhaltungspolitik		Lagerbestand [Stück]	Verweildauer [Tage]	Lagerzinsen	Verhältnis
(r,q)-Politik	min	7510	19,3	112,7	29,7%
	max	25272	64,9	379,1	100%
(s,q)-Politik	min	984	2,5	14,8	3,9%
	max	2331	6	35	9,2%
(r,S)-Politik	min	1013	2,6	15,2	4,0%
	max	1651	4,2	24,8	6,5%
(s,S)-Politik	min	952	2,5	14,3	3,7%
	max	2745	7,1	41,2	10,8%

Tabelle 10: Vergleich der Lagerhaltungspolitiken

Allerdings streut die (s,S)-Politik sehr stark. Die maximalen Werte der Politik sind knapp dreimal so groß wie der minimale Wert und auch größer als die Max-Werte der (s,q)- und (r,S)-Politik. Die kleinste Streuung besitzt die (r,S)-Politik. Die minimalen Werte sind etwas schlechter (0,3%) als bei der (s,S)-Politik, jedoch beträgt die Schwankung gerade mal 2,5%-Punkte. Der durchschnittliche Lagerbestand über alle zwölf Experimente ist bei der (r,S)-Politik am kleinsten. Die (s,q)-Politik hat ähnliche minimale Werte wie die (r,S)-Politik, jedoch auch eine große Streuung der Werte. Insgesamt wird die (r,S)-Politik als beste Politik bewertet, da sie die kleinsten Durchschnittswerte über alle Experimente aufweist. Sie liegt aber nur knapp vor der (s,S)-Politik. Diese Politik hat leicht größere Durchschnittswerte über alle Versuche, allerdings liefert sie auch den absolut kleinsten Wert. Die (s,q)-Politik hat leicht schlechtere Werte als die beiden zuvor genannten Politiken, jedoch liefert sie noch wesentlich bessere Kennzahlen als die (r,q)-Politik, die als schlechteste Politik bewertet wird. Die erhaltenen Ergebnisse der Lagerhaltungspolitiken sind im Vergleich zu den allgemeinen Aussagen über die Politiken plausibel (vgl. Abschnitt 2.3). Dies lässt darauf schließen, dass die Versuchsdurchführung in Plant Simulation richtige Ergebnisse liefert.

5.3 Einsatzfähigkeitsbeurteilung der Tabellenkalkulation zur Simulation

In Abschnitt 4.6 wurde eine Bewertungsvorlage für die Beurteilung der Einsetzbarkeit der beiden Werkzeuge Plant Simulation und Excel erstellt (Abb. 6), in der im Folgenden die entsprechenden Bewertungen eingetragen werden. Insgesamt werden beide Werkzeuge in zwölf Kategorien untersucht und miteinander verglichen. In jedem Kriterium kann das Werkzeug als stark, mittel oder schwach eingeschätzt werden. Zunächst werden die Kosten miteinander verglichen.

Die Kosten differieren vor allem bei der Anschaffung. Das gesamte MS Office Paket, das neben Excel auch andere für den Geschäftsalltag wichtige Programme umfasst, kostet laut Herstellerangaben je Benutzerlizenz knapp 130€ pro Jahr (vgl. Tabelle 12). Die einmaligen Anschaffungskosten für Plant Simulation sind von dem gewünschten Funktionsumfang abhängig. In der Regel kann 0,5% der Investitionssumme angesetzt werden. Für das betrachtete Modell der Lagerhaltung gehen die Autoren von höheren Kosten als $130€ \cdot 0,5\% = 26.000€$ aus, sodass die Kosten von Plant Simulation höher sein werden. Daher wird Excel in dieser Kategorie als stark bewertet, Plant Simulation als schwach (vgl. Abb. 15).

Beide Werkzeuge bieten eine hohe Anzahl an Schulungs- und Unterstützungsmöglichkeiten. Sowohl für Excel als auch für Plant Simulation gibt es eine Vielzahl an Handbüchern und Hilfen. Zudem bieten verschiedene Firmen und Internetplattformen Möglichkeiten für den direkten Austausch von Nutzern der Programme. Des Weiteren existiert eine breite Auswahl an Lehrgängen, in denen der Umgang mit beiden Programmen gelernt werden kann. Beide Programme werden daher als stark in der Kategorie Schulungs- und Unterstützungsmöglichkeiten bewertet.

Microsoft Excel verlangt ein geringeres Vorwissen als Plant Simulation. Dies liegt daran, dass es im Berufsalltag als Standardprogramm angesehen wird (vgl. Abschnitt 3.4). Sollen jedoch umfangreichere Modelle mit Excel dargestellt werden, kann die Umsetzung eine VBA-Programmierung erforderlich machen (vgl. Abschnitt 5.1). Daraus resultiert ein hoher Aufwand zur Einarbeitung in VBA. Bei Plant Simulation muss der Mitarbeiter sich tiefer in das Programm einarbeiten und auch mit Programmierungsabläufen vertraut sein (vgl. Abschnitt 5.1). Da in Excel im Idealfall eine Modellerstellung ohne Vorwissen möglich ist, wird Excel in dieser Kategorie als mittel bewertet, Plant Simulation hingegen als schwach.

Die Hardwareanforderungen hängen sehr stark von den gewünschten Modellumfängen ab. Je komplexer das zu implementierende Modell ist, desto länger werden die Rechenzeiten. Prinzipiell verlangt Excel geringere Mindestanforderungen an einen Rechner als Plant. So konnte für die zuvor durchgeführten Versuche Plant Simulation im Gegensatz zu Excel nicht auf einem Tablet-PC installiert werden. Excel wird daher als stark gegenüber Plant Simulation in der Kategorie Hardwareanforderungen bewertet. Plant Simulation wird als mittel eingestuft, da es nach erfolgreicher Installation ohne Laufzeitprobleme die Simulationen ausführte.

In Plant Simulation können die Modelle in 2D und 3D dargestellt werden (vgl. Abschnitt 5.2). Dies fördert das Systemverständnis und liefert ein gutes Abbild des betrachteten Systems. Bei der Ergebnisausgabe werden verschiedene grafische Möglichkeiten angeboten. So wurde zum Beispiel der Endlagerbestand als Variable im Modell angezeigt. Die Ergebnisse der oben durchgeführten Experimente wurden allerdings in Excel ausgewertet und grafisch dargestellt. Für die grafische Ergebnisaufbereitung eignet sich Excel sehr gut. Jedoch fehlt hier die Möglichkeit, das

Modell mit Bausteinen zu visualisieren. Daher wird im Punkt Animationsmöglichkeiten Plant Simulation besser (stark) als Excel (mittel) bewertet.

Als nächstes Kriterium wird der Lieferumfang der beiden Werkzeuge beurteilt. Plant Simulation bietet eine Vielzahl an Bausteinen und Steuerungsmöglichkeiten. Beispielsweise wurden im oben durchgeführten Versuch Quellen-, Senken- und Puffer-Bausteine eingesetzt. Bei Excel beinhalten die mitgelieferten Bausteinbibliotheken Formeln, wie den SVerweis, mit dem in den verschiedenen Tabellen gearbeitet werden kann. Zusätzlich kann der Benutzer bei der Programmierung mit VBA aus Untermenüs weitere mögliche Befehle für seine Programmierung auswählen. Excel umfasst jedoch keine Bausteinbibliothek im Sinne von grafischen Darstellungen von Maschinen oder Förderbändern. Aus diesem Grund wird der Umfang und die Anwendbarkeit der mitgelieferten Bibliotheken bei Plant Simulation als größer und besser als bei Excel eingeschätzt, weswegen Plant Simulation in dieser Kategorie als stark und Excel als mittel bewertet wird.

Die Flexibilität und Anpassbarkeit beider Werkzeuge sind gut. In ihnen können Programme geschrieben werden, mit denen ein Tailoring des Werkzeuges auf das vorliegende Modell durchgeführt werden kann (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2). Durch die Benutzung von VBA kann der Funktionsumfang von Excel deutlich erweitert werden. Excel und Plant Simulation sind in den Punkten Flexibilität und Anpassbarkeit beide als stark zu bewerten.

Bei der Fehlererkennung unterstützt Plant Simulation durch Fehlermeldungen sowohl im Modell, als auch in den Methoden. Beispielsweise lassen sich geschriebene Methoden auf ihre Richtigkeit hin überprüfen. Auch können mit den animierten Modellen und Ergebnissen verschiedene Techniken der V&V, wie zum Beispiel die Validierung im Dialog, durchgeführt werden. Eine Validierung mit Hilfe der Animation ist in Excel nicht möglich. Jedoch unterstützt es den Benutzer ebenfalls durch Fehlermeldungen bei der Programmierung. Beide Werkzeuge fangen allerdings nicht alle Fehler ab, eventuelle Korrekturen müssen durch den Anwender durchgeführt werden. In dieser Kategorie werden daher beide Programme als mittel eingestuft.

Bei den Kriterien Einsparungen aufdecken, Durchlaufzeiten verkürzen und besseres Systemverständnis erlangen sind beide Werkzeuge als sehr gut zu bewerten. Die Programme können zur Ermittlung der besten Lagerhaltungspolitik in Bezug auf einen möglichst niedrigen Bestand und kurze Verweildauern eingesetzt werden. Im Besonderen die Verweildauer kann in den obigen Versuchen (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2) mit der Durchlaufzeit gleichgesetzt werden. Da beide Werkzeuge die Politik für die kürzeste Verweildauer ermitteln, besitzen sie das Potential, zur Reduzierung der Durchlaufzeiten beizutragen. Da beide Werkzeuge auch die Politiken mit den höchsten Beständen identifizieren, können Überbestände vermieden und dadurch Einsparungen realisiert werden. Es sind daher beide Programme als stark bei den potentiellen Einsparungen zu bewerten. Durch die Modellierung des formalen Modells wird bereits ein hohes Systemverständnis erreicht, welches dann bei der Implementierung in beiden Werkzeugen nochmals vertieft wird.

Bei dem Kriterium „Potential zu besserem Systemverständnis beizutragen“ gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen Excel und Plant Simulation. Beide Werkzeuge werden als stark bewertet.

Zuletzt wird die Genauigkeit der Absicherung der Planungsvorhaben bewertet. In Plant Simulation wurden viele Annahmen getroffen, die das reale System abstrahiert haben (vgl. Abschnitt 5.2). Generell soll in einer Simulation immer die Detailliertheit des Modells gegen den Nutzen aufgewogen werden, was dazu führt, dass viele Simulationsmodelle zur Reduktion der Modellierungskomplexität abstrahiert werden (vgl. Abschnitt 3.5). Dies geschieht meist zu Lasten der Genauigkeit der Ergebnisse. In den obigen Versuchen wurden in Excel nicht so starke Vereinfachungen des Modells durchgeführt wie in Plant Simulation. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse in Excel höher ist. Excel wird als stark bewertet, wo hingegen Plant Simulation als mittel eingestuft wird.

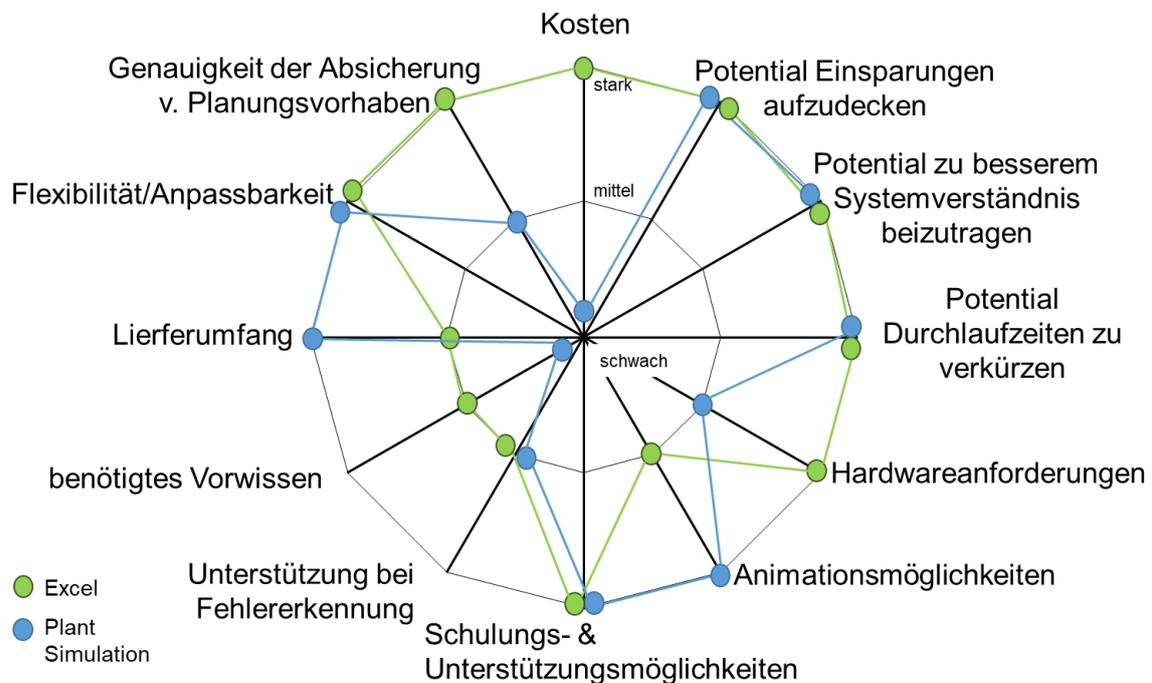


Abbildung 15: Bewertungsgrafik für Plant Simulation & Excel

Aus der in Abbildung 15 dargestellten Bewertungsgrafik lässt sich eine zusammenfassende Bewertung ableiten. Zuerst einmal macht die Grafik deutlich, dass beide Werkzeuge eine Reihe von Gemeinsamkeiten haben, in anderen Kategorien aber auch durchaus unterschiedlich bewertet werden. Excel wurde in zwölf Kriterien insgesamt acht Mal stark, vier Mal mittel und keinmal schwach eingestuft. Plant Simulation wurde hingegen nur sieben Mal stark, drei Mal mittel und sogar zwei Mal schwach eingestuft. Daraus kann übergreifend geschlossen werden, dass Excel sich für die simulative Untersuchung des Versuchs Lagerhaltung mindestens genauso eignet wie

Plant Simulation. Stärken von Plant Simulation gegenüber Excel liegen in den besseren Animationsmöglichkeiten und im größeren Lieferumfang. Umgekehrt liegen die Stärken von Excel gegenüber Plant Simulation in geringeren Kosten, in geringeren Hardwareanforderungen und in der besseren Genauigkeit zur Absicherung der Planungsvorhaben. In der abschließenden Beurteilung wird festgestellt, dass beide Werkzeuge zu ähnlichen Resultaten bei der Bewertung der Lagerhaltungspolitiken kommen (vgl. Abschnitt 5.1 und 5.2). Sie decken sich mit den Erwartungen über das Abschneiden der Lagerhaltungspolitiken aus Abschnitt 2.3. Allerdings können im Rahmen der Arbeit viele Fragestellungen nur beispielhaft beleuchtet werden. Trotzdem lassen die Ergebnisse aus Sicht der Autoren den Schluss zu, dass sich Tabellenkalkulationsprogramme im Allgemeinen und Excel im Speziellen dafür eignen, Problemstellungen im Inventory Management mit Hilfe der Simulation zu untersuchen und gegebenenfalls zu lösen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Einsatzfähigkeit eines Tabellenkalkulationsprogrammes im Rahmen der Simulation einer Problemstellung des Inventory Managements zu untersuchen. Aus diesem Grund wurden einleitend die Grundlagen des Inventory Managements behandelt. Dabei ist unter anderem die Bestandsreduzierung als grundlegende Zielstellung angesprochen worden. Auch typische Kennzahlen des Inventory Managements wurden eingeführt und erläutert. Zudem wurde der Zielkonflikt zwischen niedrigen Beständen und hoher Kundenzufriedenheit dargestellt. Als mögliche Lösungsstrategien wurden unter anderem die Lagerhaltungspolitiken eingeführt.

Um die Lösungsstrategien aussagekräftig untersuchen zu können, wurde in dieser Arbeit die Simulation eingesetzt. Dafür wurden die nötigen Grundlagen in Form von Grundbegriffen gelegt. Auch wurden die Werkzeuge eingeführt, mit denen die Simulation durchgeführt werden, Plant Simulation und Microsoft Excel. Diesbezüglich wurden die wichtigsten Grundsätze erklärt. Die Grundlage für die weitere Verfahrensweise bildet das Vorgehen für Simulationsstudien. Hierzu sind für den Vergleich des Tabellenkalkulationsprogramms mit dem Simulationswerkzeug, Beurteilungskriterien eingeführt worden.

Mit Hilfe des Vorgehens für Simulationsstudien wurde im Folgenden ein standardisierter Ablaufplan erstellt. So kann sichergestellt werden, dass die Durchführung der Simulation mit dem Tabellenkalkulationsprogramm auch mit der Durchführung mit dem Simulationsprogramm vergleichbar ist. Zudem werden die folgenden Abschnitte durch den Ablaufplan strukturiert. Als Hauptaspekt der Zieldefinition für die Versuche wurde die Bestandsreduzierung ausgewählt. Die entwickelten Experimente tragen außerdem zur Vergleichbarkeit bei, da sie für beide Simulationswerkzeuge identisch sind. In den Experimenten werden vier verschiedene Lagerhaltungspolitiken untersucht, wobei die Lagerhaltungspolitiken zufallsgenerierte Parameter enthalten.

Damit die Experimente in beiden Simulationswerkzeugen identisch ausgeführt werden, wurde das formale Modell erstellt, an dem sich die Implementierung in Plant Simulation und Microsoft Excel orientiert. In der Auswahl und Aufbereitung der Daten, wurden die Daten aus dem EU Projekt U-Turn für die Benutzung in den Simulationswerkzeugen aufbereitet. Dafür wurden die Rohdaten so lange bearbeitet, bis die Warenabgänge pro Datum vorliegen.

Um die Einsatzfähigkeit des Tabellenkalkulationsprogramms beurteilen zu können, wurde ein Netzdiagramm als Bewertungsvorlage erarbeitet. Dabei finden sich die Beurteilungskriterien in dem Netzdiagramm wieder, wobei jeweils die Ausprägung von schwach über mittel bis stark bewertet wird.

Anschließend wurden die entwickelten Experimente im Tabellenkalkulationsprogramm respektive Simulationsprogramm implementiert. Nach der Implementierung wurden die 60 Simulationsthroughs pro Lagerhaltungspolitik durchgeführt und im Anschluss ausgewertet. In diesen Auswertungen wurde festgestellt, dass die Simulation der einzelnen Lagerhaltungspolitiken das erwartete Verhalten der jeweiligen Lagerhaltungspolitik abbildeten und damit die Ergebnisse keine Überraschung darstellten. Auch zeigte ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Simulationswerkzeuge, dass diese ähnlich und somit plausibel sind.

Mit Hilfe des Netzdiagramms ergeben sich für die Stärken und Schwächen der Simulationswerkzeuge unterschiedliche Ergebnisse. Microsoft Excel überzeugt in den Bereichen der Kosten für das Programm und der Hardwareanforderungen. Wohingegen Plant Simulation in diesen Kategorien weniger überzeugen kann. Dafür eignet sich Plant Simulation in den Bereichen der Animationsmöglichkeiten und des Lieferumfangs besser. In diesen Kategorien schneidet Excel mäßig ab. Zusammenfassend betrachtet, halten sich die Stärken und Schwächen der jeweiligen Simulationswerkzeuge die Waage, sodass sie für den Einsatz in der Simulation von Problemstellungen innerhalb des Inventory Managements gleichermaßen in Frage kommen.

Aus diesem Grund lässt sich festhalten, dass sich Tabellenkalkulationsprogramme dazu eignen, um Problemstellungen im Inventory Management zu simulieren. Microsoft Excel, als Vertreter der Tabellenkalkulationsprogramme hat dazu in dieser Arbeit seinen Nutzen unter Beweis gestellt. Als Einschränkung ist aber anzuführen, dass es sich hierbei um ein einfaches Simulationsmodell handelt und kein zeitdynamisches Verhalten abzubilden war. Zudem handelt es sich bei den verwendeten Daten um Vergangenheitswerte und es wurde nur ein Produkt betrachtet.

Somit sollte die Untersuchung von zeitdynamischem Verhalten mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen in zukünftigen Arbeiten stattfinden. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob auch zukünftige Bedarfe so simuliert werden können. Des Weiteren ist zu überprüfen, ob die Simulation mit einem Tabellenkalkulationsprogramm für mehr als ein Produkt möglich ist.

Anwender aus Unternehmen sind mit der erstellten Excel Tabelle, im Rahmen der erwähnten Einschränkungen, in der Lage ihre Lagerhaltungspolitik zu überprüfen. Wie in dieser Arbeit aufgezeigt, könnte dadurch eine Reduzierung des Bestands und somit eine Verringerung der Kapitalbindungskosten erreicht werden. Dies ist unter anderem dann möglich, wenn die Warenabgänge der Vergangenheit auch für zukünftige Warenabgänge angenommen werden können. Dabei sollte neben der Simulation insbesondere eine Optimierung der Parameter der Lagerhaltungspolitiken durchgeführt werden. In der erstellten Excel Datei kann dies entweder durch eine Änderung des minimalen und maximalen Parameterwerts oder durch eine manuelle Eingabe eines bestimmten Parameterwerts geschehen.

Literaturverzeichnis

- Axsäter, S.: Inventory Control. Heidelberg: Springer, 2015.
- Banks, J.; Carson II, J.S.; Nelson, B.L.; Nicol, D.M.: Discrete–Event System Simulation. 5. Aufl. Harlow: Pearson Education Limited, 2014a.
- Banks, J.; Carson II, J.-S.; Nelson, B.-L.; Nicol, D.-M.: Excel Spreadsheet “Example2.8RefrigInventory.xls”. Nicol, D.-M. (Hrsg.). 2014b. URL: <http://www.bcn.org/> (zuletzt geprüft am 10.11.2018).
- Baron, C.P.; Dietel, U.; Kreppenhofer, D.; Rabe, M.: Handlungsanleitung Simulation. In: Rabe, M.; Hellingrath, B. (Hrsg.): Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. San Diego: SCS International, 2001, S. 117-190.
- Benker, H.: EXCEL in der Wirtschaftsmathematik. Anwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen für Studenten, Dozenten und Praktiker. Wiesbaden: Springer, 2014.
- Bichler, K.; Krohn, R.; Philippi, P.; Schneidereit, F.: Kompakt-Lexikon Logistik. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.
- Bichler, K.; Riedel, G.; Schöppach, F.: Kompakt Edition: Lagerwirtschaft. Grundlagen, Technologien und Verfahren. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
- Biermann, L.: FEFO, FIFO oder LIFO? Die Unterschiede von Lagerstrategien. SAP Business One Blog (Hrsg.). 2018. URL: <http://sap-b1-blog.com/fefo-fifo-oder-lifo-die-unterschiede-von-lagerstrategien/> (zuletzt geprüft am 10.11.2018).
- Brabänder, C.: Stochastisches Bestandsmanagement. Grundmodelle für Betriebswirte. Wiesbaden: Springer, 2018.
- Eley, M.: Simulation in der Logistik. Eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeugs „Plant Simulation“. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, 2012.
- Freimark, A.J.: Studie IT–Freiberufler 2018. München: IDG Business Media GmbH, 2018.
- Gárriz C.; Domingo, R.: Simulation, through discrete events, of industrial processes in productive environments. Procedia Manufacturing 13 (2017), S. 1074 - 1081.

-
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- Hartmann, H.: Bestandsmanagement und –controlling. Optimierungsstrategien mit Beispielen aus der Praxis. 3. Aufl. Gernsbach: Deutscher Betriebswirte–Verlag, 2017.
- Herrmann, A.: Lagerhaltung im Krankenhaus. Halle: Springer Gabler, 2015.
- Inside Business: Der Sicherheitsbestand – wie Sie Lagerkosten senken und Lieferengpässe vermeiden. Wer liefert was GmbH (Hrsg.). 2018. URL: <https://www.wlw.de/de/inside-business/praxiswissen/logistikmanagement/ermittlung-des-sicherheitsbestandes> (zuletzt geprüft am 10.11.2018).
- Jahangirian, M.; Eldabi, T.; Naseer, A.; Stergioulas, L.K.; Young, T.: Simulation in Manufacturing and Business: A Review. *European Journal of Operational Research* 203 (2010) 1, S. 1–13.
- Jiang, C.: Integrating the Use of Spreadsheet Software and VBA in Inventory Simulation. *Journal of Software* 5 (2010) 5, S. 498–505.
- Kersten, W.; Seiter, M.; von See, B.; Hackius, N.; Maurer, T.: Chancen der digitalen Transformation. Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2017.
- Kleijnen, J.P.C.; Smits, M.T.: Performance Metrics in Supply Chain Management. *Journal of Operational Research Society* 54 (2003) 5, S. 507–514.
- Kummer, S.; Grün, O.; Jammernegg, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. 3. Aufl. München: Pearson Studium, 2013.
- Law, A.-M.: Simulation Modeling and Analysis, 5. Aufl. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- Lockard, R.: Inventory Management vs. Inventory Control. *Inventory System Software Blog* (Hrsg.). 2010. URL: <https://inventorysystemsoftware.wordpress.com/2010/11/24/inventory-management-vs-inventory-control/> (zuletzt geprüft am 10.11.2018).
- Manitz, M.: Lagerhaltungspolitiken. In: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und –steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen. Berlin: Springer Gabler, 2015, S. 179-208.

- Microsoft: Produktübersicht. 2018. URL: <https://products.office.com/de-de/compare-all-microsoft-office-products?tab=2> (zuletzt geprüft am 10.11.2018).
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- Rehner, J.; Neumair, S.M.: Risiken internationaler Unternehmenstätigkeit: Begriffserklärungen und Formen von Internationalisierungsrisiken. In: Kühlmann, T.M. (Hrsg.): Internationales Risikomanagement. Auslandserfolg durch grenzüberschreitende Netzwerke. München: Oldenbourg, 2009, S. 27–60.
- Robinson, S.: Simulation. The Practice of Model Development and Use. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- Schels, I.; Seidel, U.M.: Excel 2016 im Controlling. Professionelle Lösungen für Controlling, Projekt- und Personalmanagement. München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- Seila, A.F.: Spreadsheet Simulation. In: Perrone, L.F.; Wieland, F.P.; Liu, J.; Lawson, B.G.; Nicol, D.M.; Fujimoto, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Piscataway: IEEE, 2006, S. 11–18.
- Semini, M.; Fauske, H.; Strandhagen, J.O.: Applications of Discrete-Event Simulation To Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey. In: Perrone, L.-F.; Wieland, F.-P.; Liu, J.; Lawson, B.-G.; Nicol, D.-M.; Fujimoto, R.-M. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Piscataway: IEEE, 2006, S. 11–18.
- Sezen, B.; Kitapçı, H.: Spreadsheet Simulation for the Supply Chain Inventory Problem. *Production Planning & Control* 18 (2007) 1, S. 9–15.
- Strakos, J.K.: Using Spreadsheet Modeling to Teach Exchange Curves (Optimal Policy Curves) in Inventory Management. *Decision Sciences Journal of Innovative Education* 14 (2016) 1, S. 51–66.

-
- Tako, A. A.; Robinson, S.: The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems* 52 (2012) 4, S. 802-815.
- Tempelmeier, H.: *Bestandsmanagement in Supply Chains*. Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2015.
- VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.): VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth, 2014.
- VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.): VDI - Richtlinie 3633 Blatt 4. Auswahl von Simulationswerkzeugen – Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien. Düsseldorf: Beuth, 1997.
- VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.): VDI - Richtlinie 3633 Blatt 9. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Tabellenkalkulation (TK) im Umfeld der Simulation. Düsseldorf: Beuth, 2017.
- Walluschnig, M.: *Produktlebenszyklus und Bestandsmanagement in der Halbleiterindustrie. Eine Analyse spezifischer Halbleiterprodukte*. Hamburg: Diplomica-Verlag, 2014.
- Wannenwetsch, H.: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- Wu, T.; Huang, S.; Blackhurst, J.; Zhang, X.; Wang, S.: Supply Chain Risk Management: An Agent-Based Simulation to Study the Impact of Retail Stockouts. *IEEE Transactions on Engineering Management* 60 (2013) 4, S. 676–686.

Abkürzungsverzeichnis

BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First-In-First-Out
LB	Durchschnittlicher Lagerbestand
LVS	Lagerverwaltungssysteme
LZ	Lagerzinsen
LZS	Lagerzinssatz
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
UH	Umschlagshäufigkeit
V&V	Verifikation und Validierung
VD	Verweildauer
WIP	Work-In-Progress

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensweise Simulationsstudie (nach VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014)	20
Abbildung 2: Kostenverlauf Simulation (nach Gutenschwager et al. 2017, S. 48).....	25
Abbildung 3: Ablaufplan Versuchsdurchführung	28
Abbildung 4: ausgewählte Problemstellungen Versuch „Lagerhaltung“	30
Abbildung 5: Programmablaufplan der Simulation (eigene Darstellung).....	32
Abbildung 6: Bewertungsvorlage zur Einsatzfähigkeit der Werkzeuge	37
Abbildung 7: Auswertung (r,q) Lagerhaltungspolitik	45
Abbildung 8: Auswertung (r,S) Lagerhaltungspolitik.....	46
Abbildung 9: Auswertung (s,q) Lagerhaltungspolitik.....	47
Abbildung 10: Auswertung (s,S) Lagerhaltungspolitik	48
Abbildung 11: Kennzahlen (r,q)-Politik.....	58
Abbildung 12: Kennzahlen (r,S)-Politik	59
Abbildung 13: Kennzahlen (s,q)-Politik	60
Abbildung 14: Kennzahlen (s,S)-Politik	61
Abbildung 15: Bewertungsgrafik für Plant Simulation & Excel.....	65

Formelverzeichnis

Formel 1: durchschnittlicher Lagerbestand.....	4
Formel 2: Verweildauer	4
Formel 3: Lagerzinsen.....	5
Formel 4: VBA-Code Teil 1.....	39
Formel 5: Berechnung der Bestellmenge in Excel.....	41
Formel 6: Wenn-Formel für Bestellmenge in Excel	41
Formel 7: VBA-Code Teil 2.....	42
Formel 8: VBA-Code Teil 3.....	42
Formel 9: VBA-Code Teil 4.....	42
Formel 10: Sim Talk Input-Berechnung	51
Formel 11: Sim Talk Deklarationsbereich	52
Formel 12: Sim Talk Zwischenzähler Teil 1	52
Formel 13: Sim Talk Zwischenzähler Teil 2.....	52
Formel 14: Sim Talk Berechnung der Bestellmenge	53
Formel 15: Sim Talk Zeitenberechnung.....	53
Formel 16: Sim Talk Berechnung des Bestandlevels.....	54
Formel 17: durchschnittlicher Lagerbestand.....	56
Formel 18: Umschlagshäufigkeit	56
Formel 19: Verweildauer	56
Formel 20: Lagerzinssatz	56
Formel 21: Lagerzinsen.....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lagerhaltungspolitiken (nach Herrmann 2015 und Manitz 2015)	7
Tabelle 2: Auszug verfügbarer Simulationswerkzeuge (vgl. Eley 2012, S. 10)	15
Tabelle 3: Vergleich verschiedener Simulationswerkzeuge (nach Robinson 2004, S. 42)	18
Tabelle 4: Daten der Simulation (VDI - Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 34)	22
Tabelle 5: Datenquellen und zugehörige Daten	24
Tabelle 6: Qualitative Bewertungsaspekte einer Simulationsstudie (nach VDI 2014)	26
Tabelle 7: Intervalle der variierten Simulationsparameter	31
Tabelle 8: Vergleich der ausgesuchten Experimente	48
Tabelle 9: Vergleich Lagerhaltungspolitiken	49
Tabelle 10: Vergleich der Lagerhaltungspolitiken	62
Tabelle 11: Kennzahlen-Formelsammlung nach Bichler et al. (2013)	77
Tabelle 12: Kostenübersicht	77

Anhang

Durchschnittliche Lagerbestand (LB):		
	$LB = \frac{\text{Anfangsbestand} + \text{Endbestand}}{2}$	(1)
Verweildauer (VD):		
	$VD = \frac{360 \text{ Tage}}{\text{Umschlagshäufigkeit}}$	(2)
Lagerzinsen (LZ):		
	$LZ = \frac{LB * \text{Lagerzinssatz}}{100}$	(3)
Umschlagshäufigkeit (UH):		
	$UH = \frac{\text{Gesamtverbrauch}}{\text{Lagerbestand}}$	(18)
Lagerzinssatz (LZS):		
	$LZS = \frac{\text{Zinssatz p. a.} * VD}{360}$	(20)

Tabelle 11: Kennzahlen-Formelsammlung nach Bichler et al. (2013)

Posten	Summe	Quelle
Durchschnittl. Stundensatz für IT-Freiberufler	93,80€ netto	Freimark 2018
Jährliche Gebühren für Excel	126€ /Jahr & User	Microsoft 2018
Gebühren für Plant Simulation	0,5 – 1 % der Investitions- summe	VDI 2014

Tabelle 12: Kostenübersicht

Eidesstattliche Versicherung

Eskuchen, Alexander

148785

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Projektarbeit mit dem Titel
Untersuchung der Einsatzfähigkeit eines Tabellenkalkulationsprogrammes zur Simulation von
Problemstellungen innerhalb des Inventory Managements

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Dortmund, 12.11.2018

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Dortmund, 12.11.2018

Ort, Datum

Unterschrift