



Wirtschaftlichkeitsanalyse additiver Fertigung als digitales Ersatzteillager

Arbeitspapier Nr. 26

Matthias M. Meyer, Andreas H. Glas, Michael Eßig

Wirtschaftlichkeitsanalyse additiver Fertigung als digitales Ersatzteillager

Matthias M. Meyer, Andreas H. Glas, Michael Eßig

Arbeitspapier Nr. 26, Veröffentlichungsdatum 11.05.2022

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Wirtschafts- und Organisationswissenschaften

Univ.-Prof. Dr. Michael Eßig

85577 Neubiberg

© Arbeitsgebiet Beschaffung / Universität der Bundeswehr München, alle Rechte vorbehalten

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	3
Förderungshinweis und Danksagung.....	4
Kurzzusammenfassung	4
1. Problemstellung und Zielsetzung der Studie.....	5
2. Ersatzteil-Versorgungsrisiken globaler Einsatzorganisationen.....	5
3. Additive Fertigung und digitale Lagerhaltung von Ersatzteilen.....	6
4. Wirkung AM auf die Wirtschaftlichkeit in Ersatzteillieferketten	8
5. Fallstudie und Simulation.....	11
5.1. Simulationsmethodik	11
5.2. Modellierung der Ersatzteil Lieferkette der HIL GmbH.....	12
5.3. Versorgungsalternativen und Events in der Versorgung	14
5.4. Analyse der Ergebnisse	18
5.5. Sensitivitätsanalyse zur Validierung der Ergebnisse.....	19
6. Zusammenfassung, Limitationen und Ausblick	20
Kontakt	21
7. Anhang.....	22
8. Literaturverzeichnis	23

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept eines digitalen Ersatzteillagers	7
Abbildung 2: Lieferkettenvergleich additiver Fertigung und traditioneller Fertigung	10
Abbildung 3: Links: Kondenswasserbehälter mit Anbauteilen (additive Fertigung). Rechts: Kondenswasserbehälter (traditioneller Lieferant)	13
Abbildung 4: Betrachtetes Simulationsdesign	14
Abbildung 5: Risikolandkarte der betrachteten Versorgungsrisiken	15
Abbildung 6: Sensitivitätsanalyse der Bezugskosten AM zu den Bezugskosten TM	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahme linearer Kostenreduktion durch Bauraumauslastung	16
Tabelle 2: Annahme der Preissteigerungen Kondenswasserbehälter bei traditionellem Lieferweg	16
Tabelle 3: Annahmentabelle pro Lieferweg	17
Tabelle 4: Betrachtete Versorgungsrisiken im traditionellen Lieferweg	17
Tabelle 5: Vergleichende Darstellung der Simulationsergebnisse pro Lieferweg	18

Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive Manufacturing
BAAINBw	Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Controlled
DM	Direct Manufacturing
HFLI	High Frequency, Low Impact
HIL	Heeresinstandsetzungslogistik
KPI	Key Performance Indicator
LFHI	Low Frequency, High Impact
MTBF	Mean time before failure
MTTR	Mean time to repair
RP	Rapid Prototyping
RR	Rapid Repair
RT	Rapid Tooling
SLS	Selektives Lasersintering
V&V	Verifikation und Validierung
WIWeB	Wehrwissenschaftliches Institut für Werks- und Betriebsstoffe

Förderungshinweis und Danksagung

Diese Studie wurde durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert und entstammt dem Projekt LogSimSanDstBw, welches das Ziel hat eine simulationsbasierte Analysefähigkeit für Versorgungsketten der Bundeswehr bereitzustellen. Besonderer Dank gilt hierbei der Professur für Modellbildung und Simulation des Instituts für technische Informatik der Universität der Bundeswehr München Prof. Dr, Oliver Rose, sowie Herrn Marco Canciemi von der HIL GmbH, sowie Herrn Hauptmann Maximilian Krönert (M. Eng) vom Wehrwissenschaftlichen Institut für Werks- und Betriebsstoffe, sowie Herrn Leutnant Dominik Kowalczyk für die Projektunterstützung und Datenauswertung im Rahmen seiner Bachelorarbeit.

Kurzzusammenfassung

Forschungsmotivation: Additive Technologie ermöglicht dezentrale Fertigung von Bauteilen, was sich insbesondere für Ersatzteile und da insbesondere für selten benötigte Teile eignet.

Forschungsziel: Dieses Arbeitspapier untersucht, ob eine traditionelle Lieferkette durch additive Fertigung ersetzt werden kann. Als Entscheidungskriterien Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und Risiken herangezogen.

Methodik: Es werden drei verschiedene Lieferketten simuliert und dazu ein Szenario auf Basis des Kondenswasserbehälters des militärischen Fahrzeugs „FENNEK“ herangezogen. Die Simulation rechnet einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren durch.

Ergebnisse: Die vollständige Substitution der traditionellen Lieferkette durch ein digitales Lager (= Vor-Ort-Produktion mittels Additiver Technologie) ist das wirtschaftlichste und leistungsfähigste Versorgungssystem in dem Szenario.

Implikationen /Limitationen: Die Forschung empfiehlt den Aufbau additiver Fertigungskapazitäten für Bedarfe analog dem betrachteten Bauteil, also für selten benötigte Ersatzteile. Aufgrund von Vorgaben wurde eine Überbevorratung in der traditionellen Lieferkette nicht betrachtet, dies ist eine Limitation.

1. Problemstellung und Zielsetzung der Studie

Einsatzorganisationen wie die Bundeswehr haben das Ziel zur Durchführung eines „...Auftrags, einer Leistungserbringung in dringlichen Situationen, [welche] die Erhaltung und Wiederherstellung der normalen Lebensführung oder gar des menschlichen Überlebens dienen.“¹ Die Voraussetzung hierzu ist die materielle Einsatzbereitschaft, respektive die Verfügbarkeit benötigter Beschaffungsobjekte.² Jedoch ist das Versorgungssystem von Streitkräften im Hochrisikoumfeld angesiedelt,³ und daher nach Kaufmann und Germer (2001) einer hoher Beanspruchung aus Komplexität (lange Produktlebenszyklen, hohe Modularität, Vergaberecht und Regulationen), Dynamik (Bedarfsänderungen bei langen Vorlaufzeiten), geographischen Distanzen zur Bezugsquelle, sowie Machtpositionen von Lieferanten (Single Sourcing bei hohen Wechselkosten) ausgesetzt.⁴

Additive Fertigung (AM) ist eine Technologie, bestehend aus multiplen Einzelverfahren mit der prozessualen Gemeinsamkeit, dass Material schichtweise anhand einer digitalen Repräsentation (CAD-Datei) des zu fertigenden Bauteils positioniert und zusammengefügt wird, bis dessen physisches Abbild entsteht.⁵ Insbesondere die Möglichkeit einer digitalen Lagerhaltung mit bedarfsweisen Abruf von Ersatzteilen in der physischen Welt,⁶ birgt ein hohes Potential zur Versorgungsrisikomitigation.

Nachfolgend, soll anhand eines Praxisbeispiels die Wirtschaftlichkeit einer digitalen Lagerhaltung mittels AM in der Bundeswehr mithilfe einer event-basierten Lieferketten-simulation analysiert werden. Die Basis hierzu bildet eine reale Einzelfallstudie der Heeresinstandsetzungslogistik GmbH (HIL), welche für die Wartung und Instandhaltung von Landfahrzeugen der Bundeswehr verantwortlich ist. Als Beschaffungsobjekt wird hierbei der Kondenswasserbehälter des Spähwagens Fennek betrachtet.⁷

2. Ersatzteil-Versorgungsrisiken globaler Einsatzorganisationen

Primäres Ziel der Versorgung von Einsatzorganisationen stellt die Verfügbarkeit benötigter Bedarfe und somit eine verlässliche Verfügbarkeit dar.⁸ Die Ersatzteilversorgung

¹ Kern et al. (2020), S. 16.

² Vgl. Eßig et al. (2020), S. 190.

³ Vgl. Peck (2005), S. 211.

⁴ Vgl. Kaufmann und Germer (2001), S. 1ff.

⁵ Vgl. Meyer et al. (2020a), S. 14.

⁶ Vgl. Glas et al. (2020), S. 483ff.

⁷ Der FENNEK ist ein leicht gepanzertes Radfahrzeug der Bundeswehr. Er dient der Aufklärung von Zielen und wird von der Aufklärungs-, Artillerie- sowie Pioniertruppe verwendet.

⁸ Vgl. Eßig et al. (2020), S. 190.

von Einsatzorganisationen findet in der ex post Phase der Beschaffung von Waffensystemen statt. Diese resultiert im Rahmen des Single Sourcing bei geringen Bedarfsmengen in hohen Abhängigkeiten vom initialen Lieferanten des Produktes („Engpassartikel bei kritischen Lieferanten“),⁹ welcher somit eine hohe Machtposition gegenüber der BeschOrg. besitzt und somit in **Preissteigerungsrisiken** resultieren kann.¹⁰ Zudem ist aufgrund der geringen Bedarfsmengen bei hoher Produktvarietät und Dynamik einem hohen **Bedarfsprognoserisiko** ausgesetzt. Desweiteren ist bei global agierenden Einsatzorganisationen eine weite geographische Distanz zum Lieferanten des Ersatzteils vorherrschend, sodass es zu **Transportrisiken** kommt, welche in Ausfällen oder Verzögerungen in den Ersatzteillieferungen resultieren.

3. Additive Fertigung und digitale Lagerhaltung von Ersatzteilen

Im Gegensatz zur subtraktiven Fertigung, bei der Material von einem Grundkörper abgetragen also subtrahiert wird, charakterisiert sich AM durch das schichtweise Auftragen von Material. Diese einzelnen Schichten werden je nach Verfahren unterschiedlich miteinander verbunden und so zu einem soliden, dreidimensionalen Bauteil aufgebaut.¹¹ Die Fertigung funktionaler Ersatzteile ist dem Anwendungsgebiet des Direct Manufacturing zuzuordnen.¹²

Die Grundlage einer digitalen Lagerhaltung (siehe Abbildung 1) bildet eine Computer Aided Design (CAD) Datei, welche das gewünschte Beschaffungsobjekt dreidimensional abbildet. Die Beschaffung von CAD-Daten erfolgt via Konstruktion oder Scanning, was sowohl mittels Dienstleistern als auch über eigene generative Fähigkeiten erfolgen kann (*Prozessschritt 1*, Abbildung 1).¹³

⁹ Vgl. Kraljič (1988), S. 486.

¹⁰ Vgl. Zsidisin (2003), S. 221.

¹¹ Vgl. Feldmann und Pumpe (2016), S. 5f.

¹² Vgl. Meyer et al. (2020b), S. 3.

¹³ Vgl. Rogers et al. (2016), S. 894.

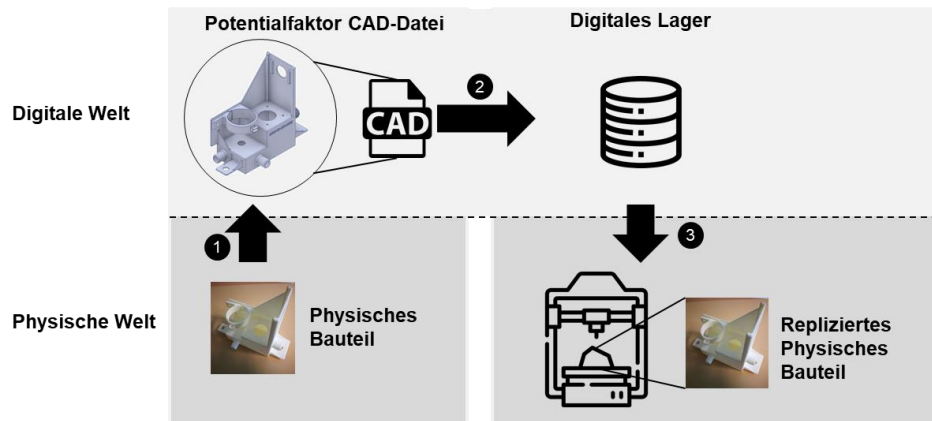


Abbildung 1: Konzept eines digitalen Ersatzteillagers

Die CAD-Daten dienen nun als Potentialfaktor zur Vervielfältigung und Weitergabe der Fertigungsinformation. Zum Nutzausschluss eines Datenzugriff oder Modifikationen durch Dritte an den digitalen CAD-Daten, bedarf es digitale Absicherungsmechanismen wie Digital Rights Management,¹⁴ wobei insbesondere dezentrale Datenbanken wie bspw. Blockchain zur Speicherung genutzt werden (*Prozessschritt 2*, Abbildung 1).¹⁵ Lagerhaltung dient der Redundanz, wodurch die Robustheit von Lieferketten gesteigert wird, jedoch resultiert physische Lagerhaltung in hohen Kosten, wohingegen eine digitale Lagerhaltung Redundanzen mittels geringer Kosten realisieren kann.¹⁶ Die gespeicherten CAD-Daten können sodann bei Bedarf („on demand“) aus dem digitalen Lager abgerufen und mittels additivem Fertigungsprozess in ein physisches Ersatzteil umgewandelt werden (*Prozessschritt 3*, Abbildung 1). Hierzu wird die als CAD-Datei gespeicherte Information des 3D-Modells durch Konvertierung in eine Schichtdatenrepräsentation umgewandelt.¹⁷

Für den eigentlichen Fertigungsprozess stehen verschiedene Einzelverfahren zur Verfügung, welche sich nach verwendetem Ausgangsrohmaterial (Filament, Pulver, etc) und Bindungsmechanismen (verschmelzen, verkleben, etc differenzieren lassen. Im Folgenden wird auf das in der Studie verwendete Verfahren des Selektiven Lasersintering (SLS) eingegangen. Hierbei wird als Rohmaterial Kunststoff in Pulverform auf der Bauplattform verteilt und mit einem Laser an den entsprechenden Stellen verschmolzen. Nachdem der Laser eine Schicht bearbeitet hat, senkt sich die Bauplattform um eine Schichtdicke. Danach verteilt ein Beschichter neues Baumaterial aus

¹⁴ Vgl. Picot (2003), S. 1ff.

¹⁵ Vgl. Miehle et al. (2019), S. 432; Kurpjuweit et al. (2021), S. 46ff.

¹⁶ Vgl. Ivanov und Dolgui (2019), S. 5130.

¹⁷ Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 6ff.

einem Pulvervorrat auf der Bauplattform. Der Laser tastet nun wieder die Oberfläche ab und versintert die neue Schicht. Diese Schritte wiederholen sich automatisch so oft, bis das oder die gewünschten Objekte fertiggestellt worden sind. Da das fertige Produkt auf der Bauplattform von Granulat umgeben ist werden bei diesem Verfahren keine Stützen benötigt. Somit kann der Bauraum des Druckers optimal ausgenutzt werden und im Vergleich zu anderen Technologien mit ähnlichem Bauraum mehr Objekte gleichzeitig gedruckt werden. Die gedruckten Ersatzteile besitzen eine hohe mechanische und thermische Belastbarkeit,¹⁸ weshalb das SLS gut in die bereits erwähnten Anwendungsfeld des Direct Manufacturing und der digitalen Lagerhaltung passen.

4. Wirkung AM auf die Wirtschaftlichkeit in Ersatzteillieferketten

Eine hohe Wirtschaftlichkeit wird dann erreicht, wenn ein optimales, möglichst hohes Kosten-Leistungs-Verhältnis vorherrscht. Dies lässt sich mathematisch als

$$\text{„Wirtschaftlichkeit} = \text{Leistung} / \text{Kosten}“^{19}$$

darstellen, wobei als Leistung in diesem Fall die Verfügbarkeit der (Ersatz-)Teile verstanden wird. Das bedeutet, dass bei einer Verdoppelung der Kosten die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich gleichbleibt, wenn die Verfügbarkeit ebenfalls verdoppelt wird. Um die in Abschnitt 3 erläuterte Verfügbarkeit sicherzustellen, bedarf es einen wirtschaftlichen Ansatz, um die limitierten, finanziellen Ressourcen eine maximale Verfügbarkeitsquote zu gewährleisten (Maximalprinzip).²⁰ So können im Kontext der Einsatzorganisationen, bei den zu beschaffenden Objekten Leistungsmerkmale wie Langlebigkeit des Produkts oder die Fähigkeit des Lieferanten schnell auf Bedarfsschwankungen zu reagieren in den Kosten berücksichtigt werden²¹, was oft dazu führt, dass über den traditionellen Lieferweg beschaffte Ersatzteile höhere Kosten aufweisen. Additive Fertigung eignet sich vor allem bei Ersatzteilen hoher geometrischen Komplexität, gemäß dem Prinzip „complexity-for-free“ wirkt zunehmende Komplexität bei AM nicht preissteigernd.²² Im Gegensatz dazu steigen in der weiter verbreiteten Herstellung durch beispielsweise subtraktive Maßnahmen, die Kosten eines Produktionsprozesses, mit zunehmender Komplexität des Produkts²³. In den letzten Jahren kam es

¹⁸ Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 66.

¹⁹ Vgl. van Weele und Eßig (2016), S. 95.

²⁰ Formal: $\max! = \text{Output}/\text{Input}$ vgl. Eichhorn, Merk (2016), S. 179.

²¹ Vgl. Eßig et al. (2020), S. 182f.

²² Vgl. Holmström und Partanen (2010), S. 694.

²³ Vgl. Gibson et al. (2015), S. 7.

jedoch zu Degressionseffekten durch Effizienzsteigerungen der Drucker sowie Reduzierung der Kosten für das Rohmaterial, insbesondere im Polymerbereich.²⁴

Des Weiteren werden keine produktspezifischen Werkzeuge verwendet, wodurch keine Umrüstung der Maschine erfolgen muss, und multiple Bauteile in einem Bauraum produziert werden können,²⁵ sodass deren Kosten gleichmäßig über eine große Stückzahl an Endprodukten verteilt werden (Economies of Scope).²⁶ Im Gegensatz zur traditionellen Fertigung entstehen bei der additiven Fertigung keine²⁷ oder nur eingeschränkte Kostendegressionseffekte, die von der Bauraumauslastung des spezifischen Druckauftrags abhängig sind.²⁸ Dies resultiert hingegen in höheren Stückkosten als dies traditionelle Fertigungsmethoden wie bspw. Spritzguss ermöglichen, da Kostendegressionseffekte nur gering ausgeprägt sind.

Nachfolgend soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen additive Fertigung auf selektiv betrachteten Versorgungsrisiken von Ersatzteilen in Einsatzorganisationen besitzt. Abbildung 2 zeigt den Zeitvorteil einer dezentralen additiven Lieferkette im Vergleich zu einem globalen traditionellen Lieferweg. Die additive Fertigung stellt hier eine geeignete reaktive Methode dar, um auf Versorgungsrisiken zu reagieren.²⁹

²⁴ Vgl. Lachmayer und Lippert (2020), S. 3.

²⁵ Vgl. Meyer et al. (2020a), S. 14f.

²⁶ Vgl. Ruffo et al. (2007), S. 23.

²⁷ Meyer u. a. (3/2020), S. 15.

²⁸ Vgl. Thomas (2016), S. 1858

²⁹ Im Gegensatz dazu existieren auch präventive Maßnahmen, die die Eintrittswahrscheinlichkeit eines oder mehrerer Ereignisse reduzieren. Ereignisses zu reagieren, also zu reduzieren. Sie hat allerdings keinen Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit vgl. Thun und Hoenig (2011), S. 245.

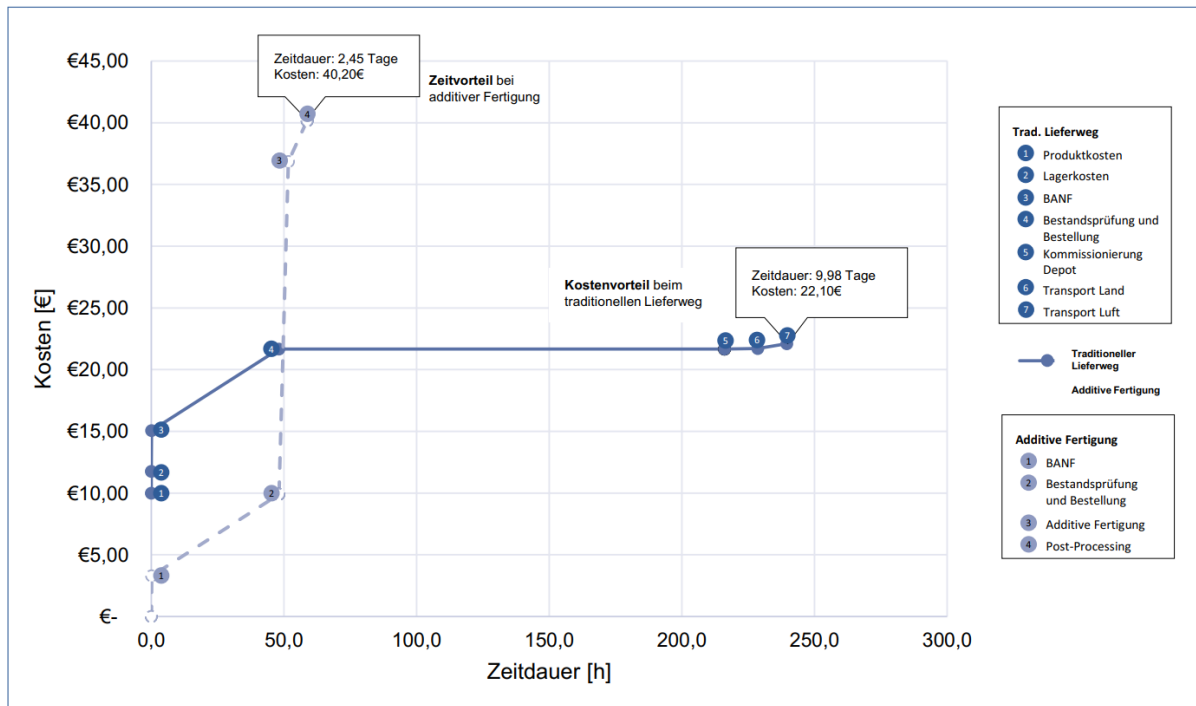


Abbildung 2: Lieferkettenvergleich additiver Fertigung und traditioneller Fertigung³⁰

Transportrisiken entfallen bei vollständiger additiver Fertigung beim Endkunden (dezentrale Fertigung), da dieser das benötigte Ersatzteil bei sich drucken kann, nachdem die benötigten CAD-Daten beschafft wurden sowie Eigentums- und Druckrechte vereinbart wurden. Bei den Bedarfsrisiken geht es um die nicht prognostizierbaren und spontanen Nachfragen nach Ersatzteilen, welche kurzfristig aus dem digitalen Lager abgerufen werden können. Die Möglichkeit zur Fertigung multipler Ersatzteile mit dem gleichen 3D-Drucker ermöglicht somit ein Bedarfshedging.³¹ Die vereinfachte Möglichkeit zum Insourcing, sowie zum Lieferantenwechsel resultiert in einer geringeren Lieferantenabhängigkeit, wodurch Preissteigerungsrisiken mitigiert werden.

³⁰ Vgl. Meyer et al. (2020a), S. 18.

³¹ Vgl. Tomlin (2006), S. 639ff.

5. Fallstudie und Simulation

5.1. Simulationsmethodik

Ein Simulationsmodell kennzeichnet sich als ein (computerbasiertes) „ablauffähiges Modell zur experimentellen Analyse dynamischer Zusammenhänge in Systemen“³² wobei ein Model als „eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“³³ verstanden wird. Vorteile einer Simulation sind, die Vergleichbarkeit der einzelnen Simulationsläufe, nicht ins reale System eingreifen zu müssen und vergleichsweise geringe Kosten.³⁴ Sie sind flexibel und es lassen sich die Konsequenzen von bestimmten Input-Konfigurationen analysieren.³⁵ Da es sich in dieser Einzelfallstudie um ein Ersatzteil handelt, welches unmittelbaren Einfluss auf die Einsatzfähigkeit von militärischen Kräften hat, wäre es zu teuer und zu gefährlich Eingriffe in diesem System durchzuführen und zu beobachten. Lieferzeiten könnten sich verlängern und somit die betroffenen Einheiten länger einschränken. Daher bieten sich Experimente im realen System nicht an, wohingegen eine Simulation mit ihren genannten Vorteilen besonders passt. Die Simulationsmethodik eignet sich insbesondere für Fragestellungen vom Typ „Was wäre wenn?“.³⁶ So soll insbesondere die Fragestellung überprüft werden, ob der Wechsel hin zu einem digitalen Ersatzteillager mittels AM die Wirtschaftlichkeit erhöht.

Um die Glaubwürdigkeit einer Simulation zu prüfen³⁷ und zu verhindern, „dass [...] fehlerhafte Aussagen gewonnen werden“³⁸, wird eine Verifikation und Validierung (V&V) durchgeführt. Hier ist anzumerken, dass das Maß an Reliabilität subjektiv sein kann, da es von den adressierten Personen als akzeptabel oder ausreichend anerkannt werden muss. Bei der Verifikation geht es um die „Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“.³⁹ Hierzu wurde eine Forschertriangulation durchgeführt.

³² Vgl. Gutenschwager et al. (2017), S. 22

³³ Vgl. VDI-3633 Blatt 1 (2014), S. 3.

³⁴ Stefanovic u.a. (2009), S. 744.

³⁵ Vgl. Stefanovic et al. (2009), S. 744.

³⁶ Vgl.

³⁷ Gutenschwager et al. (2017) S. 203.

³⁸ Rabe et al. (2008), S. 2.

³⁹ Rabe et al. (2008), S. 14.

Validierung „ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben“.⁴⁰ So beruht die Simulation auf einem realen Fall. So wurde mittels Experteninterviews aus den beteiligten Firmen eine Validierung der Ergebnisse sichergestellt.

Des Weiteren wurde die Robustheit der Simulationsstudie mittels Sensitivitätsanalyse überprüft.⁴¹ Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, die Auswirkungen der eingegebenen Informationen auf die ausgegebenen Werte festzustellen.⁴² Das bietet sich hier besonders an, weil nicht alle Input-Daten vorlagen und somit teilweise geschätzt werden mussten.⁴³ Zur Vereinfachung dient die Sensitivitätsanalyse in diesem Fall auch als funktionsbezogene Validierungsmethode.⁴⁴ Ein gutes Ergebnis der Sensitivitätsanalyse im Kontext der V&V ist, wenn (kleine) Veränderungen in den (geschätzten) Inputs, zu möglichst kleinen Veränderungen des Outputs führen.⁴⁵ Hier wurde als Sensitivitätsanalyse eine „one-way sensitivity analysis“⁴⁶ durchgeführt, da diese ein gutes graphisches Hilfsmittel darstellt, mithilfe dessen man die gesuchten Informationen visualisieren kann⁴⁷. Hierfür wurde die Wirtschaftlichkeit des AM in Abhängigkeit der Kosten variiert und graphisch ins Verhältnis mit der Wirtschaftlichkeit des TM gesetzt. Auf der Ordinate ist die Wirtschaftlichkeit und auf der Abszisse ein steigender Wert abgetragen. Dieser Wert ist der Faktor, mit dem die Kosten multipliziert werden.

5.2. Modellierung der Ersatzteil Lieferkette der HIL GmbH

Das Simulationsszenario entstammt einer holistischer Einzelfallstudie (Typ 1)⁴⁸ bei welcher die HIL GmbH im Kontext der selektiven Versorgungsrisiken von Ersatzteilen betrachtet wird. Die Informationen entstammen Primärdaten (Experteninterviews) sowie Sekundärdaten (Dokumentenrecherche) gewonnen. In der nachfolgenden Simulation wird eine Zeitspanne von 10 Jahren betrachtet. Das Beschaffungsobjekt stellt der Kondenswasserbehälter (Unit) des Spähpanzers FENNEK (System) dar. Fällt ein Kondenswasserbehälter in einem der FENNEK aus, muss dieser stillgelegt werden⁴⁹

⁴⁰ Rabe et al. (2008), S. 15.

⁴¹ Vgl. Liebl (1995), S. 215.

⁴² Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 102.

⁴³ Gutenschwager et al. (2017), S. 183.

⁴⁴ Vgl. Liebl (1995), S. 214.

⁴⁵ Vgl. Gutenschwager u. a. (2017), S. 210.

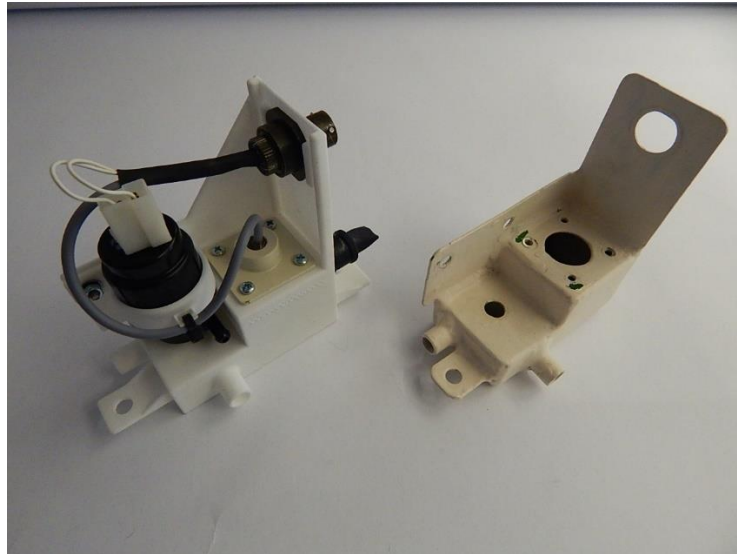
⁴⁶ Vgl. Borgonovo (2017), S. 27.

⁴⁷ Vgl. Borgonovo (2017), S. 28.

⁴⁸ Vgl. Yin (2014), S. 50.

⁴⁹ HIL GmbH.

und die betroffene Einheit ist für die Dauer der Stilllegung nur noch bedingt einsatzbereit. Sie könnte das Fahrzeug vorübergehend von anderen Einheit ausleihen, doch das Problem der mangelnden Einsatzbereitschaft wird dadurch nur verschoben.



**Abbildung 3: Links: Kondenswasserbehälter mit Anbauteilen (additive Fertigung).
Rechts: Kondenswasserbehälter (traditioneller Lieferant)**

Im derzeit vorherrschenden Status Quo, ist für die Versorgung ein Lieferant im Single Sourcing zuständig, welcher bedarfsweise (on demand) bestellt wird. Die HIL GmbH darf aufgrund verpflichtender logistischer Vorgaben des Auftraggebers (Bundeswehr) kein Materiallager betreiben, so müssen bei Ausfällen bedarfsgerechte Bestellungen getätigt werden.⁵⁰

Die Simulation wurde in drei Szenarien unterteilt, die sich im Bezug der Ersatzbehälter unterscheiden. In dem Szenario TM wird der Kondenswasserbehälter ausschließlich durch einen Lieferanten TM beschafft. Das Szenario AM betrachtet ein digitales Ersatzteillager mittels additiver Fertigung im SLS-Verfahren des Ersatzteils durch die HIL GmbH in und das dritte Szenario AMTM, betrachtet eine synchrone Beschaffung, bei dem sowohl der Lieferant TM wie auch die Eigenfertigung AM genutzt werden.

⁵⁰ WIWeB.Fehler! Textmarke nicht definiert.

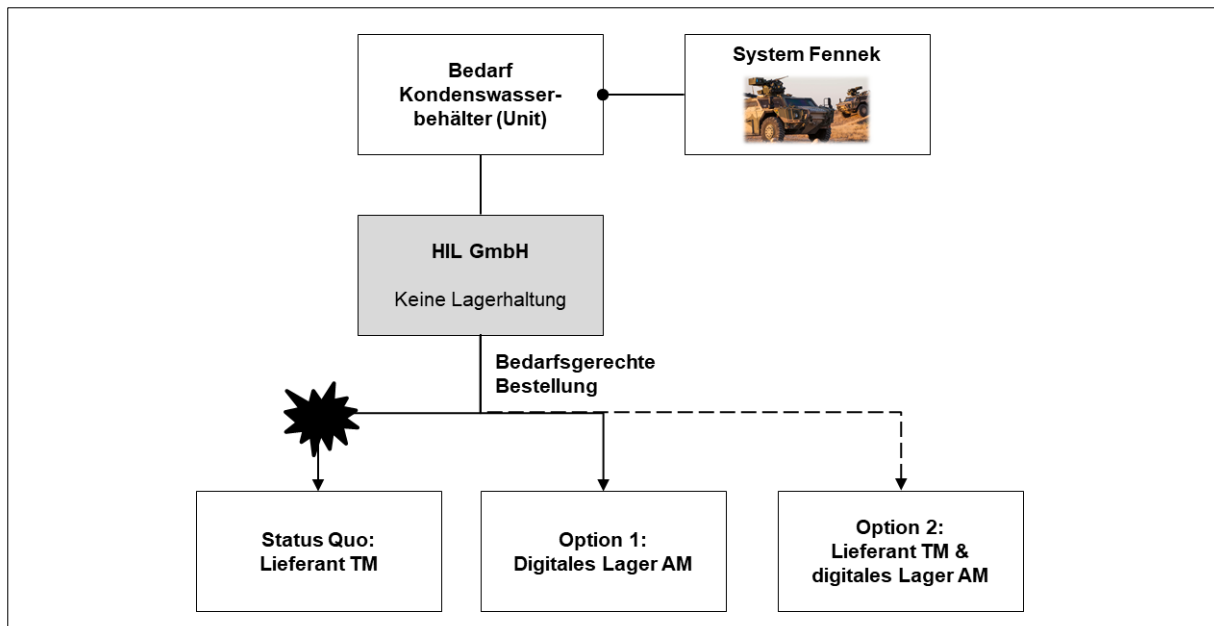


Abbildung 4: Betrachtetes Simulationsdesign

Jedes betrachtete Szenario wurde zehn Mal simuliert, um mögliche Variationen auszugleichen und eine hohe Reliabilität zu gewährleisten. Die Outputs jedes Durchlaufs wurden gespeichert und anschließend ausgewertet. So konnten Bedarf, Durchlaufzeit, zeitliche Verfügbarkeit, absolute Verfügbarkeit und die Kosten jedes Simulationslaufs tabellarisch gespeichert werden. Anhand dieser Daten konnte im Anschluss die Wirtschaftlichkeit für jeden Durchlauf, abhängig von der zeitlichen und der absoluten Verfügbarkeit berechnet werden. Die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aus der betrachteten Formel: $\text{Wirtschaftlichkeit} = \text{Verfügbarkeit} / \text{Gesamtkosten}$.⁵¹

5.3. Versorgungsalternativen und Events in der Versorgung

Der Kondenswasserbehälter kann ausgehend der Systematisierung von Kraljic (1983) als Engpassartikel identifiziert werden.⁵² Nachfolgend werden drei ausgewählten Risiken der Versorgung betrachtet, welche sich im Rahmen der Primärdatenerhebung in Form eines strukturierten Interviews in der Fallstudie als relevant bei der Beschaffung von Kondenswasserbehältern ergeben haben. Dies sind Bedarfsprognoserisiken, Preissteigerungen sowie auftretende Transportverzögerungen auf dem Weg vom Lieferanten zur HIL GmbH. Diese wurden mittels Risikolandkarte abgebildet und ins Verhältnis zur Eintrittsfrequenz auf Abszisse und dem Schweregrad der Auswirkungen auf der Ordinate eingetragen (siehe Abbildung 5).

⁵¹ Vgl. van Weele und Eßig (2016), S. 95.

⁵² Vgl. Kraljic (1983), S. 109ff.

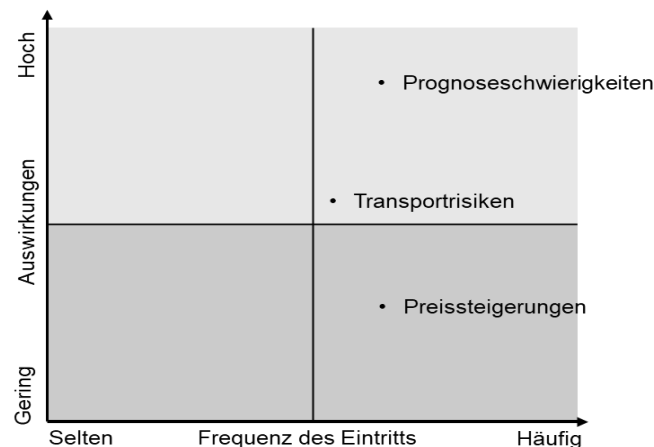


Abbildung 5: Risikolandkarte der betrachteten Versorgungsrisiken⁵³

Im folgenden Einzelfall wird die Versorgungssicherheit des Ersatzteils Kondenswasserbehälter näher betrachtet, welches durch geringes Beschaffungsvolumen sowie hohem Versorgungsrisiko gekennzeichnet ist, da dieses nur durch einen Hersteller abgedeckt werden kann. Hierdurch erhält der Lieferant eine hohe Verhandlungsmacht, was zu Preissteigerungen und langen Lieferzeiten führen kann.⁵⁴ Die Kosten der Ersatzbehälter nehmen regelmäßig zu, da der zuständige Lieferant jedes Jahr gewisse Produktionskapazitäten freihalten muss, um jederzeit den plötzlichen Bedarf der Bundeswehr und dessen Bestellung schnellstmöglich decken zu können. Gleichzeitig besitzt der Lieferant viel Verhandlungsmacht aufgrund der Zuordnung der Ersatzbehälter zu den Engpassprodukten. Bezogen auf das System FENNEK sind die Auswirkungen der Kosten aber eher gering und somit weiter unten eingeordnet. Als Transportrisiken werden alle Verzögerungen gezählt, welche auf dem Weg vom Hersteller zur HIL GmbH entstehen. Das könnten unvorhergesehene Ereignisse auf dem Transportweg sein. Die Auswirkungen sind in diesem Fall nicht mehr so hoch wie bei den Prognoseschwierigkeiten aber höher als durch die Preissteigerungen, da das Ersatzprodukt bereits auf dem Weg ist, die Ankunft aber dennoch verzögert stattfindet und auch hier die betroffene Einheit länger eingeschränkt in ihrer Einsatzbereitschaft sein wird.

⁵³ In Anlehnung an Thun und Hoenig (2011), S. 246.

⁵⁴ van Weele, Eßig (2017), S. 248.

Die Kosten für die Lieferung haben in der Vergangenheit deutlich zugenommen. Von ursprünglich 200€ auf inzwischen 1000€ und damit deutlich über den Kosten der additiven Fertigung, die für dasselbe Bauteil in Einzelfertigung 240€ und bei optimaler Bauraumauslastung 70€ pro Behälter betragen.

Tabelle 1: Annahme linearer Kostenreduktion durch Bauraumauslastung

Bestellmenge	Kosten	Bestellmenge	Kosten
1	240,00 €	8	148,46 €
2	226,92 €	9	135,38 €
3	213,85 €	10	122,31 €
4	200,77 €	11	109,23 €
5	187,69 €	12	96,15 €
6	174,62 €	13	83,08 €
7	161,54 €	14	70,00 €

Die Preise der traditionell hergestellten Ersatzbehälter nicht exponentiell auf 1000€ erhöht, da die genaue Preisentwicklung über die Jahre nicht bekannt war und dem TM im simulierten Zeitraum keine zu hohen Preise angerechnet werden sollten. Dazu wurde eine Tabelle erstellt, in der ab dem ersten Jahr mit Stückkosten von 200€ die Preise mit jedem weiteren Jahr ansteigen. Diese Preise konnten dann mit den jeweiligen Bestellmengen des Jahres multipliziert werden, um so die Gesamtkosten während eines Simulationsdurchlaufs zu errechnen (siehe Tabelle 2). Die Kosten Preise der traditionell hergestellten Ersatzbehälter wurden hierbei nicht exponentiell auf 1000€ erhöht wie im realen Fall der HIL GmbH, da die genaue Preisentwicklung über die Jahre nicht bekannt war und somit eine konservativere Kostenbetrachtung verfolgt wurde.

Tabelle 2: Annahme der Preissteigerungen Kondenswasserbehälter bei traditionellem Lieferweg

Jahr 1	200,00 €	Jahr 6	472,99 €
Jahr 2	254,60 €	Jahr 7	527,59 €
Jahr 3	309,20 €	Jahr 8	582,19 €
Jahr 4	363,79 €	Jahr 9	636,79 €
Jahr 5	418,39 €	Jahr 10	691,38 €

Die Simulation wurde in jeder der drei Szenarien: AM, TM, AMTM zehn Mal durchgeführt, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Tabelle 3: Annahmentabelle pro Lieferweg

Bezugsweg	Variable	Wert	Quelle
Status Quo TM	Bestellmenge	1-50 EA	HIL
	Lieferdauer	60(+/-30) d	HIL ⁵⁵
	Kosten	200€-691€	HIL ⁵⁶
Bezugsquelle AM	Bestellmenge	1-14 EA	HIL
	Produktionsdauer	1d	HIL/Annahme ⁵⁷
	Kosten	240€-70€	HIL ⁵⁸
Generell	Lagergröße	0	HIL
	Simulationszeitraum	10 Jahre	Annahme
	Lieferantenauswahl	Zufällig	Annahme
	(bei dualer Möglichkeit TM und AM)		

Eine Übersicht der Umsetzung der betrachteten Versorgungsrisiken in der Ersatzteil-lieferkette der HIL GmbH findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Betrachtete Versorgungsrisiken im traditionellen Lieferweg

Events	Umsetzung	Quelle
Basisbedarf	$\mu = 1$ alle 60 Tage	Annahme
Prognoserisiko HFLI	$\sigma = 1$	Annahme
Prognoserisiko LFHI	Einmaliger Austausch von insgesamt 40 Kondenswasserbehältern zu Beginn des siebten Jahres.	HIL
Transportrisiko	Eintritt alle 120d mit Standardabweichung von 20d ($\mu = 120, \sigma = 20$) Verzögerung 3 Tage bei Standardabweichung 2d ($\mu = 3, \sigma = 2$)	Annahme
Preissteigerungen	Preissteigerungstabelle Tabelle 2	HIL

⁵⁵ Lieferzeit laut WIWeB: 14-18 Wochen. Hier zugunsten des Lieferanten TM verringert.

⁵⁶ Der genau Preisverlauf über die Jahre wurden konservativ geschätzt, da nicht genau bekannt war, wie sich die Kosten entwickelt haben. Der höchste Preis lag bei 1000€, wurde aber nicht in der Simulation verwendet.

⁵⁷ Die additive Fertigungsdauer beträgt laut HIL 16-34h, aufgerundet also bis zu zwei Tage. Trotzdem wurde konstant mit einem Tag gerechnet. Dadurch ist der Drucker in dieser Simulation bei den üblichen Bestellmengen von 1 bis 3 Behältern langsamer. Die seltenen, aber hohen Bestellmengen von 12 bis 14 Behältern sind somit etwas schneller fertig. Insgesamt ist der Druckprozess in der Simulation etwas langsamer als in der Realität.

⁵⁸ Der Preis für einen Behälter sowie der Preis des Druckprozess für 14 Behälter sind bekannt. Der Kostenverlauf dazwischen wurde linear angenommen.

5.4. Analyse der Ergebnisse

Im Folgenden werden die ausgewerteten Daten aufbereitet und tabellarisch dargestellt. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse analysiert und miteinander verglichen werden. Hierzu wurden als Leistungskennzahlen die Verfügbarkeit des Kondenswasserbehälters, die Durchlaufzeit von Bestellung zum Erhalt der Lieferung (LT) resultierenden Kosten, sowie der resultierende Wirtschaftlichkeitsindikator aus Verfügbarkeit pro Kosten gebildet.

Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte aus den durchgeführten Simulationen, sowie den zugehörigen Variationskoeffizienten, welcher als relatives Streuungsmaß der Einzelsimulationenwerte aufgrund verwendeten Zufallswerten in den Events dient.

Der Bedarf ist mit 75,4 Kondenswasserbehältern bei allen Bezugswegen in einem Zeitraum von 10 Jahren gering ausgeprägt und eignet sich aufgrund der geringen Schwankung (+-1,4%) für einen Vergleich.

Die mittlere zeitliche Verfügbarkeit des Status Quo ist mit 60,9% sehr gering ausgeprägt. Eine Substitution auf eine digitale Lagerhaltung erreicht eine Erhöhung der Verfügbarkeit um 49,1% auf 96,8%. Eine duale Nutzung des Lieferanten TM mit einer Bezugsquelle AM resultiert in einer Verbesserung um 24,1% auf 75,6% zeitliche Verfügbarkeit von Kondenswasserbehältern des Systems FENNEK.

Die mittlere Durchlaufzeit zeigt, dass eine digitale dezentrale Lagerhaltung mit AM eine deterministische Vorlaufzeit von 2 Tagen aufweist und somit die Reaktionsfähigkeit um 96,5% gegenüber dem Status Quo erhöht. Eine duale Nutzung einer Bezugsquelle TM und einer Bezugsquelle AM bei geringer Bedarfsmenge und zufälliger Bestellauslösung resultiert in einer Durchlaufzeitreduktion von 42,4%.

Tabelle 5: Vergleichende Darstellung der Simulationsergebnisse pro Lieferweg

Bezugsquelle	Bedarf	ØLT	VK LT	Verf.	VK Verf.	Kosten	W*	VK W
Status Quo TM	75,1	56,8	13,4%	60,9%	9,9%	35.923,79 €	0,172	0,182
Substitution AM	74,5	2,0	0	96,8%	0,3%	10.870,77 €	0,891	0,082
TM & AM	76,6	32,7	18,9%	75,6%	5,0%	28.967,20 €	0,266	0,159
Legende:								
Bedarfsmenge (Bedarf), Mittelwert der Lieferzeit (ØLT), Variationskoeffizient der Lieferzeit (VK LT), Verfügbarkeit (Verf.), Variationskoeffizient der Verfügbarkeit (VK Verf.), Wirtschaftlichkeitsindikator (W), Variationskoeffizient des Wirtschaftlichkeitsindikators (VK W)								
* Diese Werte wurde jeweils mit 10.000 multipliziert, um die in den Tabellen dargestellten Wirtschaftlichkeitsinformationen zu erhalten.								

Der Gesamtkostenvergleich zeigt, dass der Preisanstieg bei Auswahl eines Lieferanten TM im Single Sourcing im Vergleich zu den Bezugsalternativen zu deutlich erhöhten Gesamtkosten am Ende des 10-Jahres Zeitraums führen. Eine vollständige Substitution mit einem digitalen Lager durch eine Bezugsquelle AM resultiert in einer Gesamtkostenverbesserung von 69,7%. Eine duale Nutzung beider Bezugsalternativen führt ebenso zu einer Optimierung von 19,4%.

Hieraus resultiert, dass eine Substitution geringer Bedarfsmengen durch digitale Lagerhaltung mit AM die höchste Wirtschaftlichkeit ($W=0,891$) aufweist.

5.5. Sensitivitätsanalyse zur Validierung der Ergebnisse

Nachfolgend soll im Zuge der Verifikation und Validierung eine Sensitivitätsanalyse anhand der Gesamtkosten AM zu den Gesamtkosten TM durchgeführt werden (siehe Abbildung 7). Hierzu wird die Wirtschaftlichkeit AM bei gleichbleibender Verfügbarkeit aber steigenden Kosten der Bezugsquelle AM verhält. Auf der Ordinate ist die Wirtschaftlichkeit und auf der Abszisse die Gesamtkosten abgetragen. Die Bezugsquelle TM ist als konstanter Wert eingetragen ($V=60\%$, $TCO=35.923,79\text{€}$), da geprüft wird, wann die Kurve der Bezugsquelle AM die Kurve der Bezugsquelle TM schneidet.

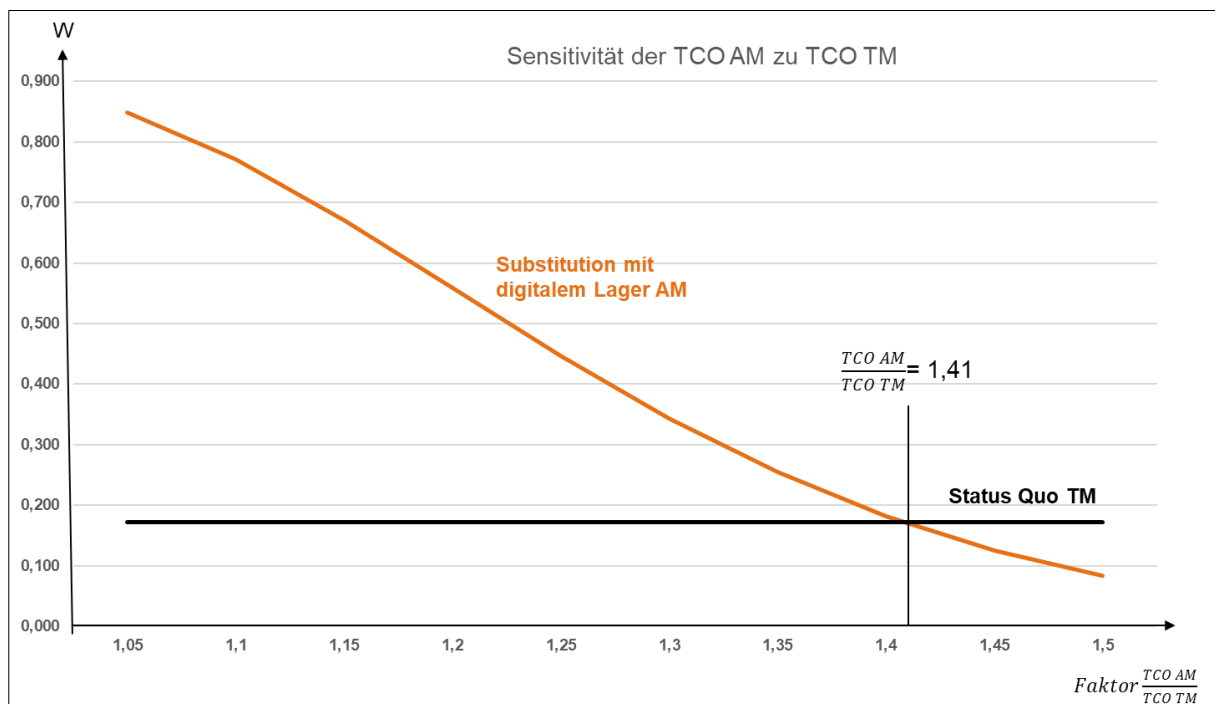


Abbildung 6: Sensitivitätsanalyse der Bezugskosten AM zu den Bezugskosten TM

Es zeigt sich eine hohe Robustheit der Ergebnisse der Simulationsstudie, da bis zu einer Erhöhung der Gesamtkosten von über 41% der Bezugsquelle AM der Wirtschaftlichkeitsvorteil bestehen bleibt, wohingegen ab diesem Wert der Status Quo des Single Sourcing TM präferiert werden sollte.

6. Zusammenfassung, Limitationen und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass eine digitale Lagerhaltung in der Bundeswehr die Wirtschaftlichkeit der Ersatzteilversorgung verbessert. Limitierend muss angefügt werden, dass aufgrund gegebener Regularien keine Erhöhung des Lagerbestandes im vorherrschenden traditionellen Lieferweg betrachtet wurde. Desweiteren wurden keine Opportunitätskosten bei fehlender Verfügbarkeit eines Systems FENNEK betrachtet, was die Wirtschaftlichkeit einer digitalen Lagerhaltung weiter erhöhen würde. Die Simulationsstudie zeigt, dass die fokussierten Versorgungsrisiken mittels eines digitalen Lagers minimiert werden konnten, wodurch die Verfügbarkeit und somit die Einsatzbereitschaft der Einsatzorganisation Bundeswehr erhöht wurde.

Kontakt

**Prof. Dr. Michael Eßig**

Leiter Arbeitsgebiet Beschaffung
Lehrstuhl für Beschaffung und Supply Management
Universität der Bundeswehr München

michael.essig@unibw.de
+49 (0)89 6004 4221
www.unibw.de/beschaffung

**PD Dr. habil. Andreas H. Glas**

Leiter Forschungsgruppe
Defense Acquisition & Supply Management
Universität der Bundeswehr München

andreas.glas@unibw.de
+49 (0)89 6004 4221
www.unibw.de/beschaffung
www.unibw.de/militaeroekonomie

**Matthias M. Meyer (M. Eng.)**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand
Defense Acquisition & Supply Management
Universität der Bundeswehr München

ma.meyer@unibw.de
+49 (0)89 6004 3790
www.unibw.de/beschaffung

Über uns:

Beschaffung ist eine zentrale Teildisziplin der Betriebswirtschaftslehre. Sie beschäftigt sich mit der Frage, wie man „gut“ einkauft. Wertschöpfung von Unternehmen wie von Institutionen des öffentlichen Sektors wird heute zu großen Teilen von Zulieferern erbracht. In der Industrie liegt der Fremdbezugsanteil bei weit über 50% des Umsatzvolumens. Bund, Länder, Kommunen und sonstige öffentliche Auftraggeber verantworten ein Volumen von rund 350 Mrd. Euro, was über 15% des deutschen Bruttoinlandsproduktes entspricht. Das Einkaufsvolumen der Bundeswehr liegt bei ca. 11 Mrd. Euro jährlich.

Mehr als genug Gründe, sich der **strategischen Bedeutung der Beschaffung** bewusst zu sein und Lehre wie Forschung an der Optimierung von Beschaffungsprozessen, -strukturen und -instrumenten auszurichten. Das Arbeitsgebiet Beschaffung an der Universität der Bundeswehr München gliedert sich entsprechend in die Felder industrielle Beschaffung, öffentliche Beschaffung und Verteidigungsbeschaffung und bietet mit seinen Einrichtungen (zwei Professuren und drei Forschungsgruppen) einen deutschlandweit einmaligen Forschungsschwerpunkt im Bereich des Beschaffungsmanagements. Dieser Verbund stellt heute und zukünftig sicher, dass auch die Bundeswehr und ihr Rüstungsmanagement aktuell und modern wissenschaftlich in Beschaffungsfragen unterstützt wird.

7. Anhang

Anhang 1: Einzeldurchläufe der Simulationsstudie

		Bedarf	ØLT	Verfügbarkeit	Gesamtkosten	W
TM	Sim1	76	52,68	67,2%	35.947,30 €	0,19
	Sim2	86	60,59	54,3%	39.912,83 €	0,14
	Sim3	81	62,89	56,9%	38.476,05 €	0,15
	Sim4	74	58,17	62,5%	36.584,66 €	0,17
	Sim5	63	41,23	73,4%	30.362,79 €	0,24
	Sim6	75	65,86	55,1%	37.075,47 €	0,15
	Sim7	76	47,22	57,7%	37.639,84 €	0,15
	Sim8	76	61,21	57,8%	35.728,90 €	0,16
	Sim9	67	56,83	64,3%	32.181,76 €	0,20
	Sim10	77	61,04	59,9%	35.328,32 €	0,17
AM	Sim1	75	2,00	96,7%	10.676,92 €	0,91
	Sim2	70	2,00	96,9%	10.156,92 €	0,95
	Sim3	78	2,00	96,9%	11.527,69 €	0,84
	Sim4	77	2,00	96,6%	11.732,31 €	0,82
	Sim5	80	2,00	96,4%	12.060,00 €	0,80
	Sim6	70	2,00	97,4%	9.450,77 €	1,03
	Sim7	79	2,00	96,5%	11.558,46 €	0,84
	Sim8	72	2,00	97,0%	10.532,31 €	0,92
	Sim9	71	2,00	96,9%	10.893,85 €	0,89
	Sim10	73	2,00	97,1%	10.118,46 €	0,96
AMTM	Sim1	80	23,31	79,7%	26.605,51 €	0,30
	Sim2	77	33,15	74,9%	33.515,99 €	0,22
	Sim3	84	22,75	78,7%	28.370,60 €	0,28
	Sim4	68	30,25	81,9%	31.746,69 €	0,26
	Sim5	78	35,42	75,2%	27.108,24 €	0,28
	Sim6	71	37,75	73,9%	23.625,75 €	0,31
	Sim7	75	41,93	69,8%	32.064,03 €	0,22
	Sim8	79	35,07	73,2%	32.549,53 €	0,22
	Sim9	79	37,24	71,4%	21.022,00 €	0,34
	Sim10	75	30,04	76,9%	33.063,68 €	0,23

8. Literaturverzeichnis

Eßig, Michael / Glas, Andreas / Deimling, Christian von (2020): Beschaffung für Einsatzorganisationen. in: Einsatzorganisationen : Erfolgreiches Handeln in Hochrisikosituationen. hrsg. von Kern, E.-M. / Richter, G. / Müller, J. C. / Voß, F.-H., Wiesbaden 2020, S. 181–203.

Feldmann, Carsten / Pumpe, Andreas (Hrsg.) (2016): 3D-Druck - Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit. Entscheidungsunterstützung für Unternehmen. 1. Aufl., Wiesbaden 2016.

Gebhardt, Andreas / Kessler, Julia / Thurn, Laura (2016): Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion. 5. Aufl., München 2016.

Gibson, Ian / Rosen, David / Stucker, Brent (2015): Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing, New York, Heidelberg, Dordrecht, London 2015.

Glas, Andreas H. / Meyer, Matthias M. / Eßig, Michael (2020): Business Models for Additive Manufacturing: A Strategic View from a Procurement Perspective. in: Meboldt, Klahn (Hg.) 2020 – Industrializing Additive Manufacturing 2020, S. 483–499.

Gutenschwager, Kai / Rabe, Markus / Spieckermann, Sven / Wenzel, Sigrid (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen, Berlin, Heidelberg 2017.

Holmström, Jan / Partanen, Jouni (2010): Rapid manufacturing in the spare parts supply chain. in: Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 21, Nr. 6 (2010), S. 687–697.

Ivanov, Dmitry / Dolgui, Alexandre (2019): Low-Certainty-Need (LCN) supply chains: a new perspective in managing disruption risks and resilience. in: International Journal of Production Research, Vol. 57, 15-16 (2019), S. 5119–5136.

Kaufmann, Lutz / Germer, Thomas (2001): Controlling internationaler Supply Chains :Positionierung - Instrumente - Perspektiven 2001.

- Kern, Eva-Maria / Richter, Gregor / Müller, Johannes / Voß, Fritz-Helge (2020): Einsatzorganisationen Erfolgreiches Handeln in Hochrisikosituationen: Erfolgreiches Handeln in Hochrisikosituationen 2020.
- Kraljic, Peter (1983): Purchasing Must Become Supply Management. in: Harvard Business Review, Vol. 1983, Nr. 61 (1983), S. 109–117.
- Kraljič, Peter (1988): Zukunftsorientierte Beschaffungs- und Versorgungsstrategie als Element der Unternehmensstrategie. in: Handbuch Strategische Führung. hrsg. von Henzler, H. A., Wiesbaden 1988, S. 477–497.
- Kurpjuweit, Stefan / Schmidt, Christoph G. / Klöckner, Maximilian / Wagner, Stephan M. (2021): Blockchain in Additive Manufacturing and its Impact on Supply Chains. in: Journal of Business Logistics, Vol. 42, Nr. 1 (2021), S. 46–70.
- Lachmayer, R. / Lippert, R. B. (2020): Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung 2020.
- Meyer, Matthias M. / Glas, Andreas H. / Eßig, Michael (2020a): Der Einfluss additiver Fertigung auf Operational Performance. in: Controlling, Vol. 32, Nr. 3 (2020), S. 14–21.
- Meyer, Matthias M. / Glas, Andreas H. / Eßig, Michael (2020b): Systematic review of sourcing and 3D printing: make-or-buy decisions in industrial buyer–supplier relationships. in: Management Review Quarterly (2020).
- Miehle, Daniel / Meyer, Matthias M. / Luckow, Andre / Bruegge, Bernd / Essig, Michael (2019): Toward a Decentralized Marketplace for Self-Maintaining Machines. in: 2019 IEEE International Conference on Blockchain (2019), S. 431–438.
- Peck, Helen (2005): Drivers of supply chain vulnerability: an integrated framework. in: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 35, Nr. 4 (2005), S. 210–232.
- Picot, Arnold (2003): Digital Rights Management, Berlin, Heidelberg 2003.
- Rogers, Helen / Baricz, Norbert / Pawar, Kulwant S. (2016): 3D printing services: classification, supply chain implications and research agenda. in: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 46, Nr. 10 (2016), S. 886–907.

Ruffo, Massimiliano / Hague, Richard / Tuck, Chris (2007): Make or buy analysis for rapid manufacturing. in: *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13, Nr. 1 (2007), S. 23–29.

Stefanovic, Dusan / Stefanovic, Nenad / Radenkovic, B. (2009): Supply network modelling and simulation methodology. in: *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 17, Nr. 4 (2009), S. 743–766.

Thomas, Douglas (2016): Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, Nr. 5 (2016), S. 1857–1876.

Thun, Jörn-Henrik / Hoenig, Daniel (2011): An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 131, Nr. 1 (2011), S. 242–249.

Tomlin, Brian (2006): On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks. in: *Manag. Sci.*, Vol. 52 (2006), S. 639–657.

van Weele, Arjan J. / Eßig, Michael (2016): *Strategische Beschaffung*, Wiesbaden 2016.

Zsidisin, George A. (2003): A grounded definition of supply risk. in: *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 9, Nr. 5 (2003), S. 217–224.