

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Konzeptionierung eines Simulationsmodells der Rettungskette unter Gefechtsbedingungen

Simulation Model of the Military Rescue Chain in Combat Scenarios – A Conceptual Design

Kai Meisner, Sanitätsakademie der Bundeswehr,
München (Germany), kai.meisner@unibw.de

Thomas Mayer, ESG Elektroniksystem- und Logistik GmbH, Fürstenfeldbruck
(Germany), thomas3.mayer@esg.de

Heiderose Stein, Nadiia Leopold, Tobias Uhlig, Oliver Rose,
Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany),
heiderose.stein@unibw.de, tobias.uhlig@unibw.de,
nadiia.leopold@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: The intensity of current military combats far exceeds the ones of recent conflicts. Since medical resources are limited during battle, the available capacities must be used optimally. This requires distributing patients to available resources, such as medical facilities and transporters. Therefore, the effective planning and coordination of a complex, constantly changing logistics network is of utmost importance. Due to limited data, current planning is often based on expert assumptions. To evaluate current and future concepts, we propose constructive simulation to analyse the interplay of assumptions and planning decisions. For this purpose, we study the military rescue chain and review existing optimization approaches. A conceptual simulation model design is presented and an outlook of upcoming research is given.

1 Motivation

Der Angriff Russlands auf die Ukraine wird von der NATO als größte Bedrohung der alliierten Nationen bezeichnet (NATO 2022). Nachdem für etwa zwei Jahrzehnte der Afghanistaneinsatz im Fokus der NATO stand, stellt damit der konventionelle Krieg im Rahmen der Landes- und Bündnisverteidigung erneut die Grundlage für die strategische Ausrichtung des Verteidigungsbündnisses dar. Berichte aus der Ukraine zeigen, dass die Intensität der Gefechte dort jene aus Afghanistan deutlich übersteigt (U.S. Department of Defense 2023; Cooper et al. 2023). Gleichzeitig sind die verfügbaren medizinischen Behandlungsressourcen in derartigen Gefechten stark

begrenzt und die Dauer für eine Evakuierung von Verwundeten verhältnismäßig hoch (Neitzel und Ladehof 2015).

Für eine bestmögliche Behandlung verwundeter Soldaten müssen die verfügbaren medizinischen Einrichtungen effizient genutzt werden. Die Patienten müssen entsprechend ihrer Bedürfnisse und unter Berücksichtigung der verfügbaren Transportmittel auf die medizinischen Einrichtungen verteilt werden. Hierdurch entsteht ein komplexes Logistiknetz, welches durch die Dynamik des Gefechts zusätzlich ständigen Veränderungen unterliegt. Derzeitige sanitätsdienstliche Planungen beruhen auf einer Reihe von Annahmen, mithilfe derer Opferzahlen und auftretende Verwundungsmuster geschätzt werden. Auf Grundlage des hiervon abgeleiteten vermuteten Patientenflusses werden Pläne für die wahrscheinlichsten Szenarien erstellt (NATO Standardization Office 2019).

Demnach erfolgt derzeit eine statische Ausplanung für ein hochdynamisches Logistiksystem. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie diese Planung durch den Einsatz von Simulation unterstützt werden kann. Hierfür wird die militärische Rettungskette als zu untersuchendes System vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 3 die zu betrachtenden Fragestellungen beschrieben. Verwandte Arbeiten werden in Abschnitt 4 vorgestellt und die Notwendigkeit eines flexiblen Simulationsmodells herausgearbeitet. Das Konzept eines für diese Untersuchung geeigneten Modells wird in Abschnitt 5 präsentiert. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Militärische Rettungskette

In Krisen- und Kriegsgebieten kann selten auf ein bestehendes Gesundheitssystem zurückgegriffen werden. Deshalb muss vor Ort ein sanitätsdienstliches System aufgebaut werden, um die medizinische Versorgung gewährleisten zu können. Während militärischer Gefechte kommen vermehrt Verwundete mit akut lebensbedrohlichen Verletzungsmustern auf. Gleichzeitig finden diese Gefechte zunehmend in ausgedehnten Räumen statt, wodurch die Evakuierung Verwundeter verhältnismäßig lange dauert. Hierdurch ist die präklinische Versorgung von besonderer Relevanz für die Überlebenschance der Patienten (Neitzel und Ladehof 2015). Durch den Zusammenschluss verschiedener Behandlungsebenen zu einer Rettungskette soll der schnellstmögliche Abtransport Verwundeter unter Berücksichtigung der akutmedizinischen Versorgung gewährleistet werden (United States Department of the Army 2019). Diese Behandlungsebenen sowie deren Nutzung zur medizinischen Evakuierung werden im Folgenden erläutert.

Die Behandlungsebenen der sanitätsdienstlichen Rettungskette sind durch das NATO Standardization Office (2019) definiert. Anfallende Verwundete werden zunächst in einer Verwundetensammelstelle (Casualty Collection Point - CCP) gesammelt. Von hier aus werden diese entlang von vier aufeinanderfolgenden Behandlungsebenen, den sogenannten Rollen 1 bis 4, versorgt. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Jeder der vier Rollen sind medizinische Einrichtungen mit verschiedenen Ressourcen und Fähigkeiten zugeordnet. Diese basieren jeweils auf jenen der vorherigen Rolle und ergänzen diese. In der Rolle 1 findet beispielsweise eine Notfallversorgung statt, während in der Rolle 2 bereits erste notfallchirurgische Eingriffe durchgeführt werden können. Die Rolle 3 kann weitere Fachdisziplinen abbilden und bereits das Niveau einer Universitätsklinik aufweisen. In der Rolle 4 erfolgt die Weiterbehandlung und

Rehabilitation. Diese befindet sich normalerweise im Heimatland des Patienten (Neitzel und Ladehof 2015). Damit ist diese nicht Teil der Notfallbehandlung im Gefecht und wird deshalb im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Laut United States Department of the Army (2022) befindet sich der CCP ca. 1-3 Kilometer und die Rolle 1 ca. 5-7 Kilometer hinter der Gefechtslinie. Die Entfernung zur Rolle 2 hingegen beträgt bereits 20-25 Kilometer. Damit gewährleistet die Behandlung entlang der Rettungskette eine schnellstmögliche Akutbehandlung und bereitet damit Patienten für die Evakuierung in höhere Rollen vor. Die Rettungskette ist jedoch nicht linear und Rollen können übersprungen werden. Dies kann beispielsweise aufgrund des Bedarfs spezieller Behandlungsressourcen oder zur Entlastung früherer Rollen erfolgen. Auch kann die Ausstattung der Einrichtungen innerhalb einer Rolle variieren (NATO Standardization Office 2019).

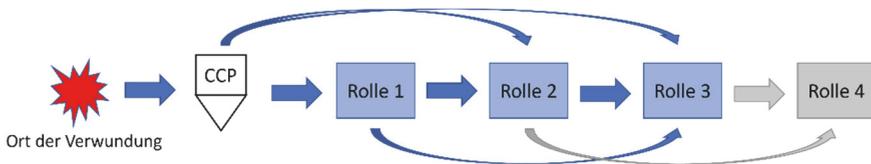


Abbildung 1: Verwundete werden zu einer Verwundetensammelstelle (CCP) verbracht und von dort aus entlang der Pfeile in den vier Rollen behandelt.

Ein fundamentaler Aspekt der Behandlung entlang der Rettungskette ist der Patiententransport. Dieser wird als medizinische Evakuierung (Medical Evacuation - MEDEVAC) bezeichnet. Dem MEDEVAC sind durch die NATO strikte Zeitlinien für den Transport von kritischen Verwundeten auferlegt (NATO Standardization Office 2019). Es muss gewährleistet werden, dass Verwundete binnen einer Stunde eine Notfallbehandlung in mindestens der Rolle 1 erhalten. Bis zur Behandlung in der Rolle 2 oder höher dürfen nicht mehr als zwei Stunden seit dem Zeitpunkt der Verwundung vergehen. Um dies gewährleisten zu können, werden verschiedene Konzepte zur effizienten Ausnutzung von Transportressourcen angewandt. Hierzu zählt beispielsweise das Zusammenlegen von Patienten aus zwei Transportern an einer Ambulanzwechselstelle (Ambulance Exchange Point - AXP) und der anschließende Weitertransport in einem Fahrzeug. An Bereithalteplätze für Patienten (Casualty Staging Unit - CSU) hingegen können Patienten nahe einem Flughafen gesammelt und anschließend zusammen luftgebunden evakuiert werden. In beiden Fällen kann eine höhere Auslastung und effizientere Nutzung der Transportressourcen erreicht werden, wie in Abbildung 2 dargestellt ist (NATO Standardization Office 2019; United States Department of the Army 2019).

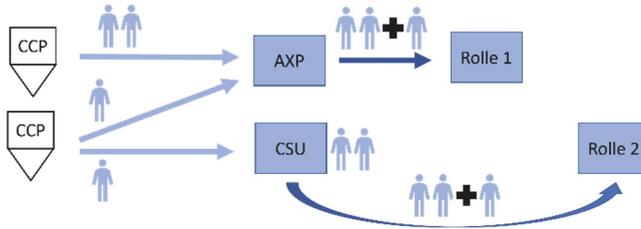


Abbildung 2: Ambulanzwechselstellen (AXP) und Bereithalteplätze für Patienten (CSU) ermöglichen eine effizientere Nutzung der Transportressourcen.

3 Problemstellungen

Für die Planung und Koordinierung des MEDEVACs werden durch Jenkins und Robbins (2022) zwei zu untersuchende Problemstellungen definiert: das *Verteilungsproblem* und das *Zuweisungsproblem*.

Unter dem Verteilungsproblem wird die Frage nach der Dislozierung der medizinischen Ressourcen verstanden. Hierunter fallen sowohl die Behandlungsebenen als auch die Transportressourcen. Neben der statischen Ausplanung muss ebenfalls die Reaktion auf unterschiedliche Effekte der Gefechtsdynamik geplant werden (Mayer und Mattiesen 2022). Auslöser hierfür können beispielsweise Schwerpunktbildungen oder Ressourcenausfälle sein, welche eine dynamische Verlegung oder Umverteilung von Ressourcen bewirken können.

Das Zuweisungsproblem betrachtet die Allokation der medizinischen Ressourcen. Für jeden Behandlungsbedarf von Patienten muss entschieden werden, ob und mit welchen Ressourcen diesem nachgegangen wird. Insbesondere durch die fehlende Linearität der Rettungskette spannt sich dabei ein komplexes Logistiknetz auf. Dabei gilt es, die Patienten unter der effizienten Nutzung der Transportressourcen bestmöglich auf die verschiedenen Behandlungsebenen zu verteilen.

Für die Untersuchung dieser Fragestellungen ist neben der statischen Ausplanung der Rettungskette eine Untersuchung dieser in dynamischen Szenarien essenziell. Erst hierdurch kann das Zusammenspiel der einzelnen sanitätsdienstlichen Ressourcen sowie deren Verhalten in unterschiedlichen Szenarien bewertet und optimiert werden. Um eine Ausplanung der Rettungskette entsprechend validieren zu können, muss diese hinsichtlich dieser beiden Fragestellungen in dynamischen Szenarien untersucht werden können. Hierfür sollten bevorzugt Simulationsmodelle eingesetzt werden, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

4 Verwandte Arbeiten

Den beiden genannten Problemstellungen wurde sich in der Vergangenheit mit unterschiedlichen Verfahren genähert. Green und Kolesar (2004) zeigen, dass sowohl Simulationen als auch Optimierungsverfahren bereits erfolgreich zur Verbesserung der notfallmedizinischen Reaktionsfähigkeit eingesetzt werden konnten. Im militärischen Kontext wurde in der Vergangenheit insbesondere die luftgebundene Patientenevakuierung betrachtet. Hierbei kamen Verfahren des Operations Research wie die mathematische und dynamische Programmierung sowie Markov Entscheidungsprobleme zum Einsatz (Frial 2022). Wie Jenkins et al. (2023) zeigen,

wurde dabei meist nur das Verteilungsproblem mit Blick auf die Transportressourcen betrachtet. Die Verlegung und Neuzuweisung von Ressourcen hingegen wurden selten untersucht. Auch wurde bereits gezeigt, dass Verfahren wie die mathematische Programmierung oftmals die Dynamik von medizinischen Systemen nicht voll umfassen können (Yue et al. 2012). Stattdessen wird die Nutzung von Simulationsmodellen empfohlen, um mit der hohen Komplexität und Unsicherheit von derartigen Systemen umzugehen und dynamische Effekte analysieren zu können (Pinto et al. 2015; Lechtenberg et al. 2017).

Es wurden bereits verschiedene Simulationen im Kontext der Rettungskette vorgestellt. Dabei wurde meist nur ein Teilaspekt des Systems untersucht. Frial (2022) untersucht beispielsweise die Ressourcenallokation für die Patientenevakuierung bis zu der ersten Behandlungsebene. Procházka et al. (2021) erweitern dies um die Betrachtung der anschließenden Behandlung, beschränken sich jedoch auf den CCP und die Rolle 1. Lediglich Kleint und Geck (2021) bilden die Rettungskette vom CCP bis zur Rolle 3 ab. In dieser Simulation wird das Gefechtsfeld in Zonen mit verschiedenen Ankunftsrate an Verwundeten unterteilt. Diese stellen zudem die verschiedenen Verantwortungsbereiche auf dem Gefechtsfeld dar, welche näher in United States Department of the Army (2022) beschrieben sind. Für jeden Verwundeten werden die für die Versorgung benötigten Ressourcen und eine Zeit festgelegt, in welcher die jeweilige Behandlung zu erfolgen hat (Kleint et al. 2021). Jeder medizinischen Einrichtung wird eine Menge von Einrichtungen der nächsthöheren Rolle in derselben oder übergeordneten Zone zugeordnet (Kleint et al. 2021). Hieraus ergibt sich eine Rettungskette, die einer festen Hierarchie folgt und damit kein Überspringen von Rollen ermöglicht. Durch die Anpassbarkeit des Patientenaufkommens und der Verwundungsmuster sowie der quantitativen und räumlichen Ressourcenverteilung soll die Ausplanung einer durchhaltefähigen Rettungskette ermöglicht werden. Damit wird die Untersuchung des Verteilungsproblems fokussiert.

Vorangegangene Arbeiten zeigen demnach, dass sich Simulationen zur Untersuchung der Rettungskette eignen. Gleichzeitig wurde jedoch noch kein Modell vorgestellt, das eine hinreichende Untersuchung und Optimierung hinsichtlich des Verteilungs- und Zuweisungsproblems ermöglicht. Diese Beobachtung wird durch Tippong et al. (2022) bestätigt. Die Autoren betonen den Forschungsbedarf im Bereich der Optimierung logistischer Netzwerke medizinischer Einrichtungen sowie der in Abschnitt 2 vorgestellten MEDEVAC-Konzepte.

5 Simulationskonzept

Damit künftig Planungen der Rettungskette mit Blick auf die genannten Fragestellungen untersucht werden können, wird im Folgenden das Konzept eines hierfür geeigneten Simulationsmodells vorgestellt. Dabei wird die Notfallversorgung im Einsatz entlang der Rettungskette vom CCP bis zur Rolle 3 unter Berücksichtigung der Gefechtsdynamik abgebildet.

Wie in Abschnitt 3 erörtert wurde, ist neben der statischen Ausplanung der Rettungskette die Untersuchung selbiger in dynamischen Szenarien nötig. Dazu muss das dynamische Verhalten der simulierten Objekte flexibel definierbar sein, um das Verteilungs- und das Zuweisungsproblem hinreichend untersuchen zu können. Dies bildet die Grundlage für die Validierung und Optimierung von Konzepten der

Rettungskette. Insbesondere für die Betrachtung der verschiedenen MEDEVAC-Konzepte muss eine große Bandbreite an Strategien der Ressourcenallokation abbildbar sein. Ebenfalls müssen die Szenarien selbst adaptierbar sein. Dies betrifft beispielsweise das Festlegen von sich ändernden Ankunftsdaten der Patienten, Truppenbewegungen oder Ausfälle von Ressourcen.

Um die geforderte Dynamik und Flexibilität zu erreichen, werden anzupassende Aspekte der Simulation als Teilmodelle von dem eigentlichen Modell entkoppelt. Dies ist in Abbildung 3 abgebildet. Das rot dargestellte Modell enthält die gelb visualisierten zu simulierenden Objekte und kann Zustandsänderungen an diesen vornehmen. Hierfür werden exemplarisch die *Patienten*, *Transporter* und medizinischen *Einrichtungen* genannt. Das Modell selbst wird anhand von Eingabedaten und Parameter konfiguriert. Hierdurch kann die initiale Ausplanung der Rettungskette erfolgen. Die geforderte Dynamik wird mithilfe der grün dargestellten Teilmodelle realisiert. Diese werden über die durch das Modell vorgenommenen Zustandsänderungen in Echtzeit informiert. Basierend auf den hinterlegten Regeln können diese Teilmodelle entsprechend reagieren und mittels Aktionen über das Modell Zustandsänderungen der Objekte veranlassen. Auch kann das Verhalten zu einem zuvor definierten Simulationszeitpunkt festgelegt werden. Dadurch kann sich beispielsweise die Ankunftsrate der Verwundeten ändern oder es können Ressourcen ausfallen. Damit kann die Gefechtsdynamik durch entsprechende Szenarien abgebildet werden.

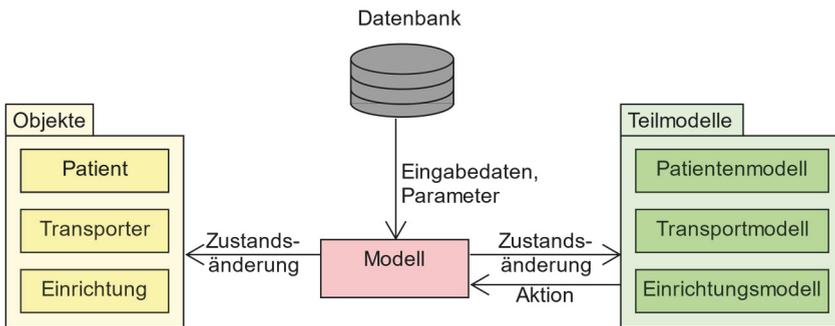


Abbildung 3: Das Modell (rot) bewirkt Zustandsänderungen der simulierten Objekte (gelb). Teilmodelle (grün) werden über Zustandsänderungen der Objekte informiert und können über Aktionen selbst welche veranlassen.

Das Modell überprüft die Anfragen der Teilmodelle auf Validität und simuliert die Zustandsänderung mit all ihren Effekten. Auf diese Weise kann das *Einrichtungsmodell* beispielsweise Einrichtungen aufgrund von Ressourcenausfällen verlegen lassen. Zusätzlich lässt sich über diese Teilmodelle die Ressourcenallokation durchführen. Auf diese Weise kann das *Transportmodell* auf eingehende MEDEVAC-Anfragen reagieren und die simulierten Transporter entsprechend steuern. Über das *Patientenmodell* lassen sich die Ankunftsdaten sowie Verwundungsmuster der auftretenden Patienten definieren.

Um der fehlenden Linearität der Rettungskette gerecht zu werden, wird auf die strenge Unterteilung in die drei Rollen verzichtet. Stattdessen werden

Behandlungseinrichtungen durch die verfügbaren Ressourcen und Fähigkeiten definiert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Jede Ressource wird dabei in einer festgelegten Quantität vorgehalten und kann Patienten zugewiesen werden, beispielsweise OP-Plätze und Pflegebetten. Fähigkeiten hingegen werden als Voraussetzung für bestimmte Behandlungsschritte angesehen, ohne dabei Patienten fest zugewiesen zu werden, wie beispielsweise medizinische Qualifikationen. Auch werden hierrunter Ressourcen zusammengefasst, deren Quantität nicht berücksichtigt wird, da die Modellierung zu feingranular wäre, wie zum Beispiel Röntgengeräte.

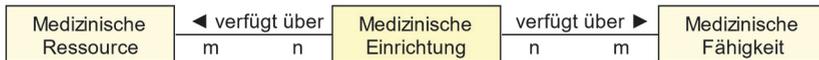


Abbildung 4: Medizinischen Einrichtungen werden über ihre Ressourcen und Fähigkeiten definiert.

Durch diese Definition der Behandlungseinrichtungen lässt sich ein Behandlungsplan für Patienten beschreiben. Wie in der Abbildung 5 visualisiert ist, wird für jeden Patienten ein Zustandsautomat hinterlegt.

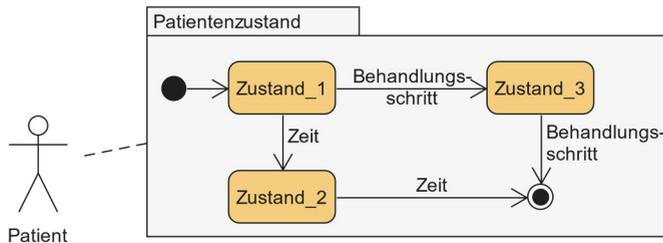


Abbildung 5: Der Patientenzustand wird über einen Zustandsautomaten realisiert. Jeder Zustand (orange) definiert den nächsten benötigten Behandlungsschritt. Zustandsübergänge können durch eine erfolgte Behandlung oder nach einer definierten Zeit erfolgen.

Ein Zustand spiegelt die aktuelle gesundheitliche Verfassung des Patienten wider. Ein Übergang in einen neuen Zustand erfolgt entweder nach einer bestimmten Zeit ohne Behandlung oder durch einen erfolgten Behandlungsschritt der Form:

$$\text{Behandlungsschritt} := [\text{Ressourcen}, \text{Fähigkeiten}, \text{Zeit}]$$

Damit wird ein Behandlungsschritt als Tripel bestehend aus den benötigten medizinischen Ressourcen, Fähigkeiten und der für die Behandlung nötige Zeit definiert. Dadurch wird implizit festgelegt, welche medizinischen Einrichtungen diesen Schritt ausführen können. Dennoch ist die Behandlung nicht an eine feste Rolle gebunden. Stattdessen kann eine Rolle übersprungen und die Behandlung in der nächsthöheren erfolgen, falls diese über die geforderten Ressourcen und Fähigkeiten verfügt. Eine ähnliche Beschreibung des Patientenzustands wurde bereits durch Van Utterbeeck et al. (2011) beschrieben. Der Zustandsautomat wird in dem vorgestellten Konzept ebenfalls durch das *Patientenmodell* beschrieben. Damit ist es, wie die anderen Teilmodelle auch, künftig beliebig austausch- und erweiterbar. Auf diese

Weise können unterschiedliche Verwundungsmuster mit den entsprechenden Behandlungsplänen beschrieben werden.

Ein Patient kann sich während der Behandlung entlang der Rettungskette in verschiedenen Aktivitäten befinden. Diese sind in Abbildung 6 grau dargestellt. Während der Aktivität *warten* werden jeweils die benötigten Behandlungs- oder Transportressourcen angefordert, wie durch die gelben Symbole visualisiert ist. Demnach wird zu diesem Zeitpunkt über die Ressourcenallokation entschieden und entsprechend das Zuweisungsproblem betrachtet. Das für die Entscheidung angewandte Konzept wird in den zuvor beschriebenen Teilmodellen *Transportmodell* und *Einrichtungmodell* implementiert. Sobald eine Ressource zugewiesen wurde und der Patient diese erhalten hat, wechselt dieser in die Aktivität *transportieren* oder *behandeln*. Nach Abschluss der Aktivität können erneut in *warten* Ressourcen angefordert oder in den Endzustand übergegangen werden. Der Endzustand kann entweder durch vollständiges Abarbeiten des Behandlungsplanes oder durch vorzeitiges Versterben des Patienten erreicht werden.

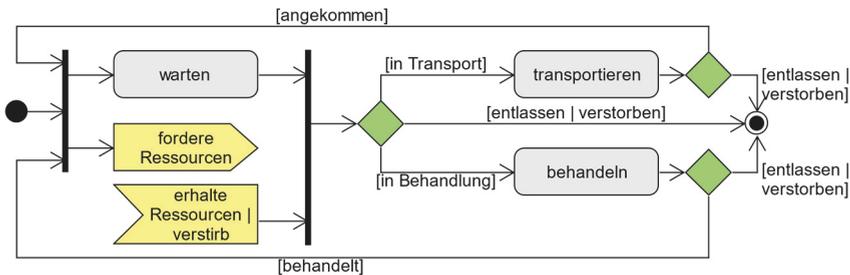


Abbildung 6: Ein Patient kann sich in verschiedenen Aktivitäten (grau) befinden und Transport- oder Behandlungsressourcen anfordern (gelb).

Durch den vorgestellten Ansatz können Ausplanungen der sanitätsdienstlichen Rettungskette validiert und optimiert werden. Mithilfe von Parametern und Eingabedaten lassen sich die sanitätsdienstlichen Ressourcen initial platzieren sowie deren Kapazitäten und Fähigkeiten festlegen. Die austauschbaren Teilmodelle erlauben das dynamische Reagieren auf Zustandsänderungen innerhalb der Simulation. Durch geeignete Kombination der bereitgestellten Aktionen soll auf diese Weise komplexes Objektverhalten durch die Teilmodelle definierbar sein, ohne dabei das Simulationsmodell selbst adaptieren zu müssen. Mithilfe des vorgestellten Patienten- und Einrichtungmodells kann die fehlende Linearität der Rettungskette geeignet abgebildet werden. Damit soll es künftig möglich sein, mit diesem Modell ein weites Spektrum an Analysen und Optimierungen der Rettungskette mit Blick auf das Verteilungs- und Zuweisungsproblems vornehmen zu können. Damit werden die in Abschnitt 3 definierten Anforderungen erfüllt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Simulation der Rettungskette vorgestellt. Hierfür wurden das Verteilungs- und Zuweisungsproblem als zu untersuchende Problemstellungen definiert. Es wurde gezeigt, dass hierfür neben der statischen

Ausplanung der Rettungskette das dynamische Verhalten der simulierten Objekte adaptierbar sein muss. Auch wurde betont, dass die fehlende Linearität der Rettungskette geeignet abzubilden ist. Die Nutzung von Simulationsmodellen wurde hierfür als geeignete Methode herausgearbeitet. Es wurde jedoch deutlich, dass bestehende Modelle keine geeignete Untersuchung der Rettungskette hinsichtlich der definierten Problemstellung erlauben.

Die statische Ausplanung der Rettungskette in dem vorgestellten Simulationskonzept erfolgt durch Eingabedaten und Parameter. Das dynamische Verhalten der Objekte hingegen wird durch Teilmodelle realisiert. Diese lassen sich flexibel adaptieren und austauschen. Durch die Definition der Behandlungseinrichtungen mittels der medizinischen Ressourcen und Fähigkeiten lässt sich das Überspringen von Rollen innerhalb der Rettungskette geeignet modellieren. Damit lässt sich die Rettungskette mit ihrer fehlenden Linearität geeignet abbilden.

Durch seine Adaptierbarkeit bildet das vorgestellte Simulationskonzept die Grundlage für die künftige Validierung und Optimierung von Ausplanungen der sanitätsdienstlichen Rettungskette. Dieses Konzept sollte in einem nächsten Schritt prototypisch implementiert werden, um die Realisierbarkeit zu demonstrieren. Dabei sollte insbesondere getestet werden, wie die Kommunikation zwischen dem Modell und den Teilmodellen geeignet umgesetzt werden kann. Auch sollte definiert werden, über welche Zustandsänderungen die Teilmodelle jeweils informiert werden und welche Aktionen durch das Modell bereitgestellt werden.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit ist Teil des Projektes „LogSimSanDstBw – Simulationsbasierte Logistikanalysen“ und wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

Literatur

- Cooper, H.; Schmitt, E.; Gibbons-Neff, T.: Soaring Death Toll Gives Grim Insight Into Russian Tactics. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/02/02/us/politics/ukraine-russia-casualties.html>, letzter Zugriff 04.02.2023.
- Frial, V.B.: Evaluating the Military Medical Evacuation Dispatching and Delivery Problem via Simulation and Self-Exciting Hawkes Process, Masterarbeit Air Force Institute of Technology, Department of Operational Science, 2022.
- Green, L.V.; Kolesar, P.J.: Improving Emergency Responsiveness with Management Science. *Management Science* 50 (2004) 8, S. 1001–1014.
- Jenkins, P.R.; Robbins, M.J.: Military and Security Applications: Medical Evacuation. In: Floudas, C.A.; Pardalos, P.M. (Hrsg.): *Encyclopedia of Optimization*. Cham: Springer 2022.
- Jenkins, P.R.; Robbins, M.J.; Lunday, B.J.: Optimising aerial military medical evacuation dispatching decisions via operations research techniques. *BMJ Military Health* 169 (2023) 1, 90-92.
- Kleint, R.; Geck, A.: Simulation-Based Decision Support for the Logistic System of the German Armed Forces. In: *Towards Training and Decision Support for*

- Complex Multi-Domain Operations, Amsterdam (Niederlande) 21.-22. Oktober 2021.
- Kleint, R.; Mayer, T.; Uhlig, T.: Logistic Simulation to Support Military Rescue Chains. In: I/ITSEC 2021, Orlando (USA), 29. November-03. Dezember 2021.
- Lechtenberg, S.; Widera, A.; Hellingrath, B.: Research directions on decision support in disaster relief logistics. In: Middelhoff, M.; Yahiaoui, S. (Hrsg.): 2017 4th International Conference in Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), Münster (Deutschland), 11.-13. Dezember 2017.
- Mayer, D.; Mattiesen, B., 2022: Forschung und Fähigkeitsentwicklung im -Sanitätsdienst der Bundeswehr. <https://wehrmed.de/fuehrungsorganisation/forschung-faehigkeitsentwicklung-im-sanitaetsdienst-der-bundeswehr.html>, letzter Zugriff 23.04.2023.
- NATO, 2022: NATO - Topic: Strategic Concepts. https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_56626.htm, zuletzt aktualisiert am 18.07.2022, letzter Zugriff 30.04.2023.
- NATO Standardization Office, 2019: AJP-4.10: Allied Joint Doctrine For Medical Support. https://www.coemed.org/files/stanags/01_AJP/AJP-4.10_EDC_V1_E_2228.pdf, letzter Zugriff 30.04.2023.
- Neitzel, C.; Ladehof, K. (Hrsg.): Taktische Medizin: Notfallmedizin und Einsatzmedizin. Berlin, Heidelberg: Springer 2015.
- Pinto, L.R.; Silva, P.M.S.; Young, T.: A generic method to develop simulation models for ambulance systems. *Simulation Modelling Practice and Theory* 51 (2015), S. 170–183.
- Procházka, D.; Hodický, J.; Krejčík, M.; Tesař, A.: Modelling and Simulation Support to Medical Treatment Chain in Role 1. In: Mazal, J.; Fagiolini, A.; Vasik, P.; Turi, M.; Bruzzone, A.; Pickl, S.; Neumann, V.; Stodola, P. (Hrsg.): Modelling and Simulation for Autonomous Systems, virtuell, 13.-14. Oktober 2021, S. 464–477.
- Tippong, D.; Petrovic, S.; Akbari, V.: A review of applications of operational research in healthcare coordination in disaster management. *European Journal of Operational Research* 301 (2022) 1.
- U.S. Department of Defense, 2023: Casualty Status. <https://www.defense.gov/casualty.pdf>, letzter Zugriff 06.07.2023.
- United States Department of the Army, 2019: ATP 4-02.2: Medical Evacuation. https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/pdf/web/ARN17834_ATP%204-02x2%20FINAL%20WEB.pdf, letzter Zugriff 30.04.2023.
- United States Department of the Army, 2022: ATP 4-02.6: The Medical Company (Role 2). https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/ARN36760-ATP_4-02.6-000-WEB-1.pdf, letzter Zugriff 24.04.2023.
- Van Utterbeeck, F.; Ullrich, C.; Dhondt, E.; Debacker, M.; Murray, J.L.; Van Campen, S.: Generating and managing realistic victims for medical disaster simulations. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, P.K.; Fu, M.C. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Conference (WSC), Phoenix (USA), 11.-14. Dezember 2011, S. 2674–2684.
- Yue, Y.; Marla, L.; Krishnan, R.: An Efficient Simulation-Based Approach to Ambulance Fleet Allocation and Dynamic Redeployment. In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Kalifornien (USA), 22.-26 Juli 2012, S. 398–405.