

Einfluss von Störungen auf den Umgang mit Deadlocks in einem fahrerlosen Transportsystem

Influence of disruptions on deadlock handling in an automated guided vehicle system

Marcel Müller, Jan Hendrik Ulrich, Tobias Reggelin, Hartmut Zadek,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany),
marcell.mueller@ovgu.de, jan.ulrich@st.ovgu.de, tobias.reggelin@ovgu.de,
hartmut.zadek@ovgu.de

Lorena Silvana Reyes Rubiano, University of La Sabana, Chía (Colombia),
lorena.reyes1@unisabana.edu.co

Abstract: Deadlock handling is an important task when planning automated guided vehicle systems. The selection of the right strategy approach has a major impact on logistical figures. This paper presents the results of a simulation model for a comparison of the three typical deadlock handling strategies prevention, avoidance, and detection & resolution for a transport system with disruptions in a warehouse, while varying the amount of AGVs. We investigated different disruption profiles with the variation of the mean time to repair (MTTR) and availability of the resources. The avoidance strategy receives the best results for different profiles of disruptions. Detection & resolution provides good results for non-frequent, small disruptions. The prevention strategy easily solves the deadlock problem but has the worst performance in terms of system throughput, average waiting time per transport order and average distance travelled per transport order.

1 Motivation und Problemstellung

Die Industrie 4.0 stellt als Kerndiskussionsthema in Produktion und Logistik Unternehmen vor ganz pragmatische Herausforderungen der Digitalisierung und Automatisierung. Für deutsche Unternehmen hat deshalb auch die Relevanz von konkreten Technologien wie Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und Robotik in den letzten Jahren stark zugenommen (Kohl; Pfretzschner, 2018). Die Zunahme von automatisierten Systemen in Produktion und Logistik und das immer häufigere Ineinandergreifen von verschiedenen automatisierten Systemen in Unternehmen führen zu immer größeren Herausforderungen, bei der Beantwortung der Frage, wie mit Kollisionen und Deadlocks (zu Deutsch: Systemverklämmungen) in diesen komplexen Systemen am besten umgegangen werden kann. Besonders der Umgang

mit Deadlocks wird in der Logistikplanung nicht ausreichend berücksichtigt. Dabei kann das Auftreten eines Deadlocks zu einem kompletten Systemstillstand führen und der richtige Strategieansatz entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Systems sein. Bei den Strategieansätzen wird grundsätzlich zwischen Prävention (engl.: „prevention“), Vermeidung (engl.: „avoidance“) und Erkennen und Auflösen (engl.: „detection & resolution“) unterschieden (Coffman et al., 1971). In der Literatur wird sich zum Umgang von Deadlocks ohne größere Untersuchungen für einen dieser drei Strategieansätze entschieden. In eigenen simulativen Experimenten konnte jedoch gezeigt werden, dass bereits kleinere Parameteränderungen zur Änderung des optimalen Strategieansatzes führen (Müller et al., 2020). Ein wichtiger Aspekt, der in diesen Experimenten jedoch noch nicht betrachtet wurde, ist das Auftreten von Störungen. Aus Gesprächen mit Experten aus der Industrie wurde festgestellt, dass im Betrieb von fahrerlosen Transportsystemen regelmäßig Störungen und ungeplante Haltemanöver auftreten. Welche Auswirkungen Störungen auf den optimalen Deadlock-Strategieansatz haben, ist bisher, auch in der Literatur, nicht bekannt und soll deshalb in dieser Veröffentlichung simulativ aufgezeigt werden. Durch die Berücksichtigung stochastischer Einflussgrößen und die Durchführung zahlreicher Zufallsexperimente kann eine möglichst induktive Antwort auf diese Fragestellung gefunden werden.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Dieser Beitrag erweitert die Erkenntnisse von Müller et al. (2020) um Untersuchungen zum Einfluss von Störgrößen auf die Deadlock-Strategieansätze. Weitere eigene Vorarbeiten zum Thema Deadlocks umfassen einen Erkennen-&-Auflösen-Strategieansatz für ein schienenbasiertes Regalbediensystem (Müller et al., 2019). Grundsätzlich bedarf es bei dieser Untersuchung keiner großen Abgrenzung zur wissenschaftlichen Literatur, denn diese berücksichtigt Deadlocks in der Logistikplanung quasi nicht. In der Logistikplanung von Prozessen und Systemen spielen Deadlocks, wenn überhaupt, erst spät in der operativen Detailplanung von Steuerungsstrategien eine Rolle. Für einen Deadlock-Präventionsansatz ist es da meist zu spät. Grundsätzlich scheinen die klassischen Vorgehensweisen zur Planung in der Logistik, wie

- die prozesskettenbasierte Planung nach Kuhn und Bernemann (1995),
- die VDI-Richtlinie zur Systemfindung von Kommissioniersystemen (VDI-Richtlinie 3590),
- die Phasen der Planung und Realisierung von Logistiksystemen nach Gudehus (2011),
- und die vierstufige Vorgehensweise zur Planung von Transportsystemen nach van Bonn (2013),

Deadlocks nicht bei der Dimensionierung von Ressourcen oder der Infrastrukturplanung zu berücksichtigen. So erläutert beispielsweise Gudehus (2011, S. 869 ff.) detailliert wie die Ziele „Transportoptimierung“ und „Flächenminimierung“ bei der Auslegung von Logistikhallen mittels Toranordnung und weiteren Maßnahmen erreicht werden. Doch weder bei der Auslegung der Logistikhalle noch bei der Planung und Dimensionierung des Transportsystems geht Gudehus auf mögliche Deadlocksituationen ein, die bei einer vermeintlich günstigen

Auslegung auftreten könnten. Bei den anderen genannten Quellen wird die Problematik von Deadlocks ebenfalls in keiner Weise erwähnt und es kann nur gemutmaßt werden, welche Auswirkungen eine identifizierte Deadlocksituation auf die entsprechende Vorgehensweise hätte.

Im Bereich der Fabrikplanung, woran sich die Vorgehensweisen in der Logistikplanung häufig orientieren (Schenk et al., 2014; Tempelmeier, H. 2018), wird ebenfalls nicht klar, ob Deadlocks methodisch berücksichtigt werden. Im Vorgehen nach der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (VDI-Richtlinie 5200) könnte der Ansatz Deadlock-Prävention sowohl in der Phase 3 – Konzeptplanung bei der Dimensionierung der Betriebsmittel als auch anschließend Phase 4 – Detailplanung durchgeführt werden. Bei letzterem kommt es im Subprozess der Feinplanung zur „Planung der Materialflüsse, der Informationsflüsse und der Kommunikationsflüsse in Form von Prozessdarstellungen und Prozessbeschreibungen“ (VDI-Richtlinie 5200). Dabei erfolge auch „die Zuordnung von Produkten und Ressourcen zu den Prozessen, die Abfolge der Prozessschritte, deren organisatorische Eingliederung sowie die jeweils eingesetzten Arbeitshilfsmittel“ (VDI-Richtlinie 5200). Ob bei den Prozessdarstellungen oder der Zuordnung der Ressourcen Deadlocksituationen ersichtlich werden und wie der Konzept- oder Detailplan dann gegebenenfalls nochmal angepasst werden muss, berücksichtigt die VDI-Richtlinie nicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es in der Literatur zwar Vorgehensweisen für die Logistikplanung gibt, wo sich eine Betrachtung und Analyse von möglichen Deadlocksituationen einordnen ließe, aber bisher keine Methodik für eine solche Betrachtung im Detail erläutert wird.

Dies führt dazu, dass Deadlocks häufig im Vorfeld der Planung nicht erkannt werden, sondern erst beim Testen der Steuerungs- und Entscheidungsregeln. Dies geschieht beispielsweise in einem Simulationsmodell, welches nach zahlreichen Simulationsdurchläufen selbst unwahrscheinliche Konstellationen im System, die zu einem Deadlock führen, hervorbringt.

Der Umgang in der Logistik mit den auftretenden Deadlock-Problematiken erfolgt dann häufig mit zusätzlichen problemspezifischen Steuerungsregeln (Mayer und Furmans, 2010) oder aber mit präventiven, deterministischen Maßnahmen durch Vorausplanung und Reservierung von Ressourcen (Kim et al., 2006; Lienert und Fottner, 2017), sofern die Informationslage dafür ausreichend ist. Beide Ansätze benötigen einen zentralen Steuerungsansatz und skalieren schlecht mit größer dimensionierten Systemen.

Dezentrale Steuerungsansätze in der Logistik, die eine solche Skalierbarkeit versprechen, setzten bisher ebenfalls auf problemspezifische Vermeidungsregeln durch Optimierungsalgorithmen für Deadlocks (Schönung et al., 2011; Seibold, 2016) und auf agentenbasierte Herangehensweisen (Forget et al., 2009; Mors, 2010; Yalcin, 2017; Lu et al., 2019).

Generell wird sich bei den problemspezifischen Lösungen bereits auf einen Strategieansatz festgelegt, so dass ein Vergleich zwischen den Strategien und unter Berücksichtigung von Störungen noch nicht durchgeführt wurde.

3 Vorgehensweise und Anwendbarkeit

Zur Untersuchung des Einflusses von Störungen auf den Umgang mit Deadlocks in fahrerlosen Transportsystemen wird auf ein bestehendes Simulationsmodell in der Simulationssoftware „Tecnomatix Plant Simulation“ aufgebaut (Müller et al., 2020). Es wurden Störungsprofile implementiert und Regeln für den Umgang bei Störungen definiert. Im Simulationsmodell wird ein flurgebundenes, fahrerloses Transportsystem in einem gassenbasierten Lager betrachtet. Zur Untersuchung von Störungen werden verschiedene Störungsprofile an unterschiedlichen Stellen im Simulationsmodell implementiert. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Eingangs-, Stell- und Ergebnisgrößen. Neben der Variation verschiedener Stellgrößen bezüglich Störungen, wurde auch untersucht, ob mit zunehmenden Verkehrsaufkommen Änderungen beim optimalen Strategieansatz auftauchen oder ob die Störungen einen so signifikanten Einfluss auf die Strategieauswahl haben können, so dass der bisherige Faktor der FTF-Anzahl in den Hintergrund rückt.

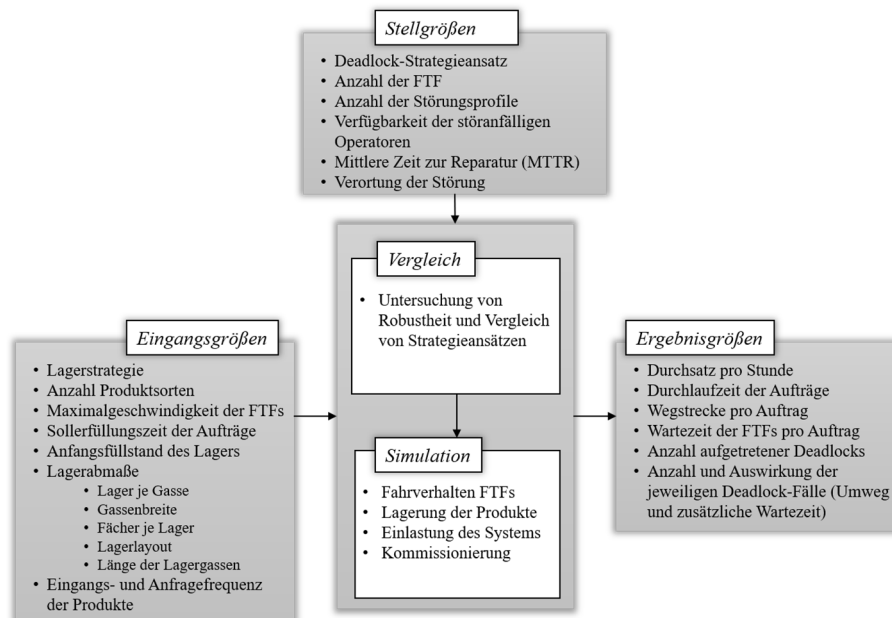


Abbildung 1: Übersicht der verwendeten Eingangs-, Stell- und Ergebnisgrößen, Darstellung in Anlehnung an März et al., 2011

Die Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen sind auch für die Industrie anwendbar, sofern in der Intralogistik ein fahrerloses Transportsystem verwendet wird. Durch die Variation der Störungsprofile soll eine Vergleichbarkeit mit realitätsnahen Anwendungsszenarien hergestellt werden können, so dass deutlich wird, bei welchen Störungen und Zielgrößen ein bestimmter Deadlock-Strategieansatz verfolgt werden kann.

Das Simulationsmodell kann mehrere Layouts abbilden (Müller et al., 2020). Für die Untersuchungen in diesem Artikel wurde jedoch nur das Layout 3 genutzt, da dort alle

drei Deadlock-Strategieansätze angewandt werden konnten. Die Präventionsstrategie wird durch unidirektionale Schleifen ermöglicht. Abbildung 2: zeigt die identifizierten Deadlock-Situationen für den Strategieansatz „Erkennen und Auflösen“.

	Deadlock-Situation:	Lösungsprinzip:
Fall 1: (Layout 1 & 3)		
Fall 2: (Layout 1 & 3)		
Fall 3: (Layout 3 & 4)		
Fall 4: (Layout 3)		

Abbildung 2: Mögliche Deadlock-Situationen und Lösungsansätze bei Erkennen und Auflösen als Strategieansatz (Müller et al., 2020)

4 Experimente und Ergebnisse

Je Experiment wurden zehn Simulationsdurchläufe durchgeführt. Der Simulationszeitraum beträgt acht Stunden. Tabelle 1 zeigt die konkrete Festlegung der Stellgrößen für die Experimentreihe. Im Summe ergeben sich aus dem Experimentplan 162 Experimente und folglich 1.620 Simulationsdurchläufe. Die Störungen wurden nur in den Fahrzeugen verortet. Eine Störung eines Fahrzeugs kam auch einer Blockierung/Störung des Weges gleich, so dass eine Betrachtung der unterschiedlichen Verortung der Störungen nicht weiter berücksichtigt wurde.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Stellgrößen

Stellgröße	Wertebereich	Anzahl Experimente
Anzahl der FTF	5 - 10	6
Deadlock-Strategieansatz	Prävention (P), Erkennen und Auflösen (EA), Vermeidung (V)	3
Verfügbarkeit	91, 95, 99 [%]	3
MTTR	5, 30, 120 [min]	3

Durch die Kombination der Stellgrößen Verfügbarkeit und MTTR ergeben sich Störungsprofile mit beispielsweise wenigen, kurzen Störungen (Verfügbarkeit: 99 %, MTTR: 5 min) oder vielen, langen Störungen (Verfügbarkeit: 91 %, MTTR: 120 min).

Grundsätzlich bestätigt sich bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse wieder die bereits bekannte Schlussfolgerung, dass der Durchsatz bei einem Präventionsansatz (P) deutlich geringer ausfällt (Müller et al., 2020). Abbildung 3 zeigt dies anhand eines Oberflächendiagramms. Zwar erhöht sich mit zunehmender FTF-Anzahl der Durchsatz, doch die Strategieansätze Erkennen & Auflösen (EA) und Vermeidung (V) erreichen den maximalen Durchsatz von 120 Stück pro Stunde schon bei sieben FTF, während ein Präventionsansatz selbst bei zehn FTF diesen Wert noch nicht erreicht. Bei diesem Störungsprofil treten zwischen Erkennen & Auflösen und einer Vermeidungsstrategie keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Durchsatzes auf.

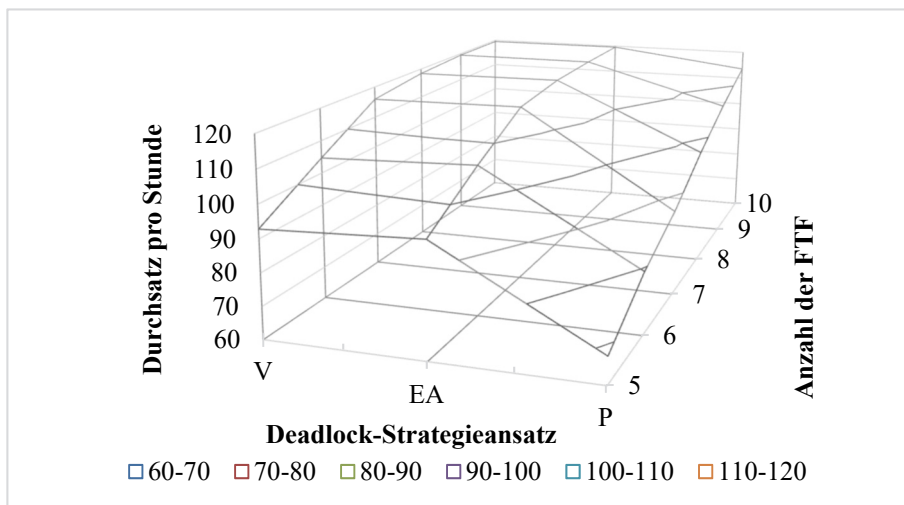


Abbildung 3: Oberflächendiagramm des Durchsatzes pro Stunde bei hoher Verfügbarkeit und geringer MTTR (Durchschnitt der 10 Simulationdurchläufe)

Treten die Störungen jedoch häufiger auf (geringere Verfügbarkeit), setzt sich ein Vermeidungsansatz gegenüber Erkennen & Auflösen durch. Während bei kurzen Störungen diese Dominanz nur bei einer mittleren Fahrzeuganzahl von sieben bis acht

FTF gegeben ist, zeigt sich bei schwereren Störungen ein noch deutlicheres Bild: Der Vermeidungsansatz kann hinsichtlich des Durchsatzes durchweg bessere Ergebnisse erzielen. In Abbildung 4 wird dies durch die konsequente Schräge der Oberfläche im Diagramm deutlich.

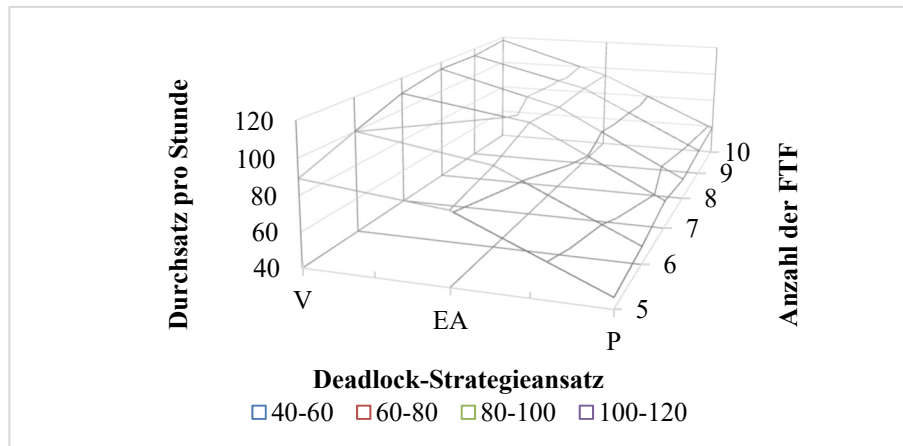


Abbildung 4: Oberflächendiagramm des Durchsatzes pro Stunde bei geringer Verfügbarkeit und hoher MTTR (Durchschnitt der 10 Simulationdurchläufe)

Bei wenigen, langen Störungen erzielen Erkennen & Auflösen und der Vermeidungsansatz jedoch wieder nahezu identische Durchsätze (eine Präventionsstrategie schneidet deutlich schlechter ab). In der durchgeführten Experimentreihe hat die Veränderung der Verfügbarkeit einen höheren Einfluss auf den Durchsatz als die Veränderung der MTTR. Dies hängt mit den gewählten Werten für die Stellgrößen zusammen und kann nicht verallgemeinert werden.

Hinsichtlich der Wegstrecke ergibt sich für die Strategieansätze ein ähnliches Bild. Die durchschnittliche Wegstrecke pro Transport ist bei einem Präventionsansatz für alle Störungsprofile länger. Zwischen Erkennen & Auflösen und Vermeidung liegen bei allen Störungsprofilen und variierter Fahrzeuganzahl keine signifikanten Unterschiede vor. Der wesentliche Einflussfaktor auf die durchschnittliche Wegstrecke pro Transportauftrag ist die Fahrzeuganzahl, nicht die Beschaffenheit der Störungen.

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Wartezeit pro Transportauftrag spielt das Störungsprofil dagegen eine wesentliche Rolle. Bei wenigen, kurzen Störungen weist Erkennen & Auflösen die kürzesten Wartezeiten auf, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. Der Vermeidungsansatz erzeugt dagegen ab einer FTF-Anzahl von sechs die längste durchschnittliche Wartezeit pro Transportauftrag.

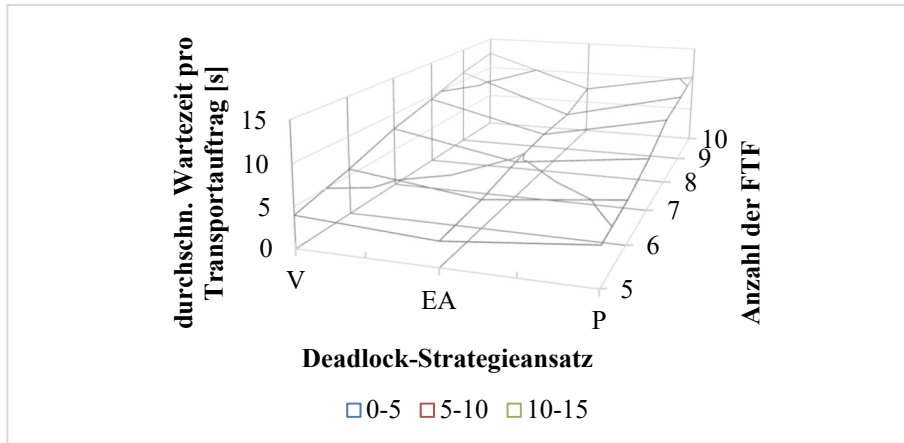


Abbildung 5: Oberflächendiagramm der durchschnittlichen Wartezeit pro Transportauftrag bei hoher Verfügbarkeit und geringer MTTR (Durchschnitt der 10 Simulationdurchläufe)

Nehmen die Störungen jedoch in Häufigkeit und Stärke zu, profitiert am meisten der Vermeidungsansatz. Erkennen & Auflösen und der Präventionsansatz erhöhen ihre mittlere Wartezeit stärker. Beim Präventionsansatz und hoher Fahrzeuganzahl entsteht ein erheblicher Anstieg. Abbildung 6 macht diesen Zusammenhang deutlich.

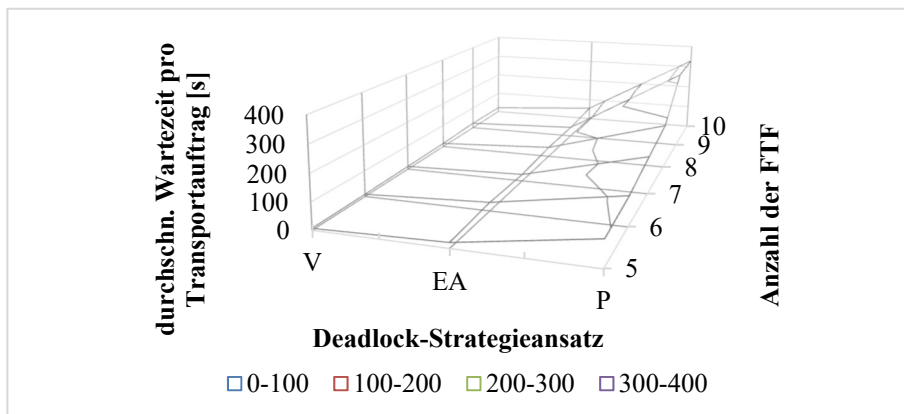


Abbildung 6: Oberflächendiagramm der durchschnittlichen Wartezeit pro Transportauftrag bei geringer Verfügbarkeit und hoher MTTR (Durchschnitt der 10 Simulationdurchläufe)

Der wesentliche Einflussfaktor auf die Wartezeit ist die Verfügbarkeit, nicht die MTTR. Das heißt in anderen Worten, dass die Häufigkeit der Störungen entscheidend ist für die Entstehung von Wartezeiten bei den Fahrzeugen.

Lässt man Deadlocks zu, indem ein Erkennen-und-Auflösen-Ansatz gewählt wird, ist der häufigste Deadlock-Fall 3. Dessen Anteil sinkt jedoch mit höherer Verfügbarkeit.

Die Gesamtanzahl der Deadlocks steigt sowohl mit der Anzahl der Fahrzeuge als auch mit einer höheren Verfügbarkeit. Die MTTR hat nur bei höherer Fahrzeuganzahl einen sichtbaren Einfluss auf die Anzahl der Deadlocks.

5 Fazit

Störungen können einen wesentlichen Einfluss auf logistische Kennzahlen haben, die entscheidend sind, um den optimalen Strategieansatz zum Umgang mit Deadlocks zu wählen. Grundsätzlich ließ sich erneut zeigen, dass mit einem Präventionsansatz die Deadlock-Problematik leicht umgangen werden kann, aber auch bei störanfälligen Systemen geht dies deutlich zu Lasten der Performance (Durchsatz, durchschnittliche Wege und Zeit pro Transportauftrag). Bei einem geringen Störaufkommen kann zwischen einem Ansatz der Vermeidung und Erkennen & Auflösen keine dominante Strategie festgestellt werden. Handelt es sich jedoch um ein sehr störanfälliges System (Verfügbarkeit $\leq 95\%$), zeigt die Experimentreihe, dass der Vermeidungsansatz sich hinsichtlich der betrachteten Kennzahlen am besten durchsetzt.

Dennoch ist diese Induktion kritisch zu betrachten. Zum einen liegt bei der Umsetzung der Strategien, gerade bei Vermeidung sowie Erkennen und Auflösen, eine spezifische technische Implementierung zugrunde, die in Detailfragen unterschiedlich umgesetzt werden kann und dadurch auch zu anderen Ergebnissen führen könnte. Zum anderen wurden die Störungen nur an einer Layout-Variante untersucht, die alle drei Deadlock-Strategieansätze erlaubt. Eine andere Systemstruktur könnte hierbei ebenfalls andere Ergebnisse liefern. Weitere Experimente, insbesondere mit anderen Simulationsmodellen für abgewandelte Anwendungsfälle in deadlockfähigen und störungsanfälligen Systemen, könnten die Aussagekraft und die Verallgemeinerung der Erkenntnisse dieser Publikation erhöhen.

Literaturverzeichnis

- Coffman, E.G.; Elphick, M.; Shoshani, A.: System Deadlocks. ACM Computing Surveys 3 (1971) 2, S. 67–78.
- Forget, P.; D'Amours, S.; Frayret, J.-M.; Gaudreault, J.: Study of the performance of multi-behaviour agents for supply chain planning. Computers in Industry 60 (2009) 9, S. 698–708.
- Gudehus, T.: Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- Kim, K.H.; Jeon, S.M.; Ryu, K.R.: Deadlock prevention for automated guided vehicles in automated container terminals. OR Spectrum 28 (2006) 4, S. 659–679.
- Kohl, A.-K.; Pfrezschner, F.: Logistikmonitor 2018: Ergebnisse einer Expertenbefragung von Statista und der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., 2018, zuletzt geprüft am 23.10.2019.
- Kuhn, A.; Bernemann, S. (Hrsg.): Prozessketten in der Logistik: Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Dortmund: Verl. Praxiswissen 1995.
- Lienert, T.; Fottner, J.: No More Deadlocks – Applying The Time Window Routing Method To Shuttle Systems. In: Paprika, Z.Zoltay; Horák, P.; Váradi, K.;

- Zwierczyk, P. Tamás; Vidovics-Dancs, Á.; Rádics, J. Péter (Hrsg.): ECMS 2017 Proceedings edited by Zita Zoltay Paprika, Péter Horák, Kata Váradi, Péter Tamás Zwierczyk, Ágnes Vidovics-Dancs, János Péter Rádics, May 23 - May 26, 2017, 2017, S. 169–175.
- Lu, Z.; Zhuang, Z.; Huang, Z.; Qin, W.: A Framework of Multi-Agent Based Intelligent Production Logistics System. *Procedia CIRP* 83 (2019), S. 557–562.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011.
- Mayer, S.; Furmans, K.: Deadlock prevention in a completely decentralized controlled materials flow systems. *Logistics Research* 2 (2010) 3-4, S. 147–158.
- Mors, A.W.: *The world according to MARP: Multi-Agent Route Planning*. Delft: Technische Universiteit Delft 2010.
- Müller, M.; Schmidt, S.; Reggelin, T.: Deadlock and Collision Handling for Automated Rail-Based Storage and Retrieval Units. In: Mustafee, N.; Bae, K.-H.G.; Lazarova-Molnar, S.; Rabe, M.; Szabo, C.; Haas, P.; Son, Y.-J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference, National Harbor, MD, USA, 08.12.2019 - 11.12.2019*, 2019, S. 1591–1601.
- Müller, M.; Ulrich, J.H.; Reyes-Rubiano, L.S.; Reggelin, T.; Lang, S.: Comparison of Deadlock Handling Strategies for different Warehouse Layouts with an AGVS. In: Bae, K.-H.G.; Feng, B.; Kim, S.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference, 14.12.2020 - 18.12.2020*, 2020, S. 1300–1311.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.
- Schönung, F.; Mayer, S.; Berbig, D.: Dezentrale, deadlockfreie Steuerung eines Stetigförderers. *at - Automatisierungstechnik* 59 (2011) 4, S. 73.
- Seibold, Z.: *Logical time for decentralized control of material handling systems*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2016.
- Tempelmeier, H. (Hg.): *Planung logistischer Systeme*. Berlin: Springer Vieweg 2018.
- van Bonn, B.: *Basisdaten der Logistikplanung*. In: Clausen, U.; Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 291–298.
- VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik VDI-Richtlinie 3590: *Kommissioniersysteme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) VDI-Richtlinie 5200: *Fabrikplanung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- Yalcin, A.: *Multi-Agent Route Planning in Grid-Based Storage Systems*. Frankfurt (Oder), Europa-Universität Viadrina Frankfurt (Oder), Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2017.