

Erarbeitung einer Prozesssteuerungsstrategie für zwei Transportmittel mit gemeinsamen Aktionsbereich am Beispiel eines Prozesskransystems zur Kommissionierung von Schüttgut

***Development of a control strategy for two transport vehicles in a
shared space for a process crane system for handling of bulk material***

Vincent Betker, Michael Völker, Thorsten Schmidt,
TU Dresden, Dresden (Germany), vincent.betker@tu-dresden.de

Abstract: This paper gives an account of the application of the discrete-event simulation method in the planning process of twin process cranes intended for handling of bulk material. We detail the lack of research in real-world crane scheduling under uncertainty needed for our use case and propose a testing framework for twin crane systems by enhancing an existing crane model with the implementation of collision avoidance routines. We then use the model for evaluating the performance of different dispatching rules in our use case. We identify a set of rules that lead to a cycle time reduction of 16.2% compared to the zoning method commonly used for job allocation in these contexts.

1 Einführung

Eine Möglichkeit zur Steigerung des Durchsatzes von Transportsystemen ist die Erhöhung der Anzahl der Transportmittel. In Systemen mit großen Überschneidungen des Aktionsraumes der Transportmittel ist die dadurch erzielbare Durchsatzerhöhung jedoch schwer zu ermitteln. Beispiele für solche Systeme sind Krane mit gemeinsamer Kranbahn oder Hochregalgassen mit mehreren Regalbediengeräten. Analytische Methoden verlieren in diesen Fällen schnell an Aussagekraft, da die Wartezeiten vom Systemzustand abhängig sind. Erwartungswerte für die Durchsatzerhöhung durch Hinzunahme eines zweiten Transportmittels existieren, sind jedoch abhängig von den räumlichen Gegebenheiten und den anfallenden Transportaufträgen und damit nur von beschränkter Aussagekraft für abweichende Anwendungsfälle (Schulze und Könze 2008). Abhilfe kann hier die ereignisdiskrete Simulation schaffen. In einer Praxisanwendung wurde die Software *AutoMod* (Version 14.0) genutzt, um ein in Planung befindliches Kransystem mit zwei Kranen zu modellieren. Hierbei handelt es sich um eine Krananlage zur Beschickung eines Produktionsprozesses, welche im

Zuge von Maßnahmen zur Steigerung der Produktionsleistung als Engpass erkannt wurde.

Eine Voruntersuchung ergab, dass der geplante Durchsatz mit einem einzelnen Kran nicht zu erreichen ist. Das Unternehmen im Anwendungsfall ist zudem in einer dem globalen Wettbewerbsdruck ausgesetzten Branche der Prozessindustrie tätig und hat daher ein besonderes Interesse an automatisierten Abläufen. Der Schüttgutumschlag soll vor diesem Hintergrund von einer Zweikrananlage übernommen werden. Mit der Simulation wurden zwei Ziele verfolgt: zum einen die Dimensionierung der (individuell gefertigten und damit bedarfsgerecht konfigurierbaren) Krananlage; zum anderen die Entwicklung von Steuerungsregeln für einen automatisierten Betrieb des Kransystems. In diesem Beitrag wird die dafür erforderliche Zweikransteuerung vorgestellt und bewertet.

2 Vorstellung des Anwendungsfalls

2.1 Untersuchungsgegenstand

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde die Neuplanung einer Halle mit Prozesskränen zur Versorgung eines Produktionsprozesses betrachtet. Abbildung 1 zeigt das untersuchte Kransystem und den Aufbau der Kranhalle.

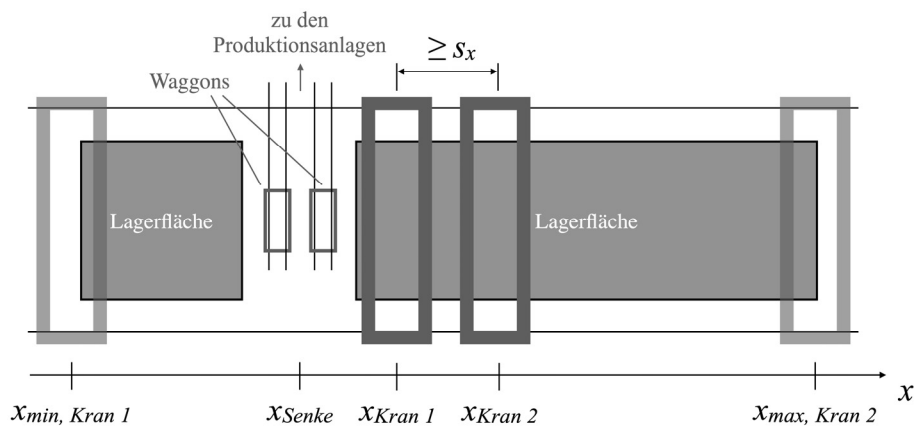


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Untersuchungsgegenstandes – Aufsicht der Kranhalle mit Prozesskränen, Lagerflächen und Bahngleisen

Die Kranhalle dient als Zwischenlager vor den Produktionsanlagen, um für diese eine ununterbrochene Materialversorgung sicherzustellen. Das Material wird entsprechend eines Mischungsverhältnisses vorkommissioniert in Waggons bereitgestellt. Dafür werden auf den Lagerflächen verschiedene Materialarten sortenrein gelagert. Die Waggons transportieren das Material zu den Produktionsanlagen. Da die Menge an aufgenommenem Material pro Hub starken Schwankungen unterliegt, lässt sich das Mischungsverhältnis nur annähernd in Krantransportspiele umrechnen. Die Lagerflächen werden per Förderband und Lkw beschickt; die Abkippsstellen der Lkws

und Abwurfstellen der Förderbänder müssen freigehalten werden, um einen möglichst großen Materialzufluss zu sichern. Dies wird erreicht, indem die Krane bevorzugt Material aus diesen kritischen Bereichen zur Beschickung der Waggon entnehmen bzw. von dort in die übrigen Bereiche umlagern, wenn kein Waggon zur Beladung bereitsteht. Da die Beschickung des Zwischenlagers nur werktags und tagsüber erfolgen kann, müssen diese Umlagerungen dazu führen, dass sich eine ausreichende Lagerreichweite für die Phasen ohne Materialeingang bildet.

2.2 Stand der Technik

Im Bereich der Steuerung von Mehrkransystemen sind insbesondere Container-Verladeterminale Gegenstand der Forschung. Hier wurde bereits eine Vielzahl von Lösungsansätzen zur effizienten Steuerung von Mehrkransystemen entwickelt (Boysen et al. 2017). Die im Falle von Containerkränen ebenfalls auftretenden Zwischenlagerungen mit Ein-, Aus- und Umlagervorgängen ähneln dem Betrieb in der untersuchten Kranhalle.

Die Optimierung der Transportspielzeiten in einem Mehrkransystem stellt bereits bei zwei Kranen ein NP-schweres Planungsproblem dar (Lim et al. 2007). Die bekannten Ansätze zur Optimierung der Transportspielzeiten bilden das Transportsystem daher vereinfacht ab. In einem umfassenden Review konstatieren Boysen et al. (2017), dass unter den über 90 untersuchten Optimierungsansätzen des Mehrkranplanungsproblems nicht ein einziger Ansatz die Bewegungen entlang aller drei Achsen mit seinen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen abbildet. Ein kollisionsfreier Mehrkranbetrieb kann auf Basis des Optimierungsergebnisses demnach nicht garantiert werden. Im Realbetrieb muss daher eine Optimierung immer mit einer Echtzeit-Kollisionsvermeidung gepaart werden, die bestenfalls nicht nur Kollisionen verhindert, sondern proaktiv vermeidet und so den Weiterbetrieb der Anlage sicherstellt (Speer et al. 2011). Im Echtzeitbetrieb haben sich zudem (regelbasierte) Dispatchingansätze als vorteilhaft gegenüber (vorausplanenden) Schedulingansätzen erwiesen, da zur Verhinderung von *Deadlocks* die Schedulingansätze so trivial gehalten werden müssen, dass sie regelbasiert abbildbar sind bzw. den regelbasierten Dispatchingansätzen ähneln (Petering et al. 2009).

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde im Hinblick auf die spätere Übertragbarkeit der Steuerung auf das Realsystem wie auch eine möglichst realistische Abschätzung der Systemleistung eine detaillierte ereignisdiskrete Simulation gewählt, mit der sich regelbasierte Steuerungsstrategien vergleichen lassen. So ließ sich neben der Entwicklung einer Steuerungsstrategie für den automatisierten Betrieb auch die bei Beschaffung der Krananlage vordergründig notwendige Dimensionierung des Kransystems erreichen: statt theoretische, aber vielleicht nicht umsetzbare Abläufe für die Durchsatzermittlung heranzuziehen, führt das simulierte System die Anweisungen der Steuerung streng unter Beachtung der Durchführbarkeit (und damit unter Umständen mit längeren Zykluszeiten) aus.

2.3 Formale Beschreibung

Das betrachtete Kransystem besteht aus zwei Kranen auf einer gemeinsam genutzten Kranbahn. Ein Überholen ist nicht möglich, vielmehr muss jederzeit $x_{Kran\ 1} + s_x \leq x_{Kran\ 2}$ mit dem sicheren Abstand s_x zwischen den Mitten der Kranbrücken

eingehalten werden. Die Arbeitsbereiche der Krane überschneiden sich zu großen Teilen, lediglich die Kranbahnen sind einzelnen Kranen vorbehalten (Gl. 1 und 2).

$$x_{\min, \text{Kran } 1} \leq x_{\text{Kran } 1} \leq x_{\max, \text{Kran } 1} = x_{\max, \text{Kran } 2} - s_x \quad (1)$$

$$x_{\min, \text{Kran } 1} + s_x = x_{\min, \text{Kran } 2} \leq x_{\text{Kran } 2} \leq x_{\max, \text{Kran } 2} \quad (2)$$

Beide Krane besitzen identische technische Parameter. Die Bewegungen der Last bzw. des Lastaufnahmemittels im Raum definieren sich über die von der Kranbrücke (Dimension x), der Katze (Dimension y) und dem Hubwerk (Dimension z) erreichbare Beschleunigung, Verzögerung und Höchstgeschwindigkeit. Die Beschleunigungs- und Verzögerungswerte werden als gleich angenommen. Alle Bewegungen können überlagert ausgeführt werden. Während der Bewegungen muss zudem sichergestellt sein, dass die Position der Last hoch genug ist, um eine Kollision mit dem Lagergut bzw. den Anlagen in der Kranhalle zu verhindern. Dabei muss eine sichere Höhe s_z über dem Hindernis eingehalten werden. Die Lastaufnahmemittel definieren sich über stochastische Aufnahmemengen und Lastaufnahmezeiten.

Das Ziel dieser Arbeit ist das Aufstellen von Regeln, mit Hilfe derer die Krane die Beschickung der Waggons entsprechend eines vorgegebenen Mischungsverhältnisses in möglichst kurzer Zeit durchführen können.

3 Vorstellung des Lösungsansatzes

Für die Umsetzung des Simulationsmodells wurde das *Bridge Crane*-Modul der Simulationssoftware *AutoMod* derart erweitert, dass ein Zweikranbetrieb auf der vollen Länge der Kranbahn möglich ist. Zudem wurde die Steuerung der dritten Dimension (Hubwerk) ergänzt. Zwei Kollisionsschutzalgorithmen sorgen dafür, dass zwischen den Kranen wie auch zu Objekten im Raum gewisse Mindestabstände eingehalten werden. Daraus resultierende Wartezeiten werden zur Laufzeit berechnet. Die Logik zur Steuerung der Kranbrücken wird im Abschnitt 3.1 vorgestellt, jene zur Steuerung der Hubwerke in Abschnitt 3.2.

3.1 Implementierung des Zweikranbetriebs

Die Echtzeitsteuerung eines Mehrkransystems muss folgende Eigenschaften erfüllen (in Anlehnung an Petering et al. 2009):

- Die nächste Aktion eines Krans muss für jeden Systemzustand bekannt sein.
- Der Sicherheitsabstand zwischen den Kranen muss zu jeder Zeit eingehalten werden.
- Ein *Deadlock* muss in jedem Systemzustand ausgeschlossen sein.

Ein sog. *Deadlock* ist eine Situation, in dem beide Krane ein Ziel ansteuern sollen, welches nicht erreichbar ist, da der jeweils andere Kran dieses blockiert. Im Realbetrieb würde dies zu einer Notbremsung beider Krane und einem Stillstand des Systems führen. Um die Situation zu lösen, müsste einer der Krane manuell so weit zurückgefahren werden, dass der andere Kran sein Ziel erreichen kann. Diese Situation wird im Simulationsmodell verhindert, indem ein bereits wartender Kran priorisiert wird, woraufhin der andere Kran den Weg zum Ziel zeitnah freigibt. Abbildung 2 stellt den implementierten Algorithmus dar.

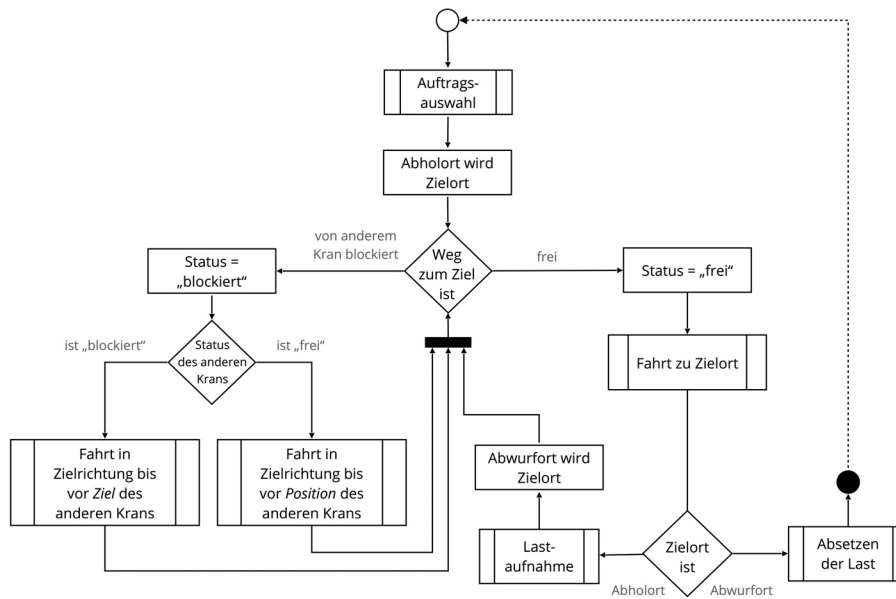


Abbildung 2: Prozessablaufdiagramm eines Krans unter Berücksichtigung des zweiten Krans

Ein zentrales Entscheidungskriterium ist dabei die Erreichbarkeit des vorgegebenen Ziels. Der Weg zum Zielort x_{Ziel} wird als blockiert angesehen, wenn $x_{Ziel, Kran 1} + s_x > x_{Ziel, Kran 2}$ gilt. Wenn der andere Kran nicht in Bewegung ist, gilt dabei dessen aktueller Ort als dessen Zielort. Der Ablauf stellt einen kollisionsfreien und unterbrechungsfreien Betrieb sicher, wenn Start und Ziel der Transportaufträge vom jeweiligen Kran gemäß Gleichung 1 bzw. 2 erreichbar sind. Die Kollisionsfreiheit wurde im Nachgang der Simulationsläufe mithilfe von während der Simulation aufgezeichneten Daten und einem daraus erstellte Weg-Zeit-Diagramm überprüft (s. Abb. 3). Der unterbrechungsfreie Betrieb wurde in einer Vielzahl von Simulationsläufen festgestellt.

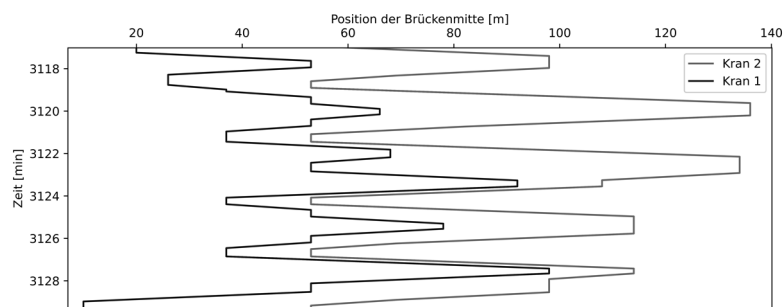


Abbildung 3: Ausschnitt eines Weg-Zeit-Diagramms eines Simulationslaufs

3.2 Implementierung der Hindernisüberquerung

Die Überquerung von auf dem Hallenboden befindlichen Hindernissen in sicherer Höhe wird durch Zeiten reiner Hubbewegung zu Beginn und zum Ende der Kranfahrt sichergestellt. In diesen Zeiten wird die Last gehoben bzw. abgesenkt, Brücke und Katze werden nicht verfahren. Die überlagerte Bewegung findet im Anschluss statt bzw. endet davor (s. Abb. 4).

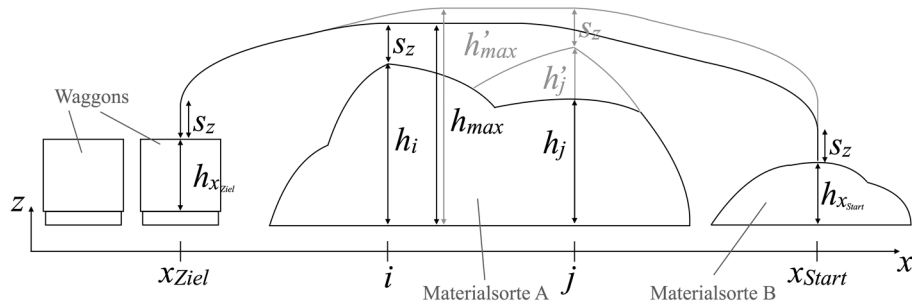


Abbildung 4: Relevante Größen zur Ermittlung der Zeiten mit reiner Hubbewegung am Beispiel zweier Lagertopologien

Zur Ermittlung der Wartezeit zu Beginn der Fahrt (t_{Start} , Gl. 3) wird für jeden zu überquerenden Punkt x die Dauer der Bewegung der Brücke dorthin ($t_{x,Brücke}$, Gl. 4) und die Dauer des Hebens der Last auf die dort nötige Höhe $h_x + s_z$ ($t_{x,Hubwerk}$, Gl. 5) ermittelt. Die Bewegungsdauern werden unter Berücksichtigung der anteiligen beschleunigten und gleichförmigen Bewegung ermittelt (Gl. 7 mit der Beschleunigungsstecke s_a , Gl. 6). Kann die Hubbewegung nicht schnell genug erfolgen und droht daher eine Kollision, wird die Differenz der Bewegungsdauern als Wartezeit veranschlagt. Die Berechnung erfolgt analog beim Absenken der Last, dafür wird der Startzeitpunkt der Absenkbewegung entsprechend verzögert.

$$t_{Start} = \max(0, t_{x,Brücke} - t_{x,Hubwerk} \mid x \in \{x_{Start}, x_{Start+1}, \dots, x_{Ziel}\}) \quad (3)$$

$$t_{x,Brücke} = \text{Dauer}_{\text{Sektional}}(|x_{Start} - x_{Ziel}|, |x - x_{Start}|, v_{Brücke}, a_{Brücke}) \quad (4)$$

$$t_{x,Hubwerk} = \text{Dauer}_{\text{Sektional}}(h_{max} - h_{Start}, \max(0, h_x + s_z - h_{Start}), v_{Hubwerk}, a_{Hubwerk}) \quad (5)$$

$$s_a = \frac{v^2}{2a} \quad (6)$$

$$\text{Dauer}_{\text{Sektional}}(s_{Ges}, s_{Sek}, v, a)$$

$$= \begin{cases} 2 * \sqrt{\frac{s_{Ges}}{a}} - \sqrt{2 * \frac{s_{Ges} - s_{Sek}}{a}} ; s_{Sek} > \frac{s_{Ges}}{2} \wedge s_{Ges} \leq 2s_a \\ \frac{s_{Sek}}{v} + \frac{v}{2a} ; s_{Ges} - 2s_a \geq s_{Sek} > \frac{s_{Ges}}{2} \wedge s_{Ges} > 2s_a \\ \frac{s_{Ges}}{v} - \sqrt{2 * \frac{s_{Ges} - s_{Sek}}{a}} ; s_{Ges} > s_{Gesamt} - s_a \wedge s_{Ges} > 2s_a \\ 2 * \sqrt{\frac{s_{Sek}}{a}} ; sonst \end{cases} \quad (7)$$

4 Auswertung der Steuerungsstrategien

4.1 Untersuchte Dispatchingregeln

Die im Anwendungsfall vorgefundenen baulichen Gegebenheiten sind nicht veränderbar. Dies betrifft insbesondere die Ausdehnung der Lagerflächen und die Lage der Gleise der Waggons zur Beschickung der Produktionsanlagen. Damit ergibt sich eine asymmetrische Verteilung der Umlageraufträge; die Beschickung der Waggons findet mehrheitlich von rechts statt. Eine Aufteilung der Krane auf zwei Bedienbereiche mit Prioritätsregeln für den gemeinsamen Arbeitsbereich (hier die Bahngleise) ist vor diesem Hintergrund als Lösungsansatz weniger geeignet, da damit der mögliche Durchsatz des Kransystems nicht voll ausgeschöpft wird (Briskorn et al. 2016). Als Vergleichsgröße findet dieser in der Praxis übliche Ansatz jedoch Eingang in das Simulationsmodell. Die ebenfalls übliche Nutzung einer der beiden Krane als „Zulieferer“ für den anderen Kran wurde verworfen, da dies durch die zusätzlichen Handhabungsvorgänge eine Durchsatzverringering erwarten lässt (Gharehgozli et al. 2017). Folgende Regeln wurden abgebildet und untersucht:

fixZone teilt den Arbeitsbereich des Kransystems an der Materialsenke auf. Die Auftragsmenge teilt sich so in zwei Gruppen: Kran 1 bearbeitet ausschließlich Aufträge mit $x_{start} < x_{Senke}$, Kran 2 solche mit $x_{start} > x_{Senke}$. Aus der Gruppe der möglichen Aufträge wird der Auftrag mit größtem x_{start} zuerst ausgeführt. Die Arbeitsbereiche überschneiden sich lediglich über der Senke.

dynZone teilt den Auftragsbestand in zwei gleich große Mengen. Dafür wird der Median aus allen x_{start} gebildet. Kran 1 bearbeitet jene Aufträge, deren $x_{start} \leq \tilde{x}$, während Kran 2 jene annimmt, deren $x_{start} \geq \tilde{x}$.

mostNeighbours Kran 1 nimmt den Auftrag mit kleinstem x_{start} an, während Kran 2 aus den Aufträgen mit einer Startposition gemäß Gleichung 8 denjenigen Auftrag auswählt, in dessen Umgebung sich am meisten Aufträge befinden.

$$x_{Senke} < x_{start} \leq x_{max}, \text{ Kran 1} \quad (8)$$

Die Anzahl $n_{Umgebung,i}$ der einen Auftrag mit Startposition $x_{start,i}$ umgebenden Aufträge ergibt sich aus der Menge an Aufträgen, deren Startpositionen innerhalb eines durch den Sicherheitsabstand definierten Bereichs liegen:

$$n_{Umgebung,i} = |\{A_j \mid x_{start,i} - s_x < x_{start,j} < x_{start,i} + s_x\}| \quad (9)$$

Diese Regel der Auftragsauswahl führt Kran 2 so lange aus, wie es mindestens einen Auftrag mit $x_{Start} < x_{Schrottfähre}$ und einen weiteren mit x_{Start} entsprechend Gleichung 8 gibt. Ist dies nicht der Fall, wählt Kran 2 den Auftrag mit dem höchsten x_{Start} .

Die Priorisierung im Fall einer drohenden Krankollision erfolgt in allen Varianten gemäß der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Zweikransteuerung. Es erhält demnach in jeder Variante derjenige Kran die Vorfahrt, welcher zuerst eine Fahrt in einen Konfliktbereich anmeldet.

4.2 Bewertung der Dispatchingregeln

Zur Bewertung der Dispatchingregeln wurden diese in mehreren Simulationsläufen in einem realitätsnahen Szenario genutzt. Der zu liefernde Materialmix wurde mit 25 t aus der kleinen Lagerfläche und 75 t aus der großen Lagerfläche angesetzt. Diese Menge wird alle 40 Minuten von den Produktionsanlagen abgerufen. Die Lastaufnahmekapazität wurde als gleichverteilt von 4 t bis 8 t definiert. Die Lastaufnahmedauer beträgt 20 s bis 40 s und unterliegt ebenfalls einer gleichförmigen Verteilung. Relevante Daten zu den räumlichen Ausmaßen sind $x_{min, Kran 1} = 0 m$, $x_{max, Kran 2} = 136 m$, $x_{Senke,1} = 39 m$ und $x_{Senke,2} = 47 m$. Für den Sicherheitsabstand zwischen den Brückenmitten gilt $s_x = 16 m$. Die technischen Daten der Krane für die relevanten Bewegungsrichtungen lauten $v_{Brücke} = 120 m/s$, $a_{Brücke} = 0,2 m/s^2$, $v_{Hubwerk} = 20 m/s$, sowie $a_{Hubwerk} = 0,25 m/s^2$. Zur Auswertung wurden die Zykluszeiten gemessen, d. h. die Dauer des Beladungsvorgangs einer Materiallieferung. Je Dispatchingregel sind fünf Simulationsläufe à 350 Tagen ausgeführt worden, pro Regelwerk sind somit etwa 70.000 Zyklen simuliert worden. Die dabei erreichten Zykluszeiten sind in Abbildung 5 zusammengefasst.



Abbildung 5: Verteilung der Zykluszeiten in Abhängigkeit der verwendeten Dispatchingregeln

Für die Auftragsverteilung nach festen Arbeitsbereichen (*fixZones*) ergibt sich im Mittel (Median) eine Zykluszeit von 27,8 Minuten. Mit der dynamischen Aufteilung der Aufträge (*dynZones*) und der damit einhergehenden stärkeren Überschneidung der Arbeitsbereiche wird im Mittel eine Zykluszeit von 23,7 Minuten erreicht (– 14,7 %). Die Anwendung der Regeln gemäß *mostNeighbours* ermöglicht im Mittel eine weitere

Reduktion der Zykluszeit auf 23,3 Minuten (– 16,2 %). Während der Simulation werden zudem die Statusänderungen der Krane protokolliert. Somit lässt sich auswerten, welchen Tätigkeiten die Krane nachgegangen sind (s. Abb. 6). Daraus geht hervor, dass Kran 1 mit *mostNeighbours* eine geringere Auslastung erfährt als mit *dynZones*, während die Tätigkeitsverteilung von Kran 2 mit diesen beiden Strategien nahezu identisch ist. Damit ergeben sich mit *mostNeighbours* weitere Reserven für eventuelle Ausfälle oder Durchsatzsteigerungen.

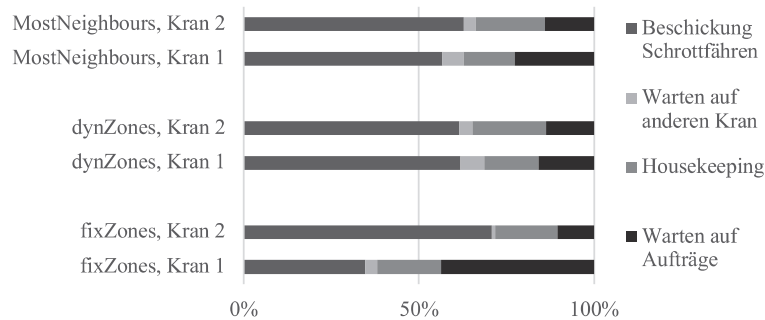


Abbildung 6
Tätigkeitsverteilung der Krane

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, wie eine Zweikransteuerung mit Hindernisumfahrung in der Simulationssoftware *AutoMod* implementiert werden kann. Dadurch wird die Überprüfung von Steuerungsstrategien bzw. -algorithmen in stochastisch geprägten Anwendungsfällen möglich, da in überschaubarer Zeit eine Vielzahl von Transportspielen simuliert werden kann. Durch die Entkopplung der Steuerungs- und Ausführungsebene kann die Simulation auch als Emulation zur Bewertung von Kransteuerungen genutzt werden. Dafür wird eine Vereinfachung bzw. Modularisierung des Simulationsmodells angestrebt, wodurch eine Anwendung des Modells als *Prüfstand* für Mehrkransteuerungssysteme ermöglicht werden soll. Neben dem Testen von Kransteuerungen vor Inbetriebnahme könnte damit erstmalig eine Vergleichbarkeit von und mit den in der Literatur beschriebenen Mehrkransteuerungsverfahren unter realbetriebsnahen Bedingungen erreicht werden.

Literatur

- Boysen, N. Briskorn, D.; Meisel, F: A generalized classification scheme for crane scheduling with interference. *European Journal of Operational Research* 258 (2017), S. 343–357.
- Briskorn, D., Emde, S. & Boysen, N. Cooperative twin-crane scheduling. *Discrete Applied Mathematics* 211 (2016), S. 40–57.
- Gharehgozli, A. H.; Vernooij, F. G.; Zaerpour, N.: A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal. *European Journal of Operational Research* 261 (2017), S. 108–128.
- Lim, A.; Rodrigues, B.; Xu, Z: Am-parallel crane scheduling problem with a non-crossing constraint. *Naval Research Logistics* 54 (2007), S. 115–127.
- Petering, M. E. H.; Wu, Y.; Li, W.; Goh, M.; de Souza, R: Development and simulation analysis of real-time yard crane control systems for seaport container transshipment terminals. *OR Spectrum* 31 (2009), S. 801–835.
- Schulze, F.; Könze, A.: Spieldauer bei Brückenkränen mit überlagerten Bedienbereichen. In: Krause, F.; Horn, P. (Hrsg.): *Von innovativer Krantechnik bis Virtual Reality: 16. Internationale Kranfachtagung* (2008).
- Speer, U., John, G. & Fischer, K. Scheduling Yard Cranes Considering Crane Interference. *Computational Logistics* 6971 (2011), S. 321–340.