



*Simulation in Produktion
und Logistik 2021*
Jörg Franke & Peter Schuderer (Hrsg.)
Cuvillier Verlag, Göttingen 2021

Simulation von kombinierter Stau- und Routenplanung in Multi-Terminal Häfen

Simulation based analysis of the combined container stowage and ship routing problem in multi-terminal ports

Janna Franzkeit, Hamburg University of Technology, Hamburg (Germany),
janna.franzkeit@tuhh.de

Thomas Voß, Leuphana University Lüneburg, Lüneburg (Germany),
thomas.voss@leuphana.de

Hannah Pache, Hamburg University of Technology, Hamburg (Germany),
hannah.pache@tuhh.de

Jens Heger, Leuphana University Lüneburg, Lüneburg (Germany),
jens.heger@leuphana.de

Carlos Jahn, Hamburg University of Technology, Hamburg (Germany),
carlos.jahn@tuhh.de

Abstract: The contribution presents a combination of analytical approach and simulation to solve the problem of combined container stowage and ship routing. Based on a real-world use case, the approach is demonstrated, and multiple scenarios are presented to emphasize the different pitfalls and challenges. The presented newly developed mathematical model is used to compute the optimal stowage plan while simultaneously optimizing terminal rotation. The optimal solution is tested for robustness using simulation. The contribution shows that the stowage plan and ship routing are interdependent in a multi-terminal port and a multi-criteria consideration of the departure time, overstows and robustness can be beneficial.

1 Einleitung

Der Transport von Containern ist der am schnellsten wachsenden Sektor in der Handelsschifffahrt und der Containerumschlag in Häfen nimmt rasant zu. Im Jahr 2019 wurden weltweit 811,2 Millionen TEU in Häfen umgeschlagen (UNCTAD, 2021). Gleichzeitig hat die internationale maritime Transportkette von Containern, bedingt durch das Wachstum der Schiffsgrößen und der steigenden Anzahl umgeschlagener Container, in den letzten zwanzig Jahren immer weiter an Komplexität gewonnen. So transportieren große Containerschiffe (ab ca. 8.000 TEU) Container zwischen international bedeutenden Containerhäfen (Hubs). Von dort aus

werden die Container mittels Feederschiffen (bis ca. 3.000 TEU) an kleinere Häfen (Spokes) weiter verteilt. In Abbildung 1 ist ein entsprechendes Hafennetzwerk exemplarisch dargestellt.

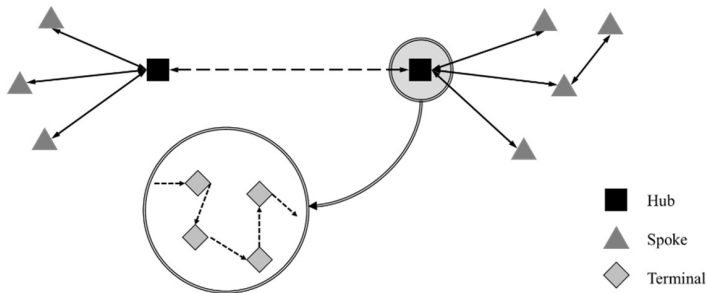


Abbildung 1: Transport zwischen Hubs und Spokes sowie das Anlaufen mehrerer Terminals innerhalb eines Hubs

International bedeutende Containerhäfen (z. B. Singapur, Shanghai, Rotterdam oder Hamburg) haben üblicherweise mehrere Containerterminals und werden daher auch als Multi-Terminal Häfen bezeichnet. Innerhalb eines Multi-Terminal Hafens laufen Feederschiffe, im Gegensatz zu großen Containerschiffen, mehrere Terminals an, um Container zu be- und entladen. Die Reihenfolge in der ein Feederschiff die einzelnen Terminals innerhalb des Hafens anläuft, kann sich kurzfristig durch Liegeplatz- und Containerverfügbarkeiten ändern. Dies hat sowohl Einfluss auf die Stauplanung der Container an Bord des Schiffes als auch auf die Reisedauer. Hieraus ergibt sich das Problem der Kombinierten Stau- und Routenplanung für Schiffe in Multi-Terminal Häfen.

Zur Lösung dieses Problems werden in diesem Beitrag eine mathematische Modellierung und eine Simulation zur Evaluation von Stau- und Routenplänen entwickelt. Ziel der mathematischen Optimierung ist es, die Aufenthaltszeit von Feederschiffe in Multi-Terminal Häfen zu reduzieren und Umstapelvorgänge der Container zu vermeiden. Das Simulationsmodell wird zur Evaluation des dynamischen Verhaltens der Lösungsalternativen unter Unsicherheit genutzt. Die besondere Herausforderung dieses Beitrages liegt in der Dynamik des Szenarios. Er leistet einen praxisnahen Beitrag und zeigt Möglichkeiten zur kombinierten Betrachtung von Stau- und Routenplanung in Multi-Terminal Häfen auf.

2 Stand der Forschung

Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte der kombinierten Stau- und Routenplanung sowie die Herausforderungen beschrieben.

Das Schiffsroutenproblem, nah verwandt mit dem Traveling Salesman Problem (TSP), wird in diesem Kontext als das Finden der schnellsten Tour zwischen den Terminals, die jeweils genau einmal angelaufen werden, definiert. In den meisten Fällen ist dies nur unter Berücksichtigung von Anlaufzeitfenster und Abfertigungszeiten möglich (Desrosiers et al., 1995; Christiansen et al., 2013). Besonders im Feederverkehr ist dieses Problem relevant, da Feederschiffe in großen

Häfen, sogenannten Multi-Terminal Häfen (Hellsten et al., 2020), üblicherweise mehrere Terminals anlaufen. Dieses Problem lässt sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: statische und dynamische Routenplanung. Bei der statischen Planung wird davon ausgegangen, dass die relevanten Informationen über die Tour konstant sind. Die zu Beginn der Berechnung benötigten Informationen wie Lage, Servicezeiten und Beladung sind konstant und zugänglich. Dabei sind Anwendungsbeispiele sowohl für Schubverbände (Maraš et al., 2013) wie auch für Containerschiffe (Vaferi et al., 2018) in der Literatur bekannt. Diese Annahme ist in realen Anwendungsszenarien unzureichend und im Normalfall sind diese Informationen mit Unsicherheit behaftet. So kommt es vor, dass die Tour dynamisch als Reaktion auf eine Änderung, basierend auf der vorherigen Lösung, umgeplant werden muss. In der Literatur zeigt sich, dass die genaue Betrachtung von Unsicherheit und das angepasste Planen zu einer Verbesserung der Leistung führen kann (Rodrigues et al., 2019).

Ein weiteres Problem ist die Positionierung der zu transportierenden Container auf dem Schiff. Die Positionen (Slots) sind in Bezug auf Längsposition (Bay), Breitenposition (Row) und Höhe (Tier) nummeriert und anhand dieser drei Werte eindeutig definiert. Da die Container übereinandergestapelt werden, folgen sie dem First-In-Last-Out Prinzip. Wenn an einem Hafen ein Container gelöscht werden soll, auf dem ein Container platziert ist, der für einen späteren Hafen bestimmt ist, so muss dieser zunächst entfernt werden. Diese Situation wird als Überstauung und die zusätzlichen Containerbewegungen als Umstapelvorgänge bezeichnet. Diese zusätzlichen Containerbewegungen kosten Zeit und Geld. Daher ist es ein Hauptanliegen der Stauplanung diese zu vermeiden.

Die beiden beschriebenen Probleme beeinflussen sich beim Anlauf mehrerer Häfen bzw. Terminals gegenseitig. Somit ergibt sich das Problem der kombinierten Stau- und Routenplanung. Die zwei Bestandteile des hier untersuchten Problems werden als das Containerstauproblem und das Schiffsroutenproblem (Container Stowage and Ship Routing Problem (CSSRP)) bezeichnet (Martins, P.T.a, Lobo, V.a, Moura, A, 2012; Moura et al., 2013). Das Schiffsroutenproblem ist NP-schwer (Vaferi et al., 2018) und das Problem der optimalen Stauplanung sogar NP-vollständig (Avriel et al., 1998). Es wurde gezeigt, dass das kombinierte Stau- und Routenplanungsproblem über mehrere Häfen mit exakten Methoden gerade noch lösbar ist (Li et al., 2018; Li et al., 2020).

Die Betrachtung von stochastischen Schwankungen in diesem Zusammenhang wurde bisher noch nicht analysiert. Insbesondere im Zusammenhang mit Multi-Terminal Häfen ist dies auf Grund der kurzen Fahrzeiten zwischen den Terminal von Relevanz.

3 Szenario

Das in diesem Paper gewählte Szenario orientiert sich an der Anordnung der Containerterminals im Hamburger Hafen. Der Hamburger Hafen ist Deutschlands größter Containerseehafen mit einem jährlichen Umschlag von 8,5 Mio. TEU in 2020 (Hafen Hamburg Marketing e.V., 2021) und beinhaltet vier Containerterminals. Diese Terminals liegen nicht direkt aneinander, sodass ein Feederschiff mehrere Anlegemanöver benötigt, um alle Terminals anzulaufen. Ähnliche Anordnung von Containerterminals sind auch in anderen historisch gewachsenen Multi-Terminal Häfen üblich (Nellen et al., 2020).

In diesem Beitrag wird ein Feederschiff betrachtet, das innerhalb eines Hubs an vier Terminals Container für vier zukünftig zu besuchenden Häfen (Spokes) auflädt. In der Ausgangssituation des Problems ist die Containerzuordnung zu diesem Schiff sowie die zukünftige Anlaufreihenfolge der Spokes bereits festgelegt. Zu Beginn jeder Instanz sind an den Terminals mehrere Zeitfenster definiert, innerhalb derer das Schiff beladen werden kann. Für jedes Terminal ist die Anzahl an aufzuladenden Containern für die folgenden Spokes festgelegt. Hierbei werden zu Zwecken der Vereinfachung nur 40-Fuß Container für eine Bay mit konstantem Gewicht und Höhe betrachtet. Die Bay umfasst je acht Rows und Tiers und kann somit mit insgesamt 64 Container beladen werden. Die Aufenthaltsdauer am jeweiligen Terminal ist proportional zu der Anzahl an aufzuladenden Container. Die Routenplanung beeinflusst die Reihenfolge, in der die Container aufgeladen werden. Dies beeinflusst die Stauplanung und insbesondere die möglichen Überstauungen, da die Container gestapelt werden und somit dem First-In-Last-Out Prinzip folgen. Das Zielkriterium des kombinierten Ansatzes zur Stau- und Routenplanung ist ein möglichst früher Zeitpunkt zum Verlassen des Hubs mit dem bestmöglichen Stauplan, d.h. mit minimaler Anzahl an Überstauungen. Somit werden Liegezeiten und Umstapelvorgänge reduziert.

Als multikriterielle Optimierung unter Unsicherheit kann abgewogen werden, ob mögliche Zeiteinbußen durch alternative Routen durch den Hub zu einer besseren Stauplanung führen können.

3.1 Mathematische Formulierung des Problems

Das Problem wird in einem ersten Schritt mit mathematischer Optimierung ohne Einbezug von Unsicherheiten gelöst. In Tabelle 1 sind die Konstanten des Modells aufgelistet, die je nach Szenario unterschiedlich konfiguriert werden. Tabelle 2 listet die Entscheidungsvariablen des Modells auf.

Tabelle 1: Konstanten innerhalb eines Szenarios

Konstanten	Beschreibung (Anzahl)
T	Terminals (4)
W	Zeitfenster (1 oder 3)
R	Row (8)
I	Tier (8)
I^*	Tier ohne oberste Position (7)
P	Spokes (4)
$task_t$	Beladungszeit am Terminal t
$open_{t,w}$	Beginn des Zeitfensters w am Terminal t
$close_{t,w}$	Ende des Zeitfensters w am Terminal t
$gatedist_t$	Fahrtzeit zwischen Gate und Terminal t
$dist_{s,t}$	Fahrtzeit zwischen Terminal s und Terminal t
$container_{t,p}$	Anzahl Container am Terminal t für Spoke p

Tabelle 2: Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariable	Typ	Beschreibung
xa	Integer	Ankunftszeit am Gate nach vollständiger Beladung
xu	Integer	Anzahl an Überstauungen
xb_t	Integer	Startzeit der Beladung am Terminal t
$xv_{s,t}$	Binär	1, falls Terminal s vor Terminal t angefahren wird
$xz_{t,w}$	Binär	1, falls Terminal t im Zeitfenster w angefahren wird
$xc_{r,i,t,p}$	Binär	1, falls in Row r , Tier i an Terminal t ein Container für Spoke p geladen wird

Ziel des Optimierungsmodells ist die Minimierung der Zielfunktion:

$$xa + xu \tag{1}$$

Hiermit wird die Aufenthaltsdauer im Hafen sowie die Anzahl an Überstauungen minimiert. Dies geschieht jeweils mit einer Gewichtung von 1, sodass eine Stunde Fahrzeitverlängerung und eine Überstauung als gleichwertig betrachtet werden. Das Mathematische Modell wird definiert als die Minimierung der Zielfunktion (1) unter Einhaltung der Nebenfunktionen (2) – (12):

$$xv_{s,t} + xv_{t,s} = 1 \quad \forall s, t \in T : s \neq t \tag{2}$$

$$xv_{s,t} \times (xb_s + task_s + dist_{s,t}) \leq xb_t \quad \forall s, t \in T : s \neq t \tag{3}$$

$$\sum_{w \in W} xz_{t,w} = 1 \quad \forall t \in T \tag{4}$$

$$xb_t \geq open_{t,w} \times xz_{t,w} \quad \forall t \in T, \forall w \in W \tag{5}$$

$$(xb_t + task_t) \times xz_{t,w} \leq close_{t,w} \quad \forall t \in T, \forall w \in W \tag{6}$$

$$xb_t \geq gatedist_t \quad \forall t \in T \tag{7}$$

$$xb_t + task_t + gatedist_t \leq xa \quad \forall t \in T \tag{8}$$

$$\sum_{t \in T, p \in P} xc_{r,i,t,p} = 1 \quad \forall r \in R, \forall i \in I \tag{9}$$

$$\sum_{r \in R, i \in I} xc_{r,i,t,p} = container_{t,p} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \tag{10}$$

$$xc_{r,i,s,p} \times xc_{r,i+1,t,q} \leq xv_{s,t} \quad \begin{aligned} &\forall r \in R, \forall i \in I^*, \\ &\forall s, t \in T : s \neq t, \\ &\forall p, q \in P \end{aligned} \tag{11}$$

$$\sum_{r \in R, i \in I^*, s, t \in T, p, q \in P} xc_{r,i,s,p} \times xc_{r,i+1,t,q} \leq xu \tag{12}$$

Die Bedingungen (2) bis (8) werden für die Routenplanung und die Bedingungen (9) bis (12) für die Stauplanung benötigt. Bed. (2) sorgt dafür, dass für je zwei verschiedene Terminals genau eines zuerst angefahren wird. Auf Grund von Bed. (3) beginnt die Beladung des Schiffes an einem Terminal erst nachdem alle Beladungen am vorherigen Terminals abgeschlossen sind und das Schiff genügend Zeit hatte zum neuen Terminal zu fahren. Aus Bed. (2) und (3) folgt zusammen die Transitivität der Terminalreihenfolge. Bed. (4) fordert, dass das Schiff an jedem Terminal während genau eines Zeitfensters beladen wird. Mit Bed. (5) und (6) wird sichergestellt, dass die Beladung innerhalb dieses Zeitfensters geschieht. Bed. (7) sorgt dafür, dass die Beladung am ersten Terminal erst beginnt, nachdem das Schiff vom Gate zum Terminal gefahren ist. Bed. (8) fordert, dass das Schiff an jedem Terminal beladen wurde und Zeit hat, zum Gate zu fahren, bevor es das Gate verlassen kann. Bed. (9) sorgt dafür, dass nur ein Container pro Slot geladen wird. Mit Bed. (10) wird sichergestellt, dass alle Container geladen werden. Bed. (11) sorgt dafür, dass die Container von unten nach oben geladen werden. Bed. (12) zählt die Anzahl an Überstauungen, definiert als die Anzahl an übereinanderliegender Containerpaare, bei denen der untere Container an einem früherem Spoke gelöscht werden muss.

3.2 Simulation

Die Betrachtung von komplexen Problemstellungen kann in einigen Fällen nicht mit Hilfe mathematischer Modelle durchgeführt werden. Gründe dafür sind zum Beispiel stochastische Einflüsse und dynamische Abhängigkeiten einzelner Systemkomponenten. Besonders in den Fällen, in denen Versuche im realen System zu teuer oder mit verheerenden Folgen verbunden sind, ist dies der Fall (Suhl und Mellouli, 2013).

In diesem Beitrag wurde analog zum mathematischen Modell eine ereignisdiskrete Simulation des Hubs erstellt, um die Zusammenhänge abzubilden. Basierend auf den statischen Werten zur Berechnung des optimalen Stau- und Routenplans wird durch Verifikation sichergestellt, dass das Simulationsmodell identische Werte liefert. Das Modell hat keine Einschwingphase. Ausgehend von der berechneten Terminalrotation fährt das Schiff die Terminals nacheinander an und wird dort, mit einer gegebenen Beladungszeit, abgefertigt. Je nach Reihenfolge der Terminals entstehen reihenfolgeabhängige Fahrzeiten. Da Stau- und Routenplanung bereits abgeschlossen sind, wird die Abfahrtszeit des Schiffes beim Verlassen des Hafens dokumentiert. Die Betrachtung der Leistungsindikatoren wird über 100 Replikationen gemessen.

Da in Abhängigkeit von externen Einflüssen die Fahr- und Beladezeit variieren können, ist der Einfluss dieser zwei Faktoren, unter Anwendung der ereignisdiskreten Modellierung, auf die Leistungsindikatoren zu prüfen. Zu diesem Zweck wird der vorab berechnete, statische Fahr- und Stauplan an die Simulation übergeben und dort unter verschiedenen Stufen von Dynamik bezüglich seiner Leistung evaluiert.

Es werden drei Ausprägungen von Dynamik (± 15 Minuten, ± 30 Minuten und ± 120 Minuten) auf die Beladungs- und Fahrzeiten zur Bewertung betrachtet. Der Leistungsindikator in der Simulation, wie auch im mathematischen Modell, ist die Aufenthaltsdauer. Zur erweiterten Betrachtung wird zusätzlich die Wartezeit in Stunden dokumentiert.

In Abb. 2 ist der Zusammenhang zwischen der Optimierung mit dem mathematischen Modell und der Simulation dargestellt.

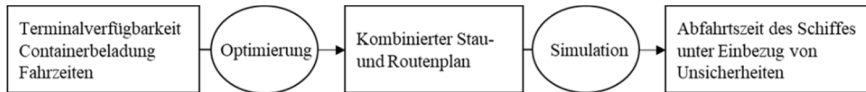


Abbildung 2: Zusammenhang Optimierung und Simulation

4 Ergebnisse

Das im Rahmen des Beitrags entwickelte mathematische Modell ist in der Lage Stau- und Routenplanung gleichzeitig zu optimieren. Erstmals wird dies analytische Betrachtung mit Simulation zur Evaluation der optimalen Stau- und Routenplanung erfolgreich kombiniert. Die Ergebnisse werden exemplarisch an fünf ausgewählten Szenarien beschrieben. Die Konfiguration der Szenarien sowie die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Anzahl an Zeitfenstern pro Terminal sind in Klammern unter Zeitfensterkonfiguration angegeben. Die Betrachtung der optimalen Ergebnisse unter Unsicherheit gibt Aufschluss über die Robustheit der berechneten Pläne.

Tabelle 3: Konfiguration und Ergebnisse der Szenarien

	Container- konfiguration	Zeitfenster- konfiguration	Ohne Überstauung	Optimale Route	Ohne Wartezeiten
Szenario 1	A	a (1)	Ja	Ja	Ja
Szenario 2	A	b (3)	Ja	Ja	Nein
Szenario 3	B	c (3)	Nein	Ja	Ja
Szenario 4	C	d (3)	Ja	Nein	Nein
Szenario 5	D	d (3)	Ja	Nein	Nein

Szenario 1 ist das einzige Szenario, in dem nur 1 Zeitfenster pro Terminal vorgegeben wird. Dieses Szenario ist ohne Wartezeiten und mit optimaler Route in Bezug auf Fahrzeitminimierung lösbar. Szenario 2 verwendet dieselbe Containerkonfiguration wie Szenario 1, aber restriktivere Zeitfenster. Die Rotation in Szenario zwei ist in Bezug auf Fahrzeiten ebenfalls optimal, es kommt hingegen zu Wartezeiten. Beide Szenarien sind ohne Überstauung lösbar.

Unter stochastischen Schwankungen zeigt sich (siehe Abbildung 3), dass die mittlere Wartezeit bei 2 Stunden, analog zum optimalen Fahr- und Stauplan, liegt. Bei Schwankungen der Fahr- und Beladezeit um 120 Minuten können sich, in seltenen Fällen, bis zu 6 Stunden Wartezeit ergeben.

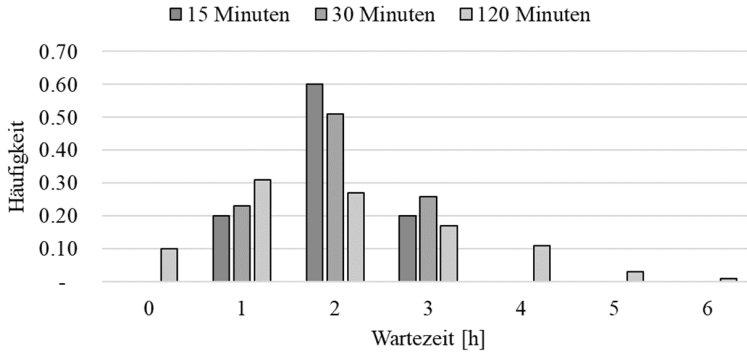


Abbildung 3: Häufigkeit der Wartezeit unter schwankenden Fahr- und Beladezeiten

Die im 3. Szenario gewählte Konfiguration führt zu minimaler Fahrzeit mit zwei Fällen von Überstauung im Stauplan (siehe Abbildung 4). Die grauen Bereiche kennzeichnen bereits verstaute Container vom vorherigen Terminal.

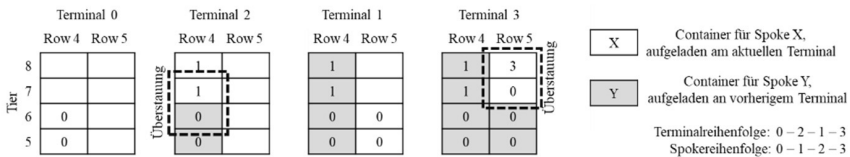


Abbildung 4: Nicht zu vermeidende Überstauung bei der gewählten Rotation

Die Szenarien 4 und 5 verwenden dieselbe Konfiguration von restriktiven Zeitfenstern und unterscheiden sich in Bezug auf die Containerkonfiguration. In Szenario 4 ist die Ankunftszeit am Gate um 6 Stunden schlechter als die optimale Rotation unter Missachtung der Zeitfenster wäre, da die Fahrzeit sich um 2 Stunden verlängert und es zu 4 Stunden Wartezeit kommt. Die Rotation aus Szenario 4 würde in Szenario 5 zu Überstauung führen, weswegen sich in diesem Szenario die Rotation verändert, was zu einer zusätzlichen Stunde Wartezeit führt. Die verschiedenen Routen der Szenarien werden in Abbildung 5 gezeigt, wobei die durchgezogene und die gestrichelte Linie die unterschiedlichen Lösungen darstellen.

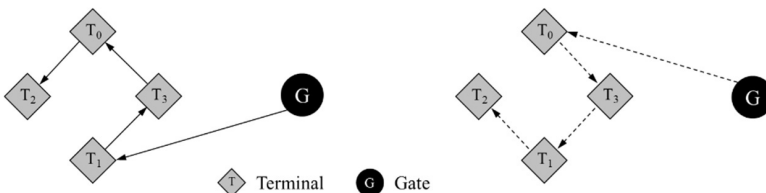


Abbildung 5: Zwei Rotationen mit unterschiedlichen Abfahrtszeiten und Beladungsplänen bei gleichbleibenden Zeitfenstern

An dieser Stelle (siehe Abbildung 6) zeigt sich, dass es, auf Grund der gegebenen Zeitfenster, bei beiden Rotationen mit starken Schwankungen der Fahr- und Beladezeiten zu einer breiten Verteilung an Wartezeiten kommt. Im Umkehrschluss kann festgestellt werden, dass eine geringfügige Schwankung, in diesem Szenario, ohne gravierende Auswirkungen auf die Aufenthaltsdauer sind. Die kombinierte Betrachtung der Stau- und Routenplanung unter Unsicherheit zeigt, dass in den meisten Fällen Schwankungen bis 30 Minuten nicht zu zusätzlichen Wartezeiten führen. Weiterhin zeigt sich in diesen Szenarien, dass bei starker Streuung der Fahr- und Beladezeiten, bis zu 4 Stunden zusätzliche Wartezeit eingeplant werden müssen. Dieses Verhalten gilt sowohl bei Routen- und Stauplänen mit und ohne Überstauung.

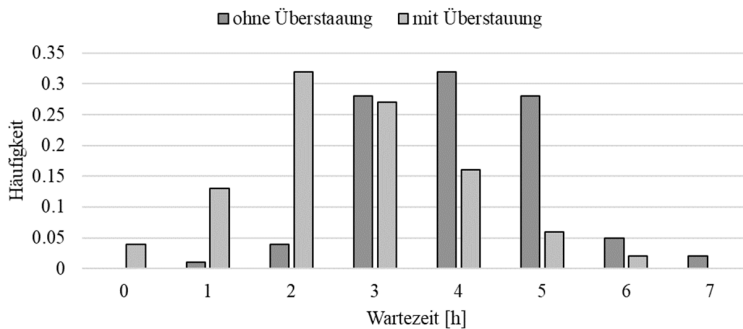


Abbildung 6: Unabhängig von der Rotation, führt eine strake Dynamik zu einer breiten Verteilung der Wartezeiten

Der Mehrwert einer solchen Betrachtung zeigt die möglichen Auswirkungen des dynamischen Charakters des Problems auf einen statischen Plan. Weiterhin kann dies als Entscheidungsunterstützung genutzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt die Kombination aus analytischem Vorgehen und Simulation zur Lösung des Problems der kombinierten Stau- und Routenplanung. Das im Rahmen des Beitrags entwickelte mathematische Modell wird zur zeitgleichen Berechnung des optimalen Stauplans und der Terminalrotation genutzt. Die optimale Lösung wird durch Simulation auf ihre Robustheit geprüft. Der Beitrag zeigt, dass die Stau- und Routenplanung abhängig voneinander sind und eine multikriterielle Betrachtung der Abfahrtszeitpunkte, Überstauung und Robustheit sinnvoll ist. Der Ausblick erstreckt sich über ein breites Spektrum an Erweiterungen. Exemplarisch aufgezeigt sei die Implementierung von praxisnahen Details wie z.B. Größe und Transportanforderungen oder unsichere Parameter von Containern wie das Gewicht. Zusätzlich kann eine Steigerung der Komplexität durch die Betrachtung von mehreren Bays an Bord des Feederschiffes den Lösungsraum sinnvoll erweitern. Weiterhin steht die Betrachtung der multikriterielle Optimierung unter Einbeziehung mehrere Leistungsindikatoren als Erweiterung zur Möglichkeit. Schlussendlich kann ein verbessertes methodisches Vorgehen zur Berechnung und Evaluation der Lösung und dem ableiten von Handlungsempfehlungen mit Simulation entwickelt werden.

Literatur

- Avriel, M.; Penn, M.; Shpirer, N.; Witteboon, S.: Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts. *Annals of Operations Research* 76 (1998), S. 55–71.
- Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Nygreen, B.; Ronen, D.: Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research* 228 (2013) 3, S. 467–483.
- Desrosiers, J.; Dumas, Y.; Solomon, M.M.; Soumis, F.: Time constrained routing and scheduling. In: *Network Routing: Elsevier* 1995, S. 35–139.
- Hafen Hamburg Marketing e.V., 2021: Containerumschlag. Online verfügbar unter <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/containerumschlag/>, 04.05.2021.
- Hellsten, E.O.; Sacramento, D.; Pisinger, D.: An adaptive large neighbourhood search heuristic for routing and scheduling feeder vessels in multi-terminal ports. *European Journal of Operational Research* 287 (2020) 2, S. 682–698.
- Li, J.; Zhang, Y.; Ji, S.; Zheng, L.; Xu, J.: Multi-stage hierarchical decomposition approach for stowage planning problem in inland container liner shipping. *Journal of the Operational Research Society* 71 (2020) 3, S. 381–399.
- Li, J.; Zhang, Y.; Ma, J.; Ji, S.: Multi-Port Stowage Planning for Inland Container Liner Shipping Considering Weight Uncertainties. *IEEE Access* 6 (2018), S. 66468–66480.
- Maraš, V.; Lazić, J.; Davidović, T.; Mladenović, N.: Routing of barge container ships by mixed-integer programming heuristics. *Applied Soft Computing* 13 (2013) 8, S. 3515–3528.
- Martins, P.T.a, Lobo, V.a, Moura, A.: Short sea shipping route and stowage plan optimization. In: *Maritime Engineering and Technology - Proceedings of 1st International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2011 2012*,
- Moura, A.; Oliveira, J.; Pimentel, C.: A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research* 12 (2013) 3, S. 217–231.
- Nellen, N.; Poeting, M.; Bschorer, K.; Jahn, C.; Clausen, U.: Impact of Port Layouts on Inter-Terminal-Transportation Networks. Unter Mitarbeit von TUHH Universitätsbibliothek, 2020,
- Rodrigues, F.; Agra, A.; Christiansen, M.; Hvattum, L.M.; Requejo, C.: Comparing techniques for modelling uncertainty in a maritime inventory routing problem. *European Journal of Operational Research* 277 (2019) 3, S. 831–845.
- Suhl, L.; Mellouli, T.: *Optimierungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013.
- UNCTAD: *Review of Maritime Transport 2020*. Hg. v. United Nations Conference on Trade and Development, 2021,
- Vaferi, M.; Fallah, M.S.; Tayebi, A.H.: A Metaheuristic for the Containership Feeder Routing Problem with Port Choice Process. *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 34 (2018) 2, S. 119–128.