

Analytische Berechnung der Durchsatzleistung von Mehrebenen-Shuttlesystemen mit unterschiedlichen Höhen der Ebenen

An approach for performance evaluation of storage and retrieval systems with shuttles serving multiple tiers with different heights of the tiers

Michael Eder
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung (IKP)
Forschungsgruppe: Konstruktionslehre und Fördertechnik
Technische Universität Wien,

Diese Publikation stellt eine Methode zur Bestimmung der Umschlagleistung von shuttlebasierten Lagersystemen (SBS/RS) mit ebenengebundenen Shuttles, die mehrere Ebenen unterschiedlicher Höhe bedienen, vor. Der vorgeschlagene Ansatz berücksichtigt die tatsächlichen Bedienstrategien des Shuttles und des Aufzugs. Die Berechnungsmethode basiert auf einem zeitkontinuierlichen offenen Wartesystem mit begrenzter Kapazität. Die Spielzeiten von Liften und Shuttles, die durch einen wegdiskreten Berechnungsansatz bestimmt werden, können mit ihrer Zeitverteilung direkt in dem vorgestellten Berechnungsansatz verwendet werden. Dieser Ansatz wird durch einen Vergleich mit einer Diskreten Ereignissimulation (DES) validiert. Die Daten für diesen Vergleich basieren auf einem System eines europäischen Lagersystemanbieters. Anhand eines Beispiels wird erläutert, wie dieses Berechnungsmodell zum Entwerfen von SBS/RS verwendet werden kann, um gegebene Anforderungen zu erfüllen.

[Schlüsselwörter: SBS/RS; Warteschlangensystem; zeitkontinuierlich; weg diskret; ebenen gebundene autonome Fahrzeuge]

This paper deals with a method for determining the performance of shuttle-based storage and retrieval systems (SBS/RS) with tier-captive, single-aisle shuttles serving various number of tiers of different heights. The use of this approach takes place in the design process of SBS/RS. The proposed approach considers the real operation characteristics of the shuttle and lift. The calculation method is based on a continuous-time open queueing system with limited capacity. The cycle times of lifts and shuttles, determined by a spatial value approach, can be used directly in the presented method with their time distributions. This approach is validated by a comparison with a discrete-event simulation (DES). The data for this comparison is based on a system provided by a European material handling provider. Finally, an exam-

ple is presented to outline how this calculation model can be used for designing SBS/RS that fulfil predefined requirements.

[Keywords: SBS/RS; queueing system; continuous-time; discrete spatial value; tier-captive autonomous vehicle]

1 EINFÜHRUNG

Technische Entwicklungen in der globalen Lieferkette haben die Anforderungen an die Lagertechnik erhöht. Shuttlesysteme werden zunehmend eingesetzt, um diese neuen Anforderungen - insbesondere die erhöhten Leistungsanforderungen - zu erfüllen. Während zu Beginn der Entwicklung von Shuttlesystemen vor etwa 15 Jahren der Schwerpunkt auf der Lagerung kleiner Behälter lag, haben sich die Anforderungen auch auf die Lagerung von Paletten ausgeweitet. Die Ziele bei der Auslegung dieser Systeme für Paletten sind unterschiedlich. Daher ist eine Anpassung der Berechnung der Durchsatzleistung erforderlich. In der vorliegenden Publikation wird ein ebenengebundenes Shuttlesystem (SBS/RS) erörtert, bei dem Shuttles zum Einsatz kommen, die mehrere Ebenen bedienen können, vergleichbar mit einem niederen Regalbediengerät. Außerdem sind die Ebenen unterschiedlich hoch. Wie diese Systeme aussehen können, ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Hauptbewegung der Shuttles erfolgt in horizontaler Richtung. Das betrachtete System verfügt über zwei Aufzüge, einen für die Einlagerung und einen für die Auslagerung. Zwischen Shuttles und Liften befinden sich Pufferplätze in jeder Hauptebene. Dies führt zu einer Entkopplung von Shuttle- und Liftbewegungen. Ziel dieses neuen Typs eines SBS/RS ist es, den Raumnutzungsgrad zu erhöhen und auf diese Art Kosten zu senken. Für die Berechnung der Umschlagleistung dieses neuen SBS/RS muss der bestehende Ansatz, wie er u.a. in [Ede16a] beschrieben ist, entsprechend erweitert werden. Dieser Ansatz wird durch einen Vergleich der Ergebnisse

mit denen einer Diskreten Ereignissimulation (DES) validiert.

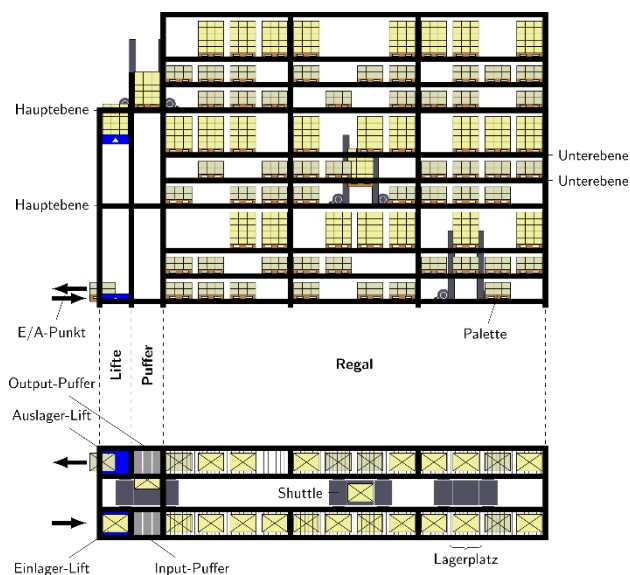


Abbildung 1. Shuttle-System

Dieser Artikel ist wie folgt aufgebaut: Der erste Teil, Abschnitt 2, beinhaltet eine Literaturübersicht aller für SBS/RS relevanten Artikel. Das behandelte Shuttlesystem und die zugrundeliegenden Annahmen sind in Abschnitt 3 dargestellt. In Abschnitt 4 wird die Leistungsberechnung beschrieben, wobei insbesondere die Zwischenankunftszeit der Paletten, die Bedienzeit der Shuttles für verschiedene Anzahlen von Ebenen pro Shuttle und die unterschiedliche Höhe der Ebenen berücksichtigt werden. Dabei wird ein offenes Warteschlangenmodell mit begrenzter Kapazität verwendet. Dieser Ansatz berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen Liften und Shuttles. Die in Abschnitt 5 vorgestellte numerische Studie zeigt die Genauigkeit des entwickelten Berechnungsmodells im Vergleich zu einer diskreten Ereignissimulation (DES). Die Parameter für diese numerische Studie basieren auf dem Lagersystem eines europäischen Lagersystemanbieters. Es folgt ein Vergleich der Umschlagleistungen von Systemen mit unterschiedlicher Anzahl von Ebenen pro Shuttle. Schließlich wird in Abschnitt 6 der Artikel zusammengefasst und ein Ausblick auf die zukünftige Forschung gegeben.

2 LITERATURÜBERBLICK

In der Literatur gibt es drei sehr unterschiedliche Arten von analytischen Ansätzen zur Analyse von SBS/RS. Der erste Ansatz ist ein Spielzeitmodell des Systems. Dieser Ansatz behandelt die Teilsysteme Aufzüge und Shuttles getrennt und unabhängig voneinander. Die Interaktion zwischen diesen beiden Subsystemen wird nicht berücksichtigt (z. B. Sari et al. [Sar14], Lerher [Ler16b]). Diese Veröffentlichungen werden hier nicht näher behandelt,

mit Ausnahme von Lerher [Ler16a], in dem ein System mit mehreren Ebenen pro Shuttle behandelt wird.

Der zweite analytische Ansatz ist ein Approximationsansatz unter Verwendung eines offenen Warteschlangennetzwerks. Die Zwischenankunftszeiten und Bedienzeiten innerhalb dieses Warteschlangennetzwerks werden durch Spielzeitmodelle bestimmt. Das offene Warteschlangennetzwerk wird verwendet, um die Wechselwirkungen zwischen Liften und Shuttles zu berücksichtigen (z. B. Marchet et al. [Mar12], Epp et al., [Epp17], Tappia et al., [Tap17]). Das Manko dieser Ansätze besteht m.E. darin, dass damit zwar die Wartezeiten zwischen Lift und Shuttle bestimmt werden können, jedoch nicht die Umschlagleistung des gesamten Systems [Ede20].

Der dritte Ansatz ist ein Warteschlangenmodell, wie in den drei Veröffentlichungen von Eder und Kartnig [Ede16a, Ede16b, Ede18]. Dieser basiert auf einem Warteschlangenmodell mit begrenzter Kapazität ($M|M|1|K$ oder $M|G|1|K$). Das Modell verwendet ein wegkontinuierliches Spielzeitmodell, um die Zwischenankunfts- und Bedienzeiten des Warteschlangenmodells gemäß der Referenzpunktmethod VDI3561 zu ermitteln. In [Ede19] wird der Übergang zu einem zeitkontinuierlichen und wegdiskreten Ansatz gezeigt. Die neuesten Veröffentlichungen von Eder [Ede20a, Ede20b] verwenden auch dieses offene Warteschlangenmodell mit begrenzter Kapazität und erweitern das Modell um die mehrfachtiefe Lagerung [Ede20a] und die klassenbasierte Lagerstrategie [Ede20b].

Es gibt viele Studien zu SBS/RS, bei denen Shuttles eine einzige Ebene bedienen. In der Veröffentlichung von Lerher [Ler16a] wird ein SBS/RS mit Shuttles behandelt, die mehrere Ebenen bedienen. Lerhers Ansatz basiert auf einem wegkontinuierlichen Spielzeitmodell, das die Wechselwirkungen zwischen den Liften und den Shuttles nicht berücksichtigt. Die Veröffentlichungen von Eder und Kartnig [Ede16a, Ede16b, Ede18] bzw. Eder [Ede19, Ede20a, Ede20b] beschreiben das System in seinem Verhalten so, dass es der Realität sehr nahekommt.

Wie aus diesem Literaturüberblick zu sehen ist, gibt es nur einen Artikel, der sich mit Mehrebenen-Shuttles befasst, aber dieser Ansatz berücksichtigt nicht die Wechselwirkungen zwischen Aufzügen und Shuttles. Auf der anderen Seite gibt es mehrere Publikationen, die analytische Berechnungsmodelle vorstellen, jedoch nur für ein Einebenen-Shuttles mit einheitlichen Höhen der Ebenen. Das vorliegende Paper soll diese Lücke schließen. Dafür wurden die Ansätze von Eder [Ede19, Ede20a, Ede20b] aufgegriffen und weiterentwickelt.

3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das in diesem Artikel untersuchte System ist ein SBS/RS, bei dem jedes Shuttle mehrere Ebenen unterschiedlicher Höhen bedienen kann. Ein Beispiel für ein

SBS/RS mit drei Hauptebenen und jeweils drei Unterebenen ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Funktionsweise ist folgende: Ein Lift transportiert die Paletten vom E/A-Punkt zu den Hauptebenen. Der E/A-Punkt befindet sich auf der ersten Hauptebene vor den Liften. Pufferplätze befinden sich zwischen den Liften und Shuttles in jeder Hauptebene. Jedes Shuttle ist einer Hauptebene zugeordnet, was bedeutet, dass die Anzahl der Shuttles der Anzahl der Hauptebenen entspricht. Jedes Shuttle kann eine Palette transportieren und eine bestimmte Anzahl von Unterebenen bedienen. Das Regal ist einfachtief und jeder Lagerplatz kann eine Palette aufnehmen. Die Höhen der Ebenen können unterschiedlich sein und auch die Anzahl der Unterebenen pro Hauptebene kann variieren.

Es gelten folgende Annahmen:

- Beide Lifte führen Einzelspiele aus. Die Aufträge werden gemäß dem FCFS-Prinzip (first come first served) bearbeitet. Ein Lift ist für das Einlagern und einer für das Auslagern zuständig.
- Die Shuttles führen Einzel- oder Doppelspiele gemäß einer FCFS-Regel aus.
- Die Lifte und Shuttles beschleunigen bzw. bremsen mit konstanter Beschleunigung.
- Am E/A-Punkt warten immer Paletten. Diese Annahme ist notwendig, um einen maximalen Durchsatz zu erzielen. Andernfalls müsste der Einlagerlift auf Behälter warten, was die Leistung des SBS/RS verringern würde.
- Die Paletten sind im Regal gleichmäßig verteilt.
- Die Reihenfolge, in der die Paletten ausgelagert werden sollen, ist zufällig und muss bei der Auslagerung exakt eingehalten werden.

4 ANALYTISCHE BERECHNUNG

Um die Leistung eines SBS/RS zu bestimmen, wird eine einzelne Gasse modelliert. Nach Epp et al. [Epp17], Marchet et al. [Mar12] und Heragu et al. [Her11] kann die Leistung des Systems durch Modellierung einer einzelnen Gasse bewertet werden, da die Einlager- und Auslagertransaktionen gleichmäßig auf alle Gassen und Ebenen verteilt sind.

Der analytische Ansatz basiert auf den Veröffentlichungen von Eder [Ede19, Ede20a, Ede20b] und beinhaltet drei Teile:

1. Berechnung der Zwischenankunftszeit für eine einzelne Hauptebene (siehe 4.1)
2. Berechnung der Shuttle-Bedienzeit (siehe 4.2)
3. Warteschlangenmodell M|G|1|K (siehe 4.3)

4.1 ZWISCHENANKUNFTSZEIT

Zu Beginn muss die Zwischenankunftszeit für den Einlagerlift berechnet werden.

Die Spielzeit eines Liftes, der ein Einzelspiel ausführt, ergibt sich aus [Ede19]:

$$t_{Lift} = 2 \cdot t_{FLift} + 2 \cdot t_{BELift} \quad (1)$$

Die durchschnittliche Zeit für die Liftfahrt berechnet sich folgendermaßen

$$t_{FLift} = \frac{1}{n_{HE}} \sum_{k=1}^{n_{HE}} t \left(\sum_{i=0}^k \Delta y_{HE_i} \right) \quad (2)$$

Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass die Lifte auf kurzen Strecken nicht ihre Höchstgeschwindigkeit erreichen, muss die Funktion $t(l)$ in zwei Abschnitte unterteilt werden:

für Strecken $l < \frac{v^2}{a}$ gilt:

$$t(l) = 2 \sqrt{\frac{l}{a}} \quad (3)$$

für größere Strecken gilt:

$$t(l) = \frac{l}{v} + \frac{v}{a} \quad (4)$$

Gleichung (1) gibt die Spielzeit des Aufzugs für ein Einzelspiel an. Die Zwischenankunftszeit t_{AN} ergibt sich daraus nach Gleichung (5).

$$t_{AN} = t_{Lift} \cdot \frac{n_E}{n_{UEN}} \quad (5)$$

Diese Gleichung berücksichtigt die Tatsache, dass ein Lift alle Hauptebenen einer Lagergasse bedient.

4.2 BEDIENZEIT

Der zweite Teil, der zur Bestimmung des Durchsatzes einer Hauptebene benötigt wird, ist die Bedienzeit durch das Shuttle, welche gleich der Shuttle-Spielzeit ist. Als Referenzzyklus dient im Folgenden ein Doppelspiel, das betreffend Ein/Auslagern zwei Einzelspielen entspricht.

Die Spielzeit für zwei Einzelspiele beträgt [Ede19]:

$$t_{SES_N} = 4 \cdot t_{FS_{ES_N}} + 4 \cdot t_{BEShuttle} \quad (6)$$

die Spielzeit für ein Doppelspiele [Ede19]:

$$t_{SDSN} = 2 \cdot t_{FS_{ESN}} + t_{FS_{DSN}} + 4 \cdot t_{BE_{Shuttle}} \quad (7)$$

Die Shuttle-Bedienzeit enthält die gleichen Argumente wie die Spielzeiten der Lifte.

Die mittlere Zeit für die Shuttle-Fahrt ergibt sich zu:

$$t_{FS_{ESN}} = \frac{1}{n_P} \frac{1}{n_{UE}} \cdot \sum_{k=1}^{n_P} \sum_{l=1}^{n_{UE}} \text{MAX} \left[t(k \cdot \Delta x); t \left(\sum_{i=0}^{l-1} \Delta y_{UE_i} \right) \right] \quad (8)$$

Gleichung 8 beinhaltet die Zeiten für die vertikalen und horizontalen Bewegungen innerhalb einer Hauptebene. In dieser Gleichung ist das Maximum der Zeit, die für die horizontale oder vertikale Bewegung benötigt wird, ausschlaggebend für die Gesamtzeit.

Zuletzt wird noch die Zeit für die Fahrt von dem Ort, an dem die letzte Palette eingelagert wurde, zu dem Ort wo sich die auszulagernde Palette befindet, benötigt.

Diese ergibt sich zu:

$$t_{FS_{DSN}} = \frac{1}{n_P^2} \frac{1}{n_{UE}^2} \sum_{k=1}^{n_P} \sum_{l=1}^{n_P} \sum_{m=1}^{n_{UE}} \sum_{n=1}^{n_{UE}} \text{MAX} \left[t(|(k-l) \cdot \Delta x|); t \left(\sum_{i=0}^{m-1} \Delta y_{UE_i} - \sum_{j=0}^{n-1} \Delta y_{UE_j} \right) \right] \quad (9)$$

4.3 WARTESCHLANGENMODEL M|G|1|K

Um den Einfluss der Anzahl der Pufferplätze und den Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den Liften und Shuttles zu bewerten, wird ein zeitkontinuierliches offenes Warteschlangenmodell mit begrenzter Kapazität verwendet. Mit Hilfe dieses Modells wird der Durchsatz einer einzelnen Hauptebene ermittelt [Ede20b]:

$$\vartheta_{HE_N} = \frac{1}{t_{AN}} (1 - p_{k_N}) \quad (10)$$

$$\vartheta_{HE_N} = \frac{1}{t_{SN}} (1 - p_{0_N}) \quad (11)$$

Es gibt zwei Methoden, um den Durchsatz zu bestimmen. Die erste Methode basiert auf der Zwischenankunftszeit und der Blockierwahrscheinlichkeit (Gleichung (10)), die zweite auf der Verwendung der Be-

dienzeit und der Wahrscheinlichkeit für das Leersein des Warteraums (Gleichung (11)).

Die Blockierwahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das System voll ist und keine weitere Palette aufgenommen werden kann. Bei einem Shuttle-System bedeutet dies, dass der Einlagerlift auf einen leeren Platz eines Eingangspuffers warten muss.

Die Wahrscheinlichkeit für das Leersein des Warteraums bedeutet, dass die Bedienstation warten muss, da sich keine Palette im Warteschraum befindet. In einem SBS/RS bedeutet dies, dass das Shuttle auf eine Palette warten muss. Der Durchsatz einer Lagergasse entspricht der Summe der Durchsätze aller Hauptebenen [Ede20b]:

$$\vartheta = \sum_{N=1}^{n_{HE}} \vartheta_{HE_N} \quad (12)$$

Die Blockierwahrscheinlichkeit eines Warteschlangensystems wird wie folgt berechnet [Ede19]:

$$p_{k_N} = \frac{\rho_N \frac{\sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N} + 2K}}{2 + \sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N}}} \cdot (\rho_N - 1)}{\rho_N \frac{2 \cdot \sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N} + K + 1}}{2 + \sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N}}} - 1} \quad (13)$$

Trotz der Komplexität dieser Gleichung enthält sie nur drei Parameter.

1. Der Hauptparameter ist die Auslastung der Bedienstation (= Shuttle). Dieser Parameter ergibt entsprechend nachfolgender Gleichung aus der Zwischenankunftszeit des Lifts t_{AN} und der Shuttle-Bedienzeit t_{SN} [Ede19]:

$$\rho_N = \frac{t_{SN}}{t_{AN}} \quad (14)$$

2. K ist die Kapazität des Wartesystems. Dies ist die Summe aus der Anzahl der Pufferplätze und der Kapazität der Shuttles. Letztere ist immer gleich 1 (entspricht einer Palette pro Shuttle) [Ede19].

$$K = n_{Pu} + 1 \quad (15)$$

3. Das dritte Argument ist s , der Variationskoeffizient der Bedienzeit. Dieser Koeffizient kann auf ähnliche Weise berechnet werden, wie für ein Shuttlesystem, in welchem ein Shuttle immer nur eine Ebene bedient. Der Variationskoeffizient für Shuttles, die Einzelspiele durchführen, kann wie folgt berechnet werden [Ede19]:

$$s = \frac{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot n_P \cdot \Delta x}{v_S} \right)^2}}{t_S} \quad (16)$$

Die Formel für Doppelspiele lautet [Ede19]:

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\left(2 \frac{n_p \cdot \Delta x}{v_s}\right)^2}{18}}}{t_s} \quad (17)$$

Die Wahrscheinlichkeit für das Leersein des Warteraums enthält dieselben Argumente wie die Blockierungswahrscheinlichkeit und kann wie folgt berechnet werden:

$$p_{0N} = \frac{(\rho_N - 1)}{\rho_N \frac{2 \cdot \sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N + K + 1}}}{2 + \sqrt{\rho_N \cdot s^2 - \sqrt{\rho_N}}} - 1} \quad (18)$$

Damit sind sämtliche Argumente zur bekannt und der Durchsatz einer Hauptebene kann mit Gleichung (10) oder (11) berechnet werden.

5 ERGEBNISSE

Im Folgenden wird das beschriebene Berechnungsverfahren durch Vergleich mit den Ergebnissen einer DES validiert. Abschnitt 5.1 zeigt diesen Vergleich. In Abschnitt 5.2 wird erläutert, wie das Modell zur geometrischen Optimierung von SBS/RS verwendet werden kann. Ein Beispiel zeigt die Auswirkungen einer unterschiedlichen Anzahl von Ebenen pro Shuttle und unterschiedlicher Höhen der Ebenen.

5.1 NUMERISCHE BEWERTUNG DER APPROXIMATIONSQUALITÄT

Zur Validierung des Berechnungsansatzes wurden die Ergebnisse des analytischen Modells mit denen von 10 unabhängigen Replikationen eines Simulationsmodells verglichen. Die Simulationläufe wurden mit der DES-Software SIMIO (Version 10) durchgeführt.

Die Umschlagleistung eines SBS/RS ist ein entscheidendes Planungskriterium. Die Kenntnis des Einflusses der Anzahl der pro Shuttle bedienten Ebenen und der unterschiedlichen Höhen der einzelnen Ebenen auf die Umschlagleistung kann zur Bestimmung eines wirtschaftlich optimalen SBS/RS-Designs herangezogen werden.

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der DES und des analytischen Ansatzes dargestellt. Die Kurve der DES liegt genau zwischen den beiden Kurven des analytischen Ansatzes. In der DES führen die Shuttles eine Kombination aus Einzel- und Doppelspielen aus, sodass es plausibel ist, dass die Kurve der DES zwischen den beiden analytischen Berechnungskurven liegt. Dieses Diagramm be-

weist damit auch die Approximationsqualität des offenen Warteschlangenmodells gegenüber dem realen System. Abbildung 2 zeigt den Durchsatz für ein SBS/RS mit Shuttles, die drei Ebenen bedienen, mit zwei niedrigen und einer hohen Ebene (siehe Abbildung 1). Der Grund für die Mischung aus Einzel- und Doppelspielen in den Simulationsmodellen ist, dass die Einlagerungen in die Hauptebenen so gesteuert werden müssen, dass die Wartezeiten für die Shuttles minimiert werden. Dafür ist eine komplexe Steuerung erforderlich, die in diesem Paper nicht beschrieben wird.

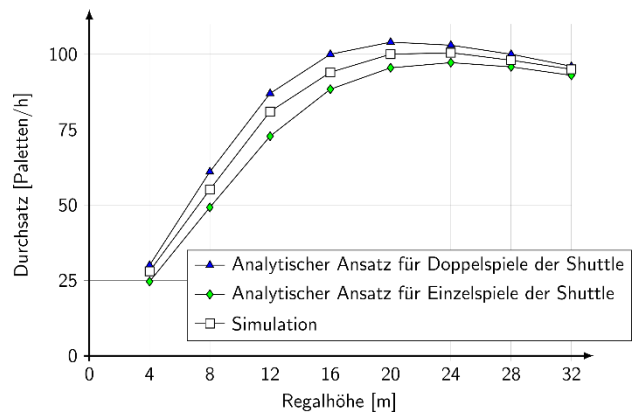


Abbildung 2. Durchsatzleistung bei einer Regallänge von 91 m und Shuttles, die jeweils drei Ebenen bedienen

5.2 OPTIMIERUNGSBEISPIEL

Für das Optimierungsbeispiel wird eine Stellplatzkapazität von 2.000 Plätzen angenommen. Für den Platzbedarf wird der für Puffer und Aufzüge erforderliche Platz vernachlässigt. Die Anzahl der Ebenen wurde so variiert, dass die maximale Umschlagleistung erzielt wird.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Bei den oberen drei Systemen beträgt die Höhe aller Ebenen 2 m. Die beiden Systeme darunter haben unterschiedliche hohe Ebenen: 50% der Ebenen haben eine Höhe von 1 m und die anderen 50% haben eine Höhe von 2 m. Die Ebenen mit einer Höhe von 1 m bilden die jeweils unteren Unterebenen, ähnlich Abbildung 1.

Eine zunehmende Anzahl von Ebenen, die von einem Shuttle bedient werden, führt zu einer Verringerung der Länge (siehe Abb.3 von links nach rechts). Der Durchsatz nimmt mit zunehmender Anzahl an Ebenen, die von einem Shuttle bedient werden, ab. Der Einfluss der unterschiedlichen Höhen der Ebenen kann nicht vernachlässigt werden. Eine Veränderung von gleichen Höhe über alle Ebenen zu unterschiedlichen Höhen bewirkt einen höheren Durchsatz (siehe Abb. 3 obere drei Systeme gegenüber den unteren zwei Systemen). Ein weiterer Vorteil unterschiedlicher Ebenenhöhen besteht darin, dass das Shuttle keine so hohe Hubhöhe haben muss. Wenn ein

Shuttle beispielsweise vier Ebenen mit einer Höhe von jeweils 2m bedient, müssen die Shuttles eine erforderliche Hubhöhe von 6m (= 3 x 2m) haben. Bei unterschiedlichen Ebenenhöhen, wie oben beschrieben, verringert sich die erforderliche Hubhöhe auf 4m (= 1m + 1m + 2m). Dies führt zu geringeren Kosten für jedes Shuttle. Nach dem obigen Beispiel kann dasselbe Shuttle bei unterschiedlichen Ebenenhöhen vier Ebenen bedienen, bei gleichen Ebenenhöhen jedoch nur drei Ebenen. Was bedeutet, dass für die gleiche Anzahl von Ebenen rund 33% mehr Shuttles erforderlich sind.

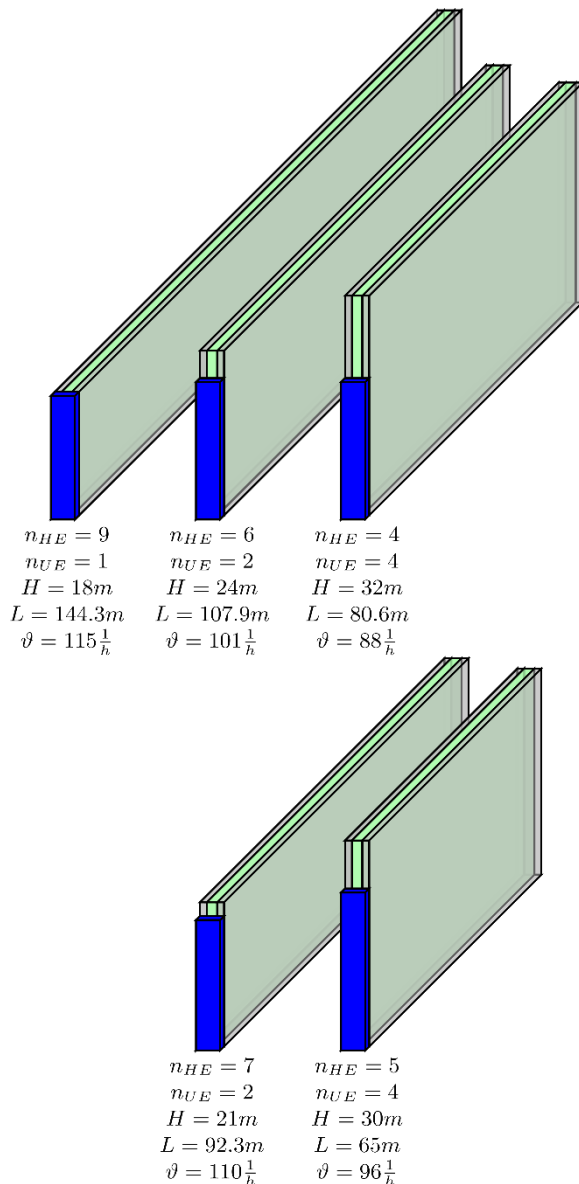


Abbildung 3. Optimierungsbeispiel

Im Allgemeinen nimmt die Regalhöhe bei unterschiedlichen Höhen der Ebenen ab. Dies führt zu sinkenden Kosten. Weiters ist zu erwähnen, dass mit einer höheren Anzahl von Ebenen, die von einem Shuttle bedient

werden, die Höhe des Lifts vor dem Regal (blauer Balken) abnimmt. In dem in Abbildung 3 gezeigten Beispiel ist die erforderliche Höhe des Lifts mit vier Unterebenen ($n_{UE} = 4$), die von einem Shuttle bedient werden, um 6 m geringer als bei Verwendung von Shuttles, die nur eine Ebene bedienen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ebenengebundene Shuttle-Systeme (SBS/RS) werden aufgrund ihrer hohen Systemleistung in vielen Branchen verstärkt eingesetzt. In den letzten Jahren werden diese Systeme nicht nur für kleine Behälter, sondern auch für die Lagerung von Paletten verwendet. Zusätzlich wurde die Entwicklung in Richtung Shuttle, die mehrere Ebenen bedienen, fortgesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Palettenhöhen gibt es SBS/RS mit unterschiedlichen Ebenenhöhen, um die Lagerdichte des SBS/RS zu erhöhen und den erreichbaren Durchsatz zu verbessern. Für diese neuen Systeme existieren bislang noch keine Verfahren zur Berechnung der Umschlagleistung. Das vorliegende Paper soll diese Lücke schließen. Das System wurde als zeitkontinuierliches System mit offenen Warteschlangenmodell und begrenzter Kapazität modelliert und mittels diskreter Ereignissimulation (DES) validiert. Weiters wurde gezeigt, wie das vorgestellte Warteschlangenmodell verwendet werden kann, um Mehrebenen-Shuttlesysteme für definierte Anforderungen (wie z.B. Lagerkapazität oder Durchsatz) zu planen.

Zukünftige Arbeiten werden SBS/RS mit alternativen Systemkonfigurationen gewidmet sein. Beispielsweise Systemen mit unterschiedlicher Anzahl von Liften und alternativen Spielstrategien.

NOMENKLATUR

- Δx ...Abstand zwischen zwei Lagerplätze
- Δy_{HE} ...Abstand zwischen zwei Hauptebenen
- Δy_{UE} ...Abstand zwischen zwei Unterebenen
- ϑ ...Durchsatz einer Lagergasse
- ϑ_{HE} ...Durchsatz einer Hauptebene
- ρ ...Auslastung eines Shuttles
- a_L ...Beschleunigung vom Lift
- a_{S_h} ...Horizontale Beschleunigung vom Shuttle
- a_{S_v} ...Vertikale Beschleunigung vom Shuttle
- K ...Kapazität des Wartesystems
- n_E ...Anzahl der Lagerebenen

n_{HE} ...Anzahl der Lager-Hauptebenen
 n_p ...Anzahl der Lagerplätze in einer Reihe [Ede16a]
 n_{Pu} ...Pufferplatzanzahl für Ein-/Auslagerung je Ebene
 n_{UE} ...Anzahl der Unterebenen je Lager-Hauptebene
 p_0 ...Leerwahrscheinlichkeit eines Wartesystems
 p_k ...Blockierwahrscheinlichkeit eines Wartesystems [Ede16b]
 t_A ...Zwischenankunftszeit in eine Ebene
 $t_{BE_{Lift}}$...Be-/Entladezeit des Lifts
 $t_{BE_{Shuttle}}$...Be-/Entladezeit des Shuttles [Ede18]
 t_{Lift} ...Spielzeit der Lifte
 t_{FLift} ...Fahrzeit der Lifte für Einzelspiele
 $t_{FS_{ES}}$...Fahrzeit der Shuttle für Einzelspiele [Ede19]
 $t_{FS_{DS}}$...Fahrzeit der Shuttle für Doppelspiele
 t_{SE} ...Bedienzeit der Shuttle bei Einzelspielen
 t_{SD} ...Bedienzeit der Shuttle bei Doppelspielen [Ede20a]
 s ...Variationskoeffizient der Bedienzeiten
 v_{Lift} ...Geschwindigkeit des Liftes
 v_{sh} ...Horizontale Geschwindigkeit vom Shuttle
 v_{Sp} ...Vertikale Geschwindigkeit vom Shuttle [Ede20b]

LITERATUR

Eder M., Kartnig G.: *Durchsatzoptimierung von Shuttle-Systemen mithilfe eines analytischen Berechnungsansatzes*, Logistics Journal: Proceedings 2016, S.113-126, ISSN 2192-9084, Doi:10.2195/lj_Proc_eder_de_201610_01

Eder M., Kartnig G.: *Throughput analysis of S/R shuttle systems and ideal geometry for high performance*, FME Transactions 44, 2, 2016, S.174-179, ISSN 1451-2092

Eder M., Kartnig G.: *Calculation method to determine the throughput and the energy consumption of S/R shuttle systems*, FME Transactions 46 ,3 ,2018, S.424-428

Eder M.: *An analytical approach for a performance calculation of shuttle-based storage and retrieval systems* Production and Manufacturing Research 7, 1, 2019, S 255-270 Doi:10.1080/21673277.2019.1619102

Eder M.: *An approach for a performance calculation of shuttle-based storage and retrieval systems with multiple-deep storage*. The International Journal of Advanced Manufacturing, 107, 1, 2020, S 859-873, Doi:10.1007/s00170-019-04831-7

Eder M.: *Analytical model to estimate the performance of shuttle-based storage and retrieval systems with class-based storage policy*. The International Journal of Advanced Manufacturing, 2020, S 1-16, Doi:10.1007/s00170-020-04990-y

[Epp17] Epp, M.; Wiedemann, S.; Furmans, K.: *A discrete-time queueing network approach to performance evaluation of autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research 55, 4, 2017, S 960-978.

[Her11] Heragu, S.S.; Cai, X.; Krishnamurthy, A.; Malmborg, J.: *Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems*. International Journal of Production Research 49, 22, 2011, S 6833-6861.

- [Ler15] Lerher, T.; Ekren, B.Y.; Sari, Z.; Rosi, B.: *Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems*. The International Journal of Advanced Manufacturing, 78, 9-12, 2015, S 1705-1725.
- [Ler16a] Lerher, T.: *Multi-tier shuttle-based storage and retrievals systems*. FME Transactions 44, 3, 2016, ISSN 1451-2092
- [Ler16b] Lerher, T.; Ekren, B.Y.; Sari, Z.; Rosi, B.: *Method for evaluating the throughput performance of shuttle based storage and retrieval systems*. Technicki vjesnik/ Technical Gazette 23, 3, 2016, S 715-723.
- [Mar12] Marche, G.; Melacini, M.; Perotti, S.; Tappia, E.: *Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes*. International Journal of Production Research 50, 24, 2012, S 7134-7148.
- [Sar14] Ari, Z.; Ghomri, L.; Ekren, B.; Lerher, T.: *Experimental validation of travel time models for shuttle-based automated storage and retrieval system*. International Material Handling Research Colloquium, 2014.
- [Tap17] Tappia, E.; Roy, D.; De Joster, R.; Melacini, M.: *Modeling, analysis, and design insights for shuttle-based compact storage systems*. Transportation Science, 51, 1, 2017, S. 269-295.
-
- Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Eder**, Research Assistant at the Institute for Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.
- Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig**, Professor at the Institute for Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.
- Address: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Technische Universität Wien, Leurgasse 6, 1060 Wien, Österreich,
Phone: +43 1 58801-30742, Fax: +49 1 58801-30799,
E-Mail: michael.e307.eder@tuwien.ac.at