

# Quantitatives Entscheidungsmodell zur Wahl zwischen AKL und Shuttle-Lager

## Quantitative decision model for the choice between AS/RS and shuttle warehouse

**Katharina Fleischer-Dörr**  
**Christoph Jacobi**  
**Robin Hermann**  
**Kai Furmans**

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

**B**ei der Investition in ein Kleinteilelager stellt die Wahl der passenden Automatisierungstechnik eine Herausforderung dar, da man sich langfristig an das ausgewählte System bindet. Sowohl Shuttle- als auch AKL-Systeme haben sich in diesem Zusammenhang in der Praxis bewährt und zeichnen sich durch eine Reihe individueller Vor- und Nachteilen aus. In diesem Beitrag wird ein quantitatives Entscheidungsmodell zur Auswahl der für den anwendungsspezifischen Fall am geeignetsten Automatisierungstechnik vorgestellt. In dem Modell werden, basierend auf definierten Eingabeparametern und Systemanforderungen, passende Alternativen für beide Systemvarianten generiert und hinsichtlich wesentlicher Bewertungskriterien (z.B. Umschlagsleistung) bewertet. Basierend auf einem multikriteriellen Bewertungsmodell wird als Ergebnis die zu wählende Lageralternative als umzusetzende Empfehlung ausgegeben.

*[Schlüsselwörter: Lagerplanung, Multikriterielles Entscheidungsmodell, Analytic Hierarchy Process Methode]*

**W**hen investing in a small parts warehouse, choosing the right automation technology is a major challenge, as the selected system is a long-term investment. Both, shuttle and AS/RS systems have proven themselves successfully in practice in this context and are characterised by a number of individual advantages and disadvantages. This article presents a quantitative decision model for the selection of the automation technology best suited for the application-specific case. In the model, suitable alternatives for both system variants are generated based on defined input parameters and system requirements and evaluated with regard to essential criteria (e.g. handling performance). Based on a multi-criteria evaluation model, the warehouse alternative to be selected is output as a recommendation to be implemented.

*[Keywords: Warehouse planning, Multi-criteria decision model, Analytic hierarchy process method]*

### 1 EINLEITUNG

Die Entscheidung für eine Investition in ein automatisches Kleinteilelager (AKL) stellt insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen eine große Herausforderung dar. Mit Regalbediengeräten und Shuttle-Fahrzeugen stehen zwei Technologien zur Verfügung, die sich in der Praxis bewährt haben und die sich durch individuelle Vor- und Nachteile auszeichnen. Während AKL-Systeme als robust und betriebssicher gelten und entsprechend wirtschaftlich betrieben werden können, zeichnen sich Shuttle-Systeme durch ihre hohe Flexibilität, dynamische Leistungsfähigkeit und hohe Systemverfügbarkeit bei Ausfall eines Fahrzeuges aus. Demgegenüber stehen die Inflexibilität und die großen Auswirkungen einer Störung eines AKL-Systems sowie die Komplexität und die damit verbundenen hohen Anschaffungs- und Wartungskosten eines Shuttle-Systems. [Cie15], [Plo15]

Betrachtet man die jährliche Zahl an Inbetriebnahmen von AKL- und Shuttle-Systemen, wird erkennbar, dass seit 2015 beide Systeme gleichbedeutend nebeneinander existieren und jährlich zahlreiche Investitionen in beide Systeme erfolgen (siehe Abbildung 1). Das bedeutet auch, dass in den Anwender-Branchen, wie z.B. (Groß- und Einzel-) Handel, KEP-Dienstleister, Flughäfen sowie Nahrungsmittel- und Automobilindustrie regelmäßig Investitionsentscheidungen hinsichtlich der beiden Systeme getroffen werden müssen.

Wichtige zu berücksichtigende Entscheidungsparameter stellen in erster Linie die Leistungsanforderungen (Durchsatz- und Umschlagsleistung), bauliche Parameter, Effizienz und Wirtschaftlichkeit sowie die Flexibilität der logistischen Abläufe dar. Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass zwischen den einzelnen Parametern Wechselwirkungen und hierarchische Abhängigkeiten bestehen, die bei der Entscheidung berücksichtigt werden müssen.

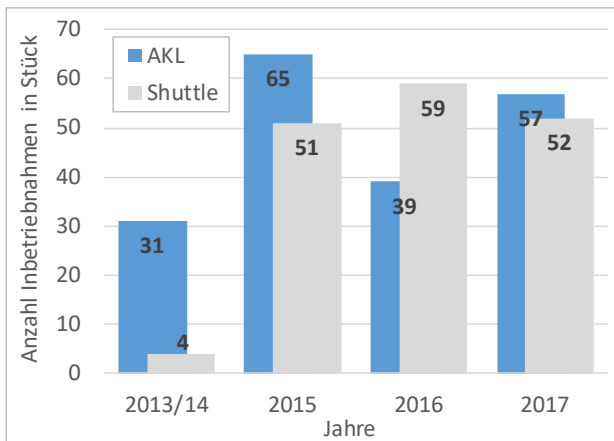


Abbildung 1: Jährliche Inbetriebnahmen von Shuttle- und AKL-Systemen auf Basis der Anwenderstatistik Automatiklager und Kommissionieranlagen [Mat19] (Eigene Darstellung)

Schließlich ist immer das Gesamtkonzept ausschlaggebend, eine einfache Faustregel zur Entscheidungsfindung gibt es nicht [Cie15].

Bei der Investitionsentscheidung gilt es folglich, eine ganze Reihe an verschiedenen Parametern zu berücksichtigen, die in ihrer Gesamtheit schwer zu durchschauen sind und die nichtlinear voneinander abhängen. Daher wird eine quantitative Entscheidungsbasis benötigt, um eine fundierte Wahl treffen zu können.

In zahlreichen wissenschaftlichen und fachlichen Beiträgen werden die beiden Systeme entweder isoliert voneinander betrachtet oder ausschließlich qualitativ miteinander verglichen. In den meisten Fällen wird keine oder nur eine vage Handlungsempfehlung hinsichtlich der auszuwählenden Automatisierungstechnik für die Ware-zur-Person Aufgabe im Kleinteilebereich getroffen. Diese Forschungslücke soll mit dem vorliegenden Beitrag geschlossen werden.

In diesem Beitrag wird ein quantitatives Entscheidungsmodell zur strukturierten Auswahl der anwendungsfallspezifisch am besten geeigneten Automatisierungstechnik vorgestellt. In dem Modell werden, basierend auf definierten Eingabeparametern und Systemanforderungen, passende Alternativen für beide Lagervarianten generiert und hinsichtlich der drei wesentlichen Bewertungskriterien *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung sowie Investitionshöhe* verglichen und bewertet. Als Endergebnis empfiehlt das multikriterielle Bewertungsmodell die für den konkreten Anwendungsfall zu wählende Lageralternative. Insgesamt kann die komplexe Entscheidung durch die gewählte Vorgehensweise strukturiert und effizient gestaltet werden. Mit dem resultierenden Entscheidungsmodell wird so ein ganzheitlicher Ansatz geschaffen, der die verschiedenen Systemausprägungen und Eigenschaften von AKL- und Shuttle-Systemen berücksichtigt und erstmals quantitativ bewertet.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 gibt einen Überblick über die relevanten Vorarbeiten zu diesem Thema. In Abschnitt 3 wird das quantitative Entscheidungsmodell entwickelt, wobei ein wesentliches Augenmerk auf die Erzeugung der verschiedenen Variantenalternativen gelegt wird. In Abschnitt 4 werden anhand des Entscheidungsmodells beispielhaft verschiedene Systemalternativen bewertet. Abschnitt 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

## 2 LITERATURÜBERBLICK UND RELEVANTE VORARBEITEN

[VDI3630] definiert Automatische Kleinteilelager (AKL) als Systeme, „die Produkte – in der Regel in normierten Ladehilfsmitteln (Behälter, Tablare, Kartons etc.) – in einem automatisierten Prozess transportieren und lagern“. Weiterhin ist ein AKL typisiert „durch den Einsatz von in der Regel in drei Achsen gesteuerten Lagermaschinen zur Bedienung von Regalen“ [VDI3630]. Das wesentliche Merkmal eines Shuttle-Systems ist hingegen „die weitgehende Trennung von Horizontaltransport und Vertikaltransport“ [VDI2692]. „Üblicherweise übernehmen die Shuttle-Fahrzeuge den Horizontaltransport und die Lastaufnahme und -abgabe, während der Vertikaltransport über Lifte realisiert wird.“ [VDI2692] Sowohl in AKL-, als auch in Shuttle-Systemen ist an den Lagerbereich eine Lagervorzone angebunden. Über eine fördertechnische Anbindung wird die ausgelagerte Ware zu einer oder mehreren Kommissionierstationen gefördert, wo der eigentliche Kommissioniervorgang stattfindet (Ware-zur-Person-Prinzip). [Ten11]

[Job13] präsentieren eine Methode zur funktionsbereichsübergreifenden Planung von Distributionszentren unter Verwendung der Graphentheorie. Für jeden Funktionsbereich eines Distributionszentrums, also Wareneingang, Kommissionierung, Packerei etc., werden verschiedene technische Ausführungen berücksichtigt, sogenannte Basismodule. Die verschiedenen Alternativen zur Gestaltung eines Distributionszentrums werden durch die Verbindung der einzelnen Basismodule in einem Digraphen dargestellt, für den eine kostenoptimale Lösung in Form einer optimalen Route mit Hilfe des Dijkstra-Algorithmus ermittelt werden kann.

Das Verfahren von [Rod14] dient der Festlegung des Layouts in einem manuellen Kommissionierbereich. Auf Basis gegebener Inputfaktoren und Anforderungen, wie erwartete Produkt-Nachfrage, Lager- oder Gebäudekapazität, wird das Ziel verfolgt, dasjenige Layout mit der geringsten Kommissionierzeit auszuwählen. Dabei wird keine konkrete Konfiguration vorgegeben, sondern es werden verschiedene technische Realisationen in die Entscheidung mit einbezogen. Die Methode untersucht mögliche Realisationen, die aus der Kombination von Gassenbreite,

Gassenlänge, Anzahl an Quergängen, Wegfindungs-Algorithmen sowie Belegungsstrategien entstehen. Mit Hilfe einer Simulation werden die verschiedenen Realisationen bewertet.

[Bar18] beschreibt den steigenden Einsatz von Shuttle-Systemen im Intralogistikkontext und begründet diese Entwicklung mit einem stetig wachsenden Artikelspektrum und zunehmend kleinteiligen Sendungen. Aufgrund ihrer Flexibilität seien Shuttle-Systeme für diese Anforderungen besonders geeignet. Beide Anlagenkonzepte haben ihre Bedeutung und es ist keine pauschale Bewertung der beiden Konzepte möglich. [Bar18] zieht als Auswahlkriterium die logistische Leistungsdichte (das Verhältnis aus Durchsatz und Lagerkapazität) für die Auswahl eines Systems heran. Für Lager mit einer hohen logistischen Leistungsdichte werden gassengebundene Einebenen-Shuttles und für Lager mit geringer Leistungsdichte Mehrebenen-Shuttles oder Systeme mit Gassenwechsel empfohlen. RBG-Lösungen sind laut [Bar18] dazwischen angesiedelt und vor allem bei konstanten Durchsatzanforderungen geeignet.

[Hep17] stellt eine fundierte und detaillierte Planung bei der Entscheidung zwischen beiden Systemen in den Vordergrund. Es sollen hierbei insbesondere die Kriterien Lagervolumina, geforderte Leistungsfähigkeit sowie zukünftige Entwicklung für das Layout, die Investitionen und Betriebskosten berücksichtigt werden. Insbesondere das Lagerlayout kann sich nach [Hep17] als kritischer Faktor erweisen – wenn dieses bestimmend für die Lagerkapazität wird, kann der Betrieb eines Shuttle-Systems zu bis zu 30% höheren Investitions- und Betriebskosten führen. [Hep17] gibt eine grobe Entscheidungsempfehlung auf Grundlage der beiden Kriterien Dynamik (Aufträge und Picks pro Stunde – Tendenz zu Shuttle-System) und Volumen (Anzahl Artikel und Lagerkapazität – Tendenz zu klassischem AKL-System).

[Jün15] empfiehlt Regalbediengeräte für Lagerumgebungen mit geringem Durchsatz und großer Lagerkapazität sowie im Schwerlastbereich. Da diese Anforderungen auch in Zukunft von Bedeutung sein werden, sieht [Jün15] für diese Systeme zumindest eine sichere Nische. Demgegenüber empfiehlt [Jün15] Shuttle-Systeme für hochdynamische Anwendungen, bei denen Schnelligkeit, geringer Platzverbrauch und eine flexible Handhabung im Vordergrund stehen. Insgesamt steht jedoch der Kundennutzen und die Gesamtleistung des Logistiksystems im Vordergrund – eine ganzheitliche Betrachtung aller auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittener Anforderungen ist daher unabdingbar. Obwohl den Shuttle-Systemen insgesamt ein größeres Potential für Weiterentwicklungen zugestanden wird, bleiben RBG-Systeme, nicht zuletzt aufgrund ihrer technischen Ausgereiftheit, wesentlicher

Bestandteil von Planungs- und Investitionsentscheidungen [Jün15].

[Huh14] nennt drei zentrale Parameter zur Entscheidungsfindung: die Flexibilität der logistischen Abläufe, der durchschnittlich zu erwartende Durchsatz und die mögliche Erweiterbarkeit des Logistiksystems. [Huh14] empfiehlt den Einsatz eines Shuttle-Systems, wenn realistische Wachstumsziele bestehen und die erhöhten Durchsatzanforderungen durch zusätzliche Shuttle-Fahrzeuge realisiert werden können. Sind die logistischen Abläufe klar definiert, der tägliche Durchsatz gut kalkulierbar und bei Bedarf Platz für zusätzliche Gassen verfügbar, empfiehlt [Huh14] den Einsatz eines AKL-Systems.

[Gün11] erarbeiten eine ganzheitliche Planungsmethodik zur verbesserten Planung automatischer Lagersysteme, die einen Gegenentwurf zur herkömmlichen, sequentiellen Planungsvorgehensweise, bei der zunächst das Groblayout mit Stellplatzkapazität bestimmt und darauf aufbauend die Umschlagsleistung berechnet wird, bildet. Um abschließend den Investitionsaufwand zu schätzen, schlagen [Gün11] den Einsatz eines ganzheitlichen Planungsmodells vor, das die hohe Komplexität der Lagerplanung mit einer Vielzahl der Planungsvarianten besser beherrschbar macht. So soll der hohe und von Expertise und Erfahrung abhängige Planungsaufwand reduziert und gleichzeitig das Leistungs- und Kostenoptimum gefunden werden. Das entwickelte Gesamtmodell setzt sich aus drei Teilmodellen zusammen, die die Lagergeometrie (inkl. Stellplatzanzahl), die Umschlagsleistung sowie den Investitionsaufwand unterschiedlicher Lagerausprägungen berechnen. Auf diese Weise werden zahlreiche Alternativen generiert sowie deren Kernkennzahlen (Geometrie, Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung, Investitionen) berechnet. Mit Hilfe einer Optimierungsfunktion erfolgt abschließend eine Empfehlung für diejenige Lageralternative, die zu den geringsten Investitionsausgaben führt. Untersuchungsgegenstand dieses Forschungsprojekts sind automatische Lagersysteme mit Regalbediengeräten, insbesondere Hochregallager (HRL). Shuttle-Systeme werden nicht berücksichtigt. [Gün11]

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Komplexität der Entscheidung zwischen den beiden technischen Ausführungen von allen Autoren unterstrichen wird. Obwohl die individuellen Vor- und Nachteile von AKL- und Shuttle-Systemen vollständig bekannt und in der Literatur beschrieben sind, bleibt ein enormer Planungsaufwand bestehen, um die in der individuellen Situation und auf die Anforderungen des Kunden zugeschnittene Systemlösung zu finden. Zwar können sich die Planer bei der Systemauswahl an allgemeingültigen Handlungsempfehlungen orientieren, die Auswahl einer der beiden Systemalternativen bleibt jedoch eine individuelle und zum Teil subjektive Entscheidung.

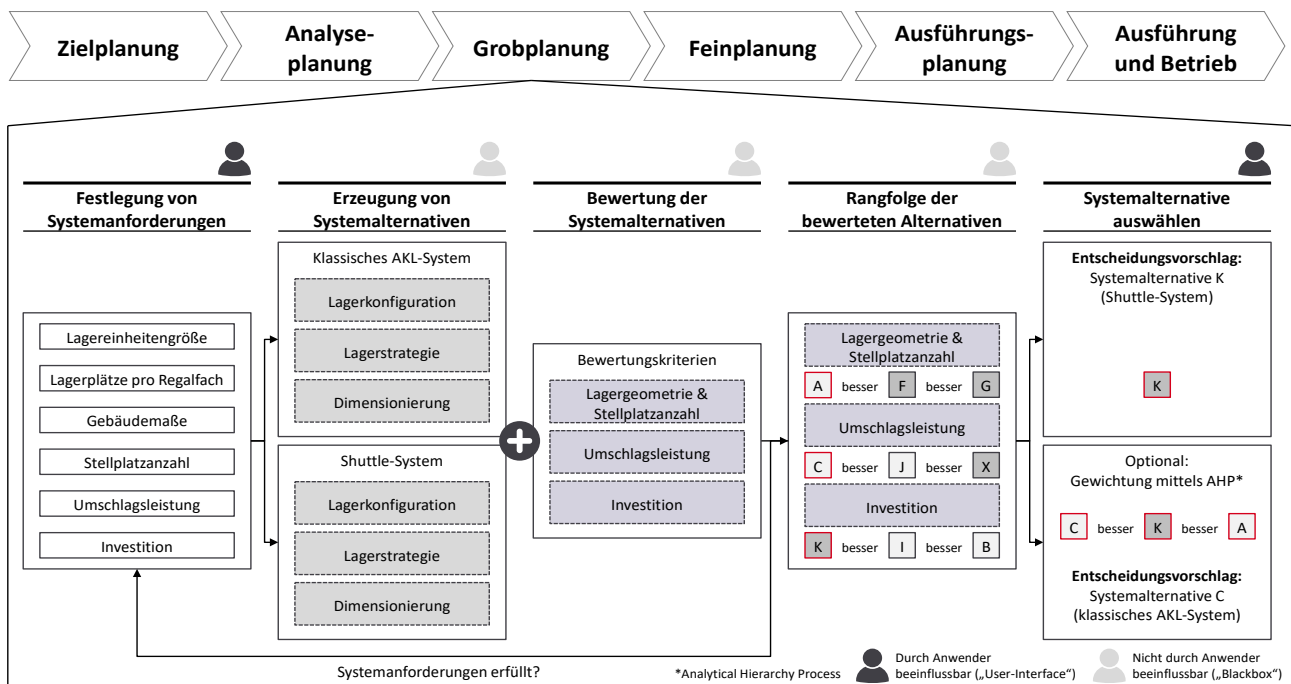


Abbildung 2: Aufbau, Funktionsweise und Einordnung des Entscheidungsmodells in den allgemeinen Planungsprozess

Um den Planungsprozess zu erleichtern und zu vereinfachen, schlagen [Gün11] eine ganzheitliche Planungsmethodik vor, die die sequentielle Vorgehensweise ersetzt. Diese Planungsmethodik ist jedoch nicht für eine Systemauswahl zwischen AKL- und Shuttle-System entwickelt worden, sodass sie nicht für die vorliegende Problemstellung herangezogen werden kann. Sie wird jedoch bei der Entwicklung des Entscheidungsmodells in diesem Beitrag z.T. aufgegriffen und weiterentwickelt.

### 3 QUANTITATIVES ENTSCHEIDUNGSMODELL ZUR WAHL ZWISCHEN AKL UND SHUTTLE-LAGER

In diesem Abschnitt wird das quantitative Entscheidungsmodell zur Wahl zwischen AKL und Shuttle-Lager entwickelt. Das Modell wird zunächst in den allgemeinen Planungsprozess eingeordnet. Anschließend wird dessen Aufbau und Funktionsweise beschrieben und die Generierung der Systemalternativen vorgestellt. Der Abschnitt schließt mit einer Beschreibung der Bewertung der erzeugten Systemalternativen.

#### 3.1 EINORDNUNG IN DEN ALLGEMEINEN PLANUNGSPROZESS DER LAGERSYSTEMPLANUNG

Der allgemeine Planungsprozess einer Lagersystemplanung besteht aus sechs Prozessschritten (siehe Abbildung 2), durch die ein systematisches Vorgehen von der Zielplanung bis zum Betrieb des Lagersystems ermöglicht wird [Gud10]. Jeder Prozessschritt umfasst hierbei mehrere Planungsschritte, die die Grundlage für den folgenden Prozessschritt bilden.

Ziel des entwickelten Entscheidungsmodells ist es, den Anwender im Entscheidungsprozess zu unterstützen, indem eine oder mehrere Systemalternativen mit Hilfe geeigneter Kriterien und Einflussfaktoren bewertet und miteinander verglichen werden. Das Entscheidungsmodell ist folglich im dritten Planungsschritt, der Grobplanung, einzuordnen (siehe Abbildung 2). Als Ergebnis nach Abschluss dieses Planungsschritts steht eine ausgewählte Systemalternative.

#### 3.2 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES ENTSCHEIDUNGSMODELLS

Das entwickelte Entscheidungsmodell besteht aus fünf Säulen, die während des Entscheidungsprozesses von links nach rechts durchlaufen werden (siehe Abbildung 2). Die erste und die letzte Säule stellen Benutzerschnittstellen dar, über die der Anwender die Möglichkeit hat, das Modell und dessen Funktionsweise zu kalibrieren und Werte einzugeben. Die erste Säule legt die Planungsvorgaben und die Zielsetzung fest und entspricht somit der Zielplanung.

Die erste Säule des Modells beinhaltet die Festlegung der Systemanforderungen durch den Anwender. Hier können bspw. die Dimensionierung (Breite, Höhe, Tiefe) und die Mindest-Umschlagsleistung definiert werden. Die an dieser Stelle eingegebenen Systemanforderungen bilden die Grundlage für den Vergleich der in Säule 2 erzeugten und in Säule 3 bewerteten Systemalternativen. Varianten, die die Anforderungen nicht erfüllen, werden bei der Rangfolgenbildung (Säule 4) nicht mehr berücksichtigt.

Aufgabe der zweiten Säule ist die Erzeugung von Systemalternativen und damit die Festlegung des Alternativenraums. Hierbei werden sowohl Varianten klassischer Lagersysteme mit RBG, als auch Shuttle-System-Varianten erzeugt. Jeder Variante liegen die drei technischen Einflussgrößen Lagerkonfiguration, Lagerstrategie und Dimensionierung zugrunde, deren jeweilige Ausprägungsformen eine eindeutige Systemalternative definieren.

In der dritten Säule erfolgt die Bewertung der erzeugten Systemalternativen anhand von drei Teilmodellen. Das erste Teilmodell berechnet hierzu die beiden Kennzahlen Lagergeometrie und Stellplatzanzahl, die sich aus Systemanforderungen, Erfahrungswerten aus der Praxis, der Lagerkonfiguration sowie der Dimensionierung berechnen. Das zweite Teilmodell berechnet die Umschlagsleistung, d.h. die maximale Anzahl an Ein- und/oder Auslagervorgängen von Lagereinheiten pro Zeiteinheit. Das dritte Teilmodell berechnet schließlich die Investitionsausgaben einer Systemalternative.

Nachdem alle Systemalternativen mit den drei Bewertungskriterien *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl*, *Umschlagsleistung* und *Investitionshöhe* bewertet sind, werden sie in Säule 4 entsprechend des jeweiligen Kriteriums in eine Rangfolge gebracht. Mit Hilfe der letzten Säule kann der Anwender diejenige Systemalternative auswählen, die die Systemanforderungen in Bezug auf das betrachtete Bewertungskriterium am besten erfüllt. Alternativ kann der Anwender die jeweils beste Alternative innerhalb eines Bewertungskriteriums mit Hilfe des Analytic Hierarchy Process (AHP), einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, gewichten. Mit dieser Methode erhält der Anwender die Möglichkeit, persönliche Präferenzen in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen.

### 3.3 ERZEUGUNG VON SYSTEMALTERNATIVEN

Die Erzeugung von Systemalternativen dient der Festlegung des Alternativenraums im Entscheidungsmodell. Die Planung von AKL- und Shuttle-Systemen zeichnet sich durch zahlreiche Freiheitsgrade aus, aus deren verschiedenen Ausprägungen die unterschiedlichen Systemalternativen resultieren.

Die Freiheitsgrade lassen sich in drei Teilgruppen untergliedern. Die *Lagerkonfiguration* beschreibt den physischen Aufbau eines Lagers, während die *Lagerstrategie* dazu dient, die betrieblichen Abläufe eines Lagersystems festzulegen. Die *Dimensionierung* umfasst alle Freiheitsgrade zur Charakterisierung der Lagerausdehnung in den drei Raumrichtungen. Die möglichen Ausprägungsformen der drei Teilgruppen sind abhängig davon, ob es sich um ein AKL- oder ein Shuttle-System handelt. Sie werden im Folgenden kurz beschrieben.

#### 3.3.1 LAGERKONFIGURATION

Die Lagerkonfiguration für ein klassisches AKL-System mit Regalbediengeräten umfasst sechs, die eines Shuttle-Systems fünf Parameter. Die Konfigurationsparameter der Lagertiefe (einfachtief bis sechsfachtief), die Anzahl Lastaufnahmemittel (LAM) pro RBG bzw. Shuttle-Fahrzeug (1-3) sowie die LAM-Breite (einfachbreit oder doppelbreit) gelten für beide Lagersysteme.

Für AKL-Systeme ergeben sich als weitere Konfigurationsparameter die Anzahl und die Lage der Übergabepunkte sowie der Wirkungsbereich des RBG. Das Modell wird dahingehend beschränkt, dass ausschließlich Systemalternativen mit zwei Übergabepunkten (Ein- und Auslagerpunkt) zugelassen sind. Diese befinden sich in einem Eckpunkt an der Regalstirnseite. Der Wirkungsbereich des RBG wird auf eine Gasse beschränkt (gassengebundene RBG).

Spezifische Konfigurationsparameter von Shuttle-Systemen sind die Art und die Anordnung der eingesetzten Lifte. Bezüglich der Anordnung der Lifte beschränkt sich das Entscheidungsmodell auf Varianten, bei denen alle Lifte auf einer Seite des Regals angeordnet sind. Das Modell differenziert zwischen unterschiedlichen Lift-Typen (Fahrzeug- oder Behälter-Lift), deren Anzahl jedoch auf einen Fahrzeuglift pro Regalgasse bzw. zwei Behälterlifte pro Regalgasse beschränkt ist.

#### 3.3.2 LAGERSTRATEGIE

Die betrieblichen Abläufe in einem Lagersystem lassen sich mit Hilfe von Lagerstrategien organisieren. Deren Ziel ist es, auf die Anforderungen und Bedürfnisse vor- und nachgelagerter Bereiche (z.B. Wareneingang, Produktion, Versand) zu reagieren. Unabhängig der Systemauswahl lassen sich gassenübergreifende und gassenbezogene Lagerstrategien unterscheiden. Das Entscheidungsmodell unterstellt bei den gassenübergreifenden Strategien eine Artikelgleichverteilung über die Lagergassen sowie eine freie Sequenzreihenfolge bei Ein- und Auslagerungsvorgängen. Beides erleichtert die Spielzeitberechnung der RBG und der Shuttle-Fahrzeuge, da eine Unabhängigkeit der Gassen unterstellt werden kann. Innerhalb der gassenbezogenen Lagerstrategien unterscheidet das Entscheidungsmodell zwischen Einzelspielen (reine Ein- oder Auslagerspiele) und Doppelspielen.

Es wird davon ausgegangen, dass ein RBG stets zum E/A-Punkt zurückkehrt. Im Falle eines Shuttle-Systems beeinflusst die Wahl des Liftsystems die Spielart. Typischerweise werden Shuttle-Systeme, bei denen Behälterlifte zum Einsatz kommen, mit Einzelspielen betrieben, da pro Gasse je ein Lift für die Ein- und Auslagerung zur Verfügung steht. Shuttle-Systeme mit Fahrzeugliften werden hingegen typischerweise mit Doppelspielen betrieben, um den Leerfahrtenanteil zu reduzieren.

### 3.3.3 LAGERDIMENSIONIERUNG

Die Lagerdimensionierung spezifiziert die Maße des Lagers anhand der Parameter Länge, Höhe und Tiefe der eingesetzten Regale. Durch diese Parameter wird die Gesamtanzahl der Lagerstellplätze und somit die Kapazität des Lagers festgelegt. Um den Alternativenraum des Entscheidungsmodells zu beschränken, wird die Anzahl der Lagergassen, die von dem Modell erzeugt werden können, auf fünf beschränkt. Weiterhin werden nur Alternativen zugelassen, bei denen die Regalhöhe deren Breite nicht übersteigt.

Insgesamt ergibt sich aus der Kombination aller Ausprägungen der Teilgruppen Lagerkonfiguration, Lagerstrategie und Lagerdimensionierung ein Alternativenraum von 6075 Möglichkeiten für AKL- und 3150 Möglichkeiten für Shuttle-Systeme. Das Entscheidungsmodell wählt folglich basierend auf den individuellen Eingabedaten des Anwenders aus insgesamt 9225 Systemalternativen.

### 3.4 BEWERTUNG DER SYSTEMALTERNATIVEN IM ENTSCHEIDUNGSMODELL

Für die Bewertung der erzeugten Systemalternativen werden diese zunächst quantifiziert, also hinsichtlich Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung und Investition bestimmt. In der Anwendung des Modells werden die vom Anwender eingegebenen Systemanforderungen mit den quantifizierten Alternativen verglichen. Für jede potentiell mögliche Alternative wird geprüft, ob sie die Kriterien hinsichtlich *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl*, *Umschlagsleistung* sowie *Investitionshöhe* erfüllt. Ist dies der Fall, gilt sie als zulässige Alternative und wird in die Vorauswahl der in Frage kommenden Alternativen aufgenommen. Anschließend wird aus der Menge aller zugelassenen Alternativen für beide Systemvarianten (AKL- und Shuttle-System) gemäß folgender Logik für jedes der drei Kriterien die beste Alternative ausgewählt:

- *Lagergeometrie* – Wähle die Alternative, deren Stellplatzanzahl die als Input vorgegebenen Stellplatzanzahl am wenigsten übersteigt.
- *Umschlagsleistung* – Wähle die Alternative, die den größtmöglichen Durchsatz erzielt.
- *Investitionshöhe* – Wähle die Alternative mit den geringsten Investitionsausgaben.

Um zu einer abschließenden Bewertung zu kommen, werden zwei Verfahren eingesetzt, deren Ergebnisse dem Anwender auf der Benutzeroberfläche des Tools gleichzeitig angezeigt werden.

Die weniger komplexe Methode ist die reine Kriterien-Priorisierung: Der Anwender kann aus den drei Kriterien *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl*, *Umschlagsleistung* und *Investitionshöhe* das Kriterium auswählen, das für ihn

die höchste Priorität hat. Das Entscheidungsmodell bestimmt, wie oben beschrieben, sechs zulässige Systemalternativen, die jeweils die beste Ausprägung der drei Kriterien beider Systemvarianten verspricht. Ausgehend von der Priorisierung des Anwenders wählt das Entscheidungsmodell diejenige Systemalternative, die im paarweisen Vergleich am besten abschneidet.

Im zweiten Ansatz wird ein Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsfindung angewandt, dessen Vorgehen an den Analytic Hierarchy Process (AHP) angelehnt ist. AHP ist ein Verfahren, das bei einer begrenzten Anzahl an Alternativen (diskreter Lösungsraum) die Möglichkeit bietet, die Gewichtung der Kriterien aufgrund eigener Präferenzen und Bedingungen abzuleiten [Saa12].

Das Vorgehen gliedert sich in drei Schritte, die wie folgt ablaufen: Im ersten Schritt wird ein ganzheitlicher Vergleich zwischen den drei Bewertungskriterien *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl*, *Umschlagsleistung* und *Investitionshöhe* vorgenommen. Hierbei kann der Anwender paarweise für alle Bewertungskriterien auf einer diskreten Skala festlegen, ob ein Kriterium gegenüber den jeweils anderen Kriterien „gleichbedeutend“, „etwas bedeutender“, „deutlich bedeutender“ oder „absolut dominierend“ ist. Hieraus resultieren Gewichte, die die Bedeutung der drei Bewertungskriterien repräsentieren.

Im zweiten Schritt erfolgt ein ganzheitlicher Vergleich der drei ausgewählten Alternativen jeweils in Bezug auf ein isoliert betrachtetes Bewertungskriterium. Als Ergebnis erhält man neun weitere Gewichte, die die Allokation zwischen den Bewertungskriterien und den einzelnen Alternativen angeben. Diese Gewichte repräsentieren die Einschätzung des Anwenders, wie gut eine Alternative hinsichtlich der Bewertungskriterien zu beurteilen ist.

Im dritten Schritt der AHP-Methode werden die beiden vorangegangenen Schritte zusammengeführt, indem für jede Alternative eine gewichtete Summe gebildet wird, die die im ersten und im zweiten Schritt ermittelten Gewichte miteinander verknüpft. Die beste Alternative ist diejenige mit dem größten Ergebniswert.

## 4 BEWERTUNGSBEISPIEL

In diesem Abschnitt werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse des Entscheidungsmodells exemplarisch an einem praxisnahen Beispiel vorgestellt.

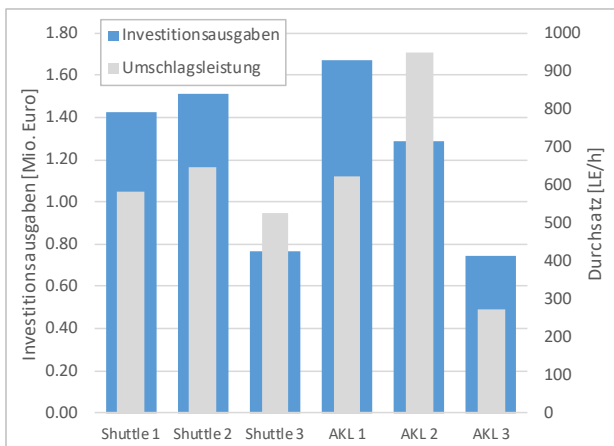


Abbildung 3: Vergleich der durch das Entscheidungsmodell bestimmten Systemalternativen (Eigene Darstellung). Dargestellt sind nur die beiden Kriterien Umschlagsleistung und Investitionsausgaben, da sich die Systemalternativen im Kriterium Stellplatzanzahl nicht signifikant voneinander unterscheiden.

#### 4.1 EINGABEDATEN

Als Input in das Modell werden die folgenden Anforderungen eingegeben:

- Behältergröße: Standardisierter R-KLT
- Stellplatzanzahl: 8.000
- Minimale Umschlagsleistung beim Doppelspiel: 200 LE/h
- Maximale Gebäudemaße:
  - Länge (x-Richtung): 100m
  - Höhe (y-Richtung): 20 m
  - Breite (z-Richtung): 30 m
- Maximale Investition: 3.000.000 €

#### 4.2 AUSWAHL EINER SYSTEMALTERNATIVE DURCH DAS MULTIKRITERIELLE ENTSCHEIDUNGSMODELL

Das Entscheidungsmodell bestimmt zunächst für die beiden Systemvarianten die Menge der aus den eingegebenen Anforderungen zulässigen Systemalternativen. Im vorliegenden Beispiel ergeben sich 499 zugelassene AKL- und 166 zugelassene Shuttle-Systeme.

Aus den zugelassenen Varianten werden jeweils die drei Alternativen ausgewählt, die den drei Kriterien Lagergeometrie und Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung und Investitionshöhe nach der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Bewertung am besten genügen (siehe Abbildung 3). Diese

	Lagergeometrie	Umschlagsleistung	Invest	Gewicht
Lagergeometrie	1.00	0.33	0.20	11%
Umschlagsleistung	3.00	1.00	0.33	26%
Investition	5.00	3.00	1.00	63%

Tabelle 1: Gewählte Gewichte in der AHP-Methode

insgesamt sechs Systemalternativen werden für die Anwendung der AHP-Methode gespeichert.

Für die reine Kriterien-Priorisierung werden die ausgewählten Systemalternativen jeweils paarweise miteinander verglichen und dem Anwender wird diejenige Alternative als Handlungsalternative empfohlen, die in dem gewählten Kriterium den besseren Ergebniswert aufweist. In dem vorliegenden Anwendungsfall wird beispielsweise bei der Priorisierung des Kriteriums Umschlagsleistung das AKL-System 2 empfohlen. Hierbei handelt es sich um ein einfachtiefes AKL-System mit drei Lastaufnahmemitteln pro Regalbediengerät. Das zugehörige Lagersystem besteht aus fünf Regalgassen mit jeweils 30 x 30 Fächern. Als Investitionsausgaben müssen für das System etwa 1,3 Mio. Euro veranschlagt werden.

Bei der Anwendung der AHP-Methode hat der Anwender die Möglichkeit, einzelne Kriterien gegenüber den anderen zu gewichten und ihnen hierdurch eine höhere Bedeutung zuzuweisen. Als Grundlage für die Methode dienen die drei durch die Kriterien-Priorisierung ausgewählten Systemalternativen. In dem vorliegenden Beispiel werden zwei AKL-Systeme (höchste Umschlagsleistung aller Alternativen bei AKL-System 2 und geringste Investitionsausgaben bei AKL-System 3) mit einem Shuttle-System (passendste Stellplatzanzahl bei Shuttle-System 1) verglichen.

Im vorliegenden Beispiel werden die Investitionsausgaben als „sehr viel bedeutender“ (Gewichtungsfaktor 5) als die Lagergeometrie und „etwas bedeutender“ (Gewichtungsfaktor 3) als die Umschlagsleistung eingeschätzt. Die Umschlagsleistung wiederum wird als „etwas bedeutender“ als die Lagergeometrie angesehen. Für die jeweiligen Gegeneinschätzungen wird der zugehörige reziproke Wert verwendet (siehe Tabelle 1). Aus der Kombination der gewählten Gewichtungen lässt sich über eine Normierung das Gewicht des gesamten Kriteriums berechnen. In diesem Beispiel kommt den Investitionsausgaben eine hohe Entscheidungsrelevanz zu.

Anschließend werden die drei Systemalternativen hinsichtlich der Ausprägungen der jeweiligen Kriterien miteinander verglichen. Hierbei liegt der Fokus stets auf jeweils einem der Bewertungskriterien. Beispielsweise besitzt das AKL-System mit der geringsten Investition (AKL 2) eine etwas größere (und hierdurch unpassendere) Stellplatzanzahl als das Shuttle-System 1. Aus der Gesamtheit der Bewertungen können wiederum die einzelnen Gewichte der Alternativen bestimmt werden (siehe Tabelle 2).

		Shuttle 1	AKL 2	AKL 3	Gewicht
Stellplatzanzahl	Shuttle 1	1.00	3.00	1.00	43%
	AKL 2	0.33	1.00	0.33	14%
	AKL 3	1.00	3.00	1.00	43%
Umschlagsleistung	Shuttle 1	1.00	0.33	3.00	26%
	AKL 2	3.00	1.00	5.00	63%
	AKL 3	0.33	0.20	1.00	11%
Investitionsausgaben	Shuttle 1	1.00	2.00	0.14	16%
	AKL 2	0.50	1.00	0.20	11%
	AKL 3	7.00	5.00	1.00	73%

Tabelle 2: Ganzheitlicher Vergleich der Alternativen in der AHP-Methode

In dem letzten Schritt der AHP-Methode werden die errechneten Gewichte der beiden vorherigen Schritte miteinander kombiniert (siehe Tabelle 3). Hierzu werden die im zweiten Schritt ermittelten Gewichte der Systemalternativen mit den Gewichten der in Schritt 1 bestimmten Gewichte der Kriterien multipliziert und summiert. Es ergibt sich für die drei Systemalternativen jeweils ein Ergebniswert. Diejenige Alternative mit dem höchsten Ergebniswert wird durch die AHP-Methode als umzusetzende Alternative empfohlen. In dem vorliegenden Beispiel ist dies das AKL-System 3.

Bei der durch die AHP-Methode empfohlene Handlungsalternative handelt es sich um ein vierfachtieferes AKL-System und drei Lastaufnahmemittel (LAM) pro Regalbediengerät (RBG). Als zugehöriges Lagersystem werden zwei Regalgassen mit jeweils 50 Spalten und 10 Zeilen gewählt. Für das System müssen Investitionsausgaben in Höhe von knapp 745.000 Euro veranschlagt werden. Die durch das Entscheidungsmodell gefundene Handlungsalternative deckt sich mit der Lösung, die für die verwendeten Eingabedaten in der Praxis umgesetzt worden ist.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung eines statischen Entscheidungsmodells, das den Anwender im Entscheidungsprozess für ein automatisches Kleinteilelager (AKL) unterstützt. Dieser sieht sich während des Planungsprozesses mit der Frage konfrontiert, ob das AKL mit einem klassischen RBG oder einem Shuttle-System betrieben werden soll. Beide Technologien kommen in AKL-Systemen zum Einsatz und zeichnen sich durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren und deren gegenseitige Abhängigkeiten aus, wodurch der Entscheidungsprozess von dem Erfahrungswissen und der persönlichen Einschätzung des Planers abhängig ist. Das in diesem Beitrag entwickelte Entscheidungsmodell beinhaltet die Wahl der passenden Automatisierungstechnik und gibt dem Anwender eine Handlungsempfehlung, ob das AKL mit Regalbediengeräten oder Shuttle-Fahrzeugen betrieben werden soll.

Das entwickelte Entscheidungsmodell ist in der Grobplanungsphase eines allgemeinen Planungsprozesses zuge-

		Lagergerometrie	Umschlagsleistung	Invest	Ergebnis
Gewicht		11%	26%	63%	
Shuttle 1		0.43	0.26	0.16	21%
AKL 2		0.14	0.63	0.11	25%
AKL 3		0.43	0.11	0.73	54%

Tabelle 3: Auswahl einer Systemalternative in der AHP-Methode

ordnet und setzt sich aus fünf Schritten zusammen, die sequentiell durchlaufen werden. Dabei wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, das Modell, dessen Funktionsweise und die zugrundeliegenden Auswahlkriterien zu beeinflussen. Durch die Kombination der Ausprägungsformen der Lagerkonfiguration, Lagerstrategie und Lagerdimensionierung kann das Entscheidungsmodell aus insgesamt 9225 Systemalternativen zur Erzeugung von RBG- oder Shuttle-Systemen wählen.

Um die erzeugten Varianten miteinander vergleichen zu können, werden die Bewertungskriterien *Lagergeometrie und Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung und Investitionshöhe* definiert, für die das Modell je einen Zielwert berechnet. Die Ergebnisse werden in eine Rangordnung gebracht. Bei der abschließenden Empfehlung des Entscheidungsmodells werden persönliche Präferenzen des Anwenders berücksichtigt.

Das beschriebene Modell stellt einen ersten Ansatz dar, den Entscheider in Bezug auf die Wahl der passenden Automatisierungstechnik zu unterstützen. Der direkte Vergleich zwischen einem klassischen AKL-System mit Regalbediengeräten und einem Shuttle-System wird hiermit erstmals ermöglicht. Das Modell berücksichtigt eine Vielzahl an qualitativen und quantitativen Faktoren, die einerseits als Freiheitsgrade bei der Erzeugung der Alternativen berücksichtigt werden und andererseits in die Berechnung der Bewertungskriterien einfließen.

Trotz der großen Anzahl betrachteter Systemalternativen deckt das Entscheidungsmodell nur einen kleinen Teil der in der Praxis eingesetzten Ausprägungsformen von AKL ab. Insbesondere für Shuttle-Systeme sind zahlreiche weitere Systemvarianten denkbar, die für die Entscheidungsfindung relevant sein können. Die Aufnahme weiterer Kriterien in das Modell ist denkbar, erhöht jedoch die Komplexität der Berechnungen der zugrundeliegenden Leistungsparameter, was wiederum der Anforderung der einfachen Handhabbarkeit des Modells entgegensteht.

Potential zur Weiterentwicklung des Entscheidungsmodells ergibt sich insbesondere durch die Berücksichtigung stochastischer und dynamischer Einflüsse. Dies beinhaltet relativ einfache Betrachtungen (z.B. mit der Aufnahme dynamischer Investitionsrechnungen in das Modell) oder komplexere Methoden, die stochastische Einflüsse bei der Berechnung des Durchsatzes und der Spielzeit berücksichtigen. Beides verspricht, die Prognosegenauigkeit des Entscheidungsmodells und hierdurch die Auswahl der empfohlenen Systemalternative weiter zu verbessern.



LITERATUR

- [Bar18] Barck, R. (2018). *Der Shuttle-Boom*. Verkehrs Rundschau, 2018 (33/34). München: Springer Fachmedien München GmbH.
- [Cie15] Cieplik, W. (2015). *Regalbediengerät oder Shuttle?* Logistik für Unternehmen, Ausgabe: Mai 2015 (S.30-31). Düsseldorf: VDI Fachmedien GmbH und Co. KG.
- [Gud10] Gudehus, T. (2010). *Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 4. Aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [Gün11] Günthner, W. A., T. Atz und A. Ulbrich (2011). *Integrierte Lagersystemplanung*. Forschungsbericht. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml).
- [Hep17] Heptner, K. (2017). *Shuttle gegen RBG*. Logistra, Heft 4. München: HUSS-VERLAG GmbH.
- [Huh14] Huhn, M. (2014). *Regalbediengerät oder Shuttle? Was besser ist, entscheidet der konkrete Anwendungsfall*. handling (industriell fertigen – systemisch lösen), 06/2014. Darmstadt: WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH.
- [Job13] Jobi, Boris Sebastian; Wehking, Karl-Heinz (2013): *Rechnergestützte Planung von Distributionszentren durch Einsatz der Graphentheorie*. Logistics Journal, Vol. 2013
- [Jün15] Jüngling, H. J. (2015). *Totgesagte stapeln länger: Regalbediengeräte nach wie vor im Gespräch*. Technik und Einkauf, 01/2015. Landsberg: verlag moderne industrie GmbH.
- [Mat19] Anwenderstatistik der materialfluss MARKT (2019), materialfluss.de, zuletzt aufgerufen am: 15.07.2019
- [Plo15] Plohr, C. (2015). *State of the Art der Handelslogistik – Betrachtung und Analyse aktueller Konzepte und Technologien*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Logistikmanagement. Bremen: Universität Bremen (Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für ABWL und Logistikmanagement).
- [Rod14] Roodbergen, Kees Jan; Vis, Iris F.A.; Taylor, G. Don (2014): *Simultaneous determination of warehouse layout and control policies*. In: International Journal of Production Research 53 (11), S. 3306–3326.
- [Saa12] Saaty, T. L. und L. G. Vargas (2012): *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. New York: Springer Science and Business Media.
- [Ten11] Ten Hompel, M., V. Sadowsky und M. Beck (2011). *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [VDI3630] VDI-Richtlinie 3630 (August 2006). *Automatische Kleinteilelager (AKL)*. Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI2692] VDI-Richtlinie 2692, Blatt 1 (März 2015). *Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten*. Verein Deutscher Ingenieure.

---

**Dr.-Ing. Katharina Fleischer-Dörr** hat Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) studiert und arbeitet seit 2014 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL). Katharina Fleischer-Dörr hat 2018 über die Spielzeitberechnung und Durchsatzanalyse von automatisierten Regalbediengeräten mit zweifachen Lastaufnahmemittel in doppeltiefen Lagern promoviert.

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL),  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe  
Fon: +49 721 608 48615, Fax: +49 721 608 48629  
E-Mail: [katharina.doerr@kit.edu](mailto:katharina.doerr@kit.edu)

**M.Sc. Christoph Jacobi** hat Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) studiert und ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) im Fachbereich Logistiksysteme. Die Forschungsschwerpunkte von Christoph Jacobi liegen in der Leistungsbewertung von Materialfluss- und Produktionsprozessen mittels zeitdiskreter bedientheoretischer Modelle.

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe  
Fon: +49 721 608 48626, Fax: +49 721 608 48629  
E-Mail: [jacobi@kit.edu](mailto:jacobi@kit.edu)

**M.Sc. Robin Hermann** hat Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) studiert und im Schwerpunkt Logistik vertieft. In seiner Masterarbeit hat Robin Hermann die Grundlage für den vorliegenden Beitrag gelegt.

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe  
Betreut durch: Dr.-Ing. Katharina Fleischer-Dörr  
E-Mail: [robin.hermann@student.kit.edu](mailto:robin.hermann@student.kit.edu)

**Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans** hat 1993 über die theoretische Behandlung von Materialflusspuffern in Bediensystemnetzwerken promoviert und 2000 über die bedientheoretischen Methoden als Hilfsmittel der Materialflussplanung habilitiert. Seit 2005 ist Kai Furmans Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL).

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe  
Fon: +49 721 608 48600, Fax: +49 721 608 48629  
E-Mail: [kai.furmans@kit.edu](mailto:kai.furmans@kit.edu)