

Methode zur Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit am Beispiel eines omnidirektionalen Fördersystems

Method for evaluating flexibility and changeability using the example of an omnidirectional conveyor system

Claudio Uriarte
Hendrik Thamer

Cellumation GmbH, Bremen, Germany

Bedingt durch das Wachstum des Onlinehandels und durch die starken Auswirkungen der Covid19-Pandemie, steigt das weltweite Paketvolumen stetig an, was Logistiker vor neuen Herausforderungen stellt. Herkömmliche Materialflusssysteme, die die Logistiker zur Bewältigung des Paketaufkommens verwenden, können allerdings nicht schnell an die verändernden Bedingungen angepasst werden. Hoch performante und flexible Materialflusssysteme bieten hier entscheidende Vorteile. Umfragen unter Anwendern und Herstellern von Materialflusssystemen stellen fest, dass die Bedürfnisse der Anwender nicht ausreichend befriedigt werden. Herstellern fehlen oft Werkzeuge, um die Flexibilitätsbedürfnisse der Anwender richtig zu identifizieren, zu quantifizieren und als Folge davon zu adressieren.

Im Rahmen dieses Beitrag wird daher eine Methode für die Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit von Materialflusssystemen vorgestellt. Diese soll den Herstellern helfen, die Flexibilität und Wandelbarkeit von stationäre Materialflusssystemen zu messen und gezielt zu erhöhen, mit dem Ziel die Flexibilitätsbedürfnisse der Kunden besser zu adressieren. Die Methode wird mit der Entwicklung eines eigenes Fördersystem validiert.

[Schlüsselwörter: Flexibilität, Wandelbarkeit, hochflexible Materialflusssysteme]

The increase in parcel volume due to the growth of online retailing, and most recently exacerbated by the Covid19 pandemic, pose new challenges for logistics providers. Conventional material flow systems, which are used by logistics providers, cannot be adapted quickly enough to the changing conditions. High-performance and flexible material flow systems offer decisive advantages here. Surveys among users and manufacturers show that users' needs are not being adequately met. Manufacturers of material handling systems lack often tools to properly identify, quantify as well as address the flexibility needs of users.

In this paper a method for the evaluation of the flexibility and changeability of material handling systems is presented, which should help manufacturers to measure and increase the flexibility and changeability of stationary material handling systems with the goal to better address the needs of the customers. The method is validated with the development of an own conveyor system.

[Keywords: Flexibility, Changeability, highly flexible material flow system]

1 EINLEITUNG

Das Thema dieses Beitrages leitet sich aus der zunehmenden Globalisierung ab, die zu einer Verschiebung des Wettbewerbs von einer lokalen auf eine globale Ebene führt. Die Teilung der Produktions- und Absatzmärkte führt zu einer Erhöhung des Warentransports von Asien nach Europa auf Containerebene. Die Änderung im Kaufverhalten der Konsumenten, bei dem Produkte immer weniger lokal bzw. regional, sondern überregional und international gekauft werden, führt zu einer Steigerung des Transportaufkommens auf Sendungsebene, wobei gleichzeitig der Durchschnittswert der einzelnen Sendungen sinkt [Hah10, Sho15]. Hiervon betroffen sind nicht nur E-Commerce-Unternehmen, sondern auch KEP-Dienstleister, die diese Sendungen transportieren müssen.

1.1 BEDARF UND ANFORDERUNGEN AN MODERNE MATERIALFLUSSSYSTEME

Der Bedarf an hochflexiblen Materialflusssystemen ist von der Wissenschaft identifiziert worden und es wurden bereits entsprechende Begriffe und Methoden zur Bewertung erarbeitet. So wurde die Flexibilität in vier Teilbereiche unterteilt [Hei06, Chi10]: Die Fähigkeit eines Systems sich auf Veränderungen in der räumliche Gegebenheiten und Transportwegen anpassen zu können (Layoutflexibilität), die Möglichkeit logistischen Prozesse mit minimalen Aufwand zu verändern (Prozessflexibilität), die Fähigkeit

unterschiedlichen Produkten unabhängig vom Gewicht und Abmessungen transportieren zu können (Fördergutflexibilität) sowie die Fähigkeit eines System an Leistungsänderungen in der Produktion anpassen zu können (Durchsatzflexibilität).

Weiterhin muss ein Materialflusssystem auf alle ungeplanten Situationen reagieren können, um wandelbar zu sein. Dies ist nur durch eine vollständige Erfüllung der Flexibilität bei Entstehung der Anlage möglich, was jedoch in den meisten Fällen unwirtschaftlich wäre. Durch die Erweiterung mit systemeigenen Komponenten (Erweiterungsfähigkeit) und die Integration von systemfremden Komponenten (Integrationsfähigkeit) kann die Wandelbarkeit in einem wirtschaftlichen Rahmen erreicht werden.

Der Bedarf an hochflexiblen Materialflusssystem ist Bestandteil von mehreren Untersuchungen und Umfrage gewesen [Hom06, Tre14, IWL16]. Den Herstellern von Materialflusssystemen ist dieser Bedarf an flexiblen und wandelbaren Systemen bewusst und sie betrachten die Kundenbedürfnisse als höchste Priorität bei der Entwicklung neuer Systeme. Aus Anwendersicht werden diese Bedürfnisse nicht ausreichend adressiert, was eine Diskrepanz zwischen den unterschiedlichen Erwartungen zeigt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass den Herstellern Werkzeuge dafür fehlen, die Wünsche der Fördertechnikanwender zu erfassen, um die Bedürfnisse in technische Lösungen umzusetzen. Ziel dieses Beitrages ist genau diese Situation zu adressieren und ein Tool anzubieten, mit dem die Hersteller Materialflusssysteme gezielt weiterentwickeln können, um die Flexibilitätsbedürfnisse der Anwender zu befriedigen.

1.2 BEISPIELE VON HOCHFLEXIBEL MATERIALFLUSSSYSTEMEN

Die Literatur hat gezeigt, dass viele Vorarbeiten aufseiten der Industrie und Wissenschaft unternommen wurden, stationäre Materialflusssysteme zu entwickeln, die eine erhöhte Flexibilität aufweisen. Bisherige Arbeiten folgten zum einen den Ansätzen der Modularisierung sowie dem Ansatz der dezentralen Steuerung. Es finden sich auch Systeme, die auf kleinskaligen Modulen basieren, wohingegen andere Sonderentwicklungen großskalige Module bevorzugen. Unter kleinskaligen Modulen werden fördertechnische Komponenten/Module verstanden, die kleiner sind als das zu transportierende Fördergut. Einige Systeme kombinieren zwei oder mehrere dieser Kategorien, um eine hohe Flexibilität zu erreichen. Zu den hochflexiblen Materialflusssystemen zählen: Flexible Transfer System [Fuk99], Magic Carpet [Oyo00], Flexförderer [May09], Wandelbare autonome Verteilereinrichtung – WAVE [Ger11], Karis und Karis Pro [Nob10, IFL16], Cognitive Conveyor [Ove10], Motion Cube [Fes15], THINGtelligent [Lan17], Plug&Carry Light Load [Boa16], Magic Stage Device [Ito18] und Visicon [Sie21].

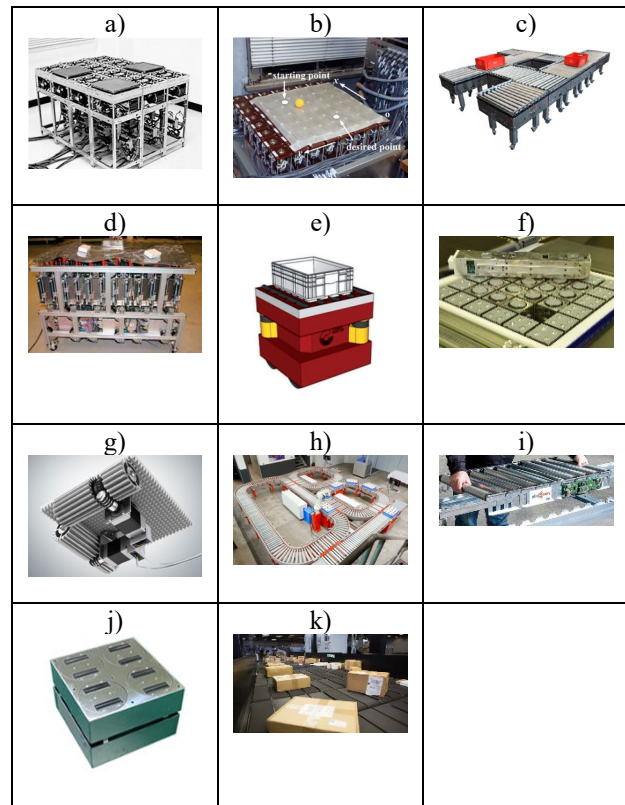


Abbildung 1. a) Flexible Transfer System, b) Magic Carpet, c) Flexförderer, d) Wandelbare autonome Verteilereinrichtung – WAVE, e) Karis und Karis Pro, f) Cognitive Conveyor, g) Motion Cube, h) THINGtelligent, i) Plug&Carry Light Load, j) Magic Stage Device, k) Visicon.

Obwohl diese Systeme offensichtlich einen Beitrag in diese Richtung leisten, ist keines davon mit einer Entwicklungsmethode konzipiert worden, welche die gezielte Steigerung von Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten ermöglicht. Auch bei den Weiterentwicklungen ist keine entsprechende Methode verwendet worden.

1.3 METHODEN ZUR BEWERTUNG DER FLEXIBILITÄT VON MATERIALFLUSSSYSTEM

Die Notwendigkeit des Vergleichs von unterschiedlichen Materialflusssystemen basierend auf deren Flexibilität ist auch Bestandteil von wissenschaftlichen Arbeiten gewesen. Hier sind insbesondere zwei Methoden vorgeschlagen worden, die eine Quantifizierung der Flexibilität eines Systems ermöglichen.

Bei der Methode von Heinecker [Hei06] werden die einzelnen Teilflexibilitäten in Klassen unterteilt und durch eine Kennzahl beschrieben, die die jeweilige Teilflexibilität quantifiziert. Materialflusssysteme werden dann je nach Eigenschaften einer Klasse zugeordnet, sodass ein Flexibilitätsvergleich zwischen den Materialflusssysteme möglich ist. Ergänzend wird eine Liste mit Maßnahmen erstellt, die unter Umständen zu einer Flexibilitätserhöhung führen könnte.

Nopper stellt eine Methode zur Bewertung der Effizienzgewinnung durch die Erhöhung der Flexibilität von selbstorganisierten Materialflusssystemen vor [Nop11]. Der Ansatz nutzt die Methoden der Investitionsrechnung und basiert auf der Betrachtung der Änderungen in den Auszahlungen des Systems während seines Lebenszyklus. Für die Bewertung werden messbare Größen für die Durchsatz-, Layout- und Fördergutflexibilität identifiziert und gezielt geändert. Für jede Variante werden die kumulierten Auszahlungen über den Lebenszyklus bewertet und miteinander verglichen. Das System mit den höchsten Auszahlungen wird als das flexibelste bewertet. Beide Methoden bieten ein gutes Werkzeug mit dem Anwender die Flexibilität von unterschiedlichen Systemen bewerten und vergleichen können. Sie berücksichtigen jedoch nur drei der vier Teilflexibilitäten, wodurch die Multifunktionalität (Prozessflexibilität) unberücksichtigt bleibt. Zudem bieten beide Methoden den Herstellern wenig Feedback für die Entwicklung und Weiterentwicklung von hochflexiblen Materialflusssystemen.

2 METHODE ZUR BEWERTUNG DER FLEXIBILITÄT STATIONÄRER FÖRDERTECHNIK

Um die Defizite dieser Bewertungsmethode zu adressieren und den Herstellern von Fördersystemen eine Möglichkeit anzubieten, mit der sie auf die Bedürfnisse ihrer Kunden besser eingehen können, wurde in diesem Beitrag eine Methode zur Untersuchung der Flexibilität bei der Entwicklung von hochflexiblen stationären Materialflusssystemen präsentiert..

2.1 ERMITTLUNG DER ZIELVORSTELLUNGEN

Die wissenschaftliche und Fachliteratur liefert keinen Leitfaden für die Entwicklung von hochflexiblen Materialflusssystemen. In der Fachliteratur und im Stand der Technik lassen sich jedoch eine Vielzahl an Handlungsempfehlungen bzw. Leitmotiven finden, die eine Weiterentwicklung und Optimierung der Systeme im Hinblick auf die genannten Kriterien ermöglichen sollen. Diese wurden als Zielvorstellungen definiert, die erfüllt werden sollen, um als flexibel gelten zu können. Es wird jedoch auf die Forcierung einer bestimmten Beziehung mit einer Teilflexibilität oder Wandelbarkeit verzichtet. So kann eine Zielvorstellung Auswirkungen auf eine oder mehrere Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten haben.

Für jede Zielvorstellung wurden objektive Kriterien definiert, die je nach Erfüllungsgrad eine bestimmte Punktzahl ergeben. Parallel zur Bestimmung der Zielvorstellungen muss die Frage beantwortet werden, wie diese bewertet werden. Aufgrund der Schwierigkeit bei der Messung der Zielvorstellungen wurde eine qualitative statt einer Quantitative Bewertung gewählt. Die Definition der Bewertungsskala wurde in Anlehnung an die VDI2225-Richtlinie realisiert [VDI2225], wobei in diesem Fall eine Punktzahl von 1 bis 5 vergeben werden. Sollten ein

Materialflusssystem nur die Mindestanforderungen der Zielvorstellung erfüllen erhält es einen Punkt, wird die Zielvorstellung ideal erfüllt bekommt das System 5 Punkte. Bei einigen Zielvorstellungen werden die Kriterien unabhängig voneinander gestaltet, sodass Materialflusssystemen mehrere der Kriterien erfüllen können. Hier ist eine Mehrfachauswahl der Kriterien möglich und die Bewertung des Grades der Erfüllung wird durch die Summe der einzelnen Punkte ermittelt. Bei anderen Zielvorstellungen werden die Kriterien aufbauend gestaltet, sodass ein niedriges Kriterium immer eine Untermenge eines höheren Kriteriums darstellt. Bei diesen Fragen mit aufbauenden Kriterien kann jedoch nur eine Wahl getroffen werden. Dieses Kriterium kumuliert die Punkte der unterrangigen Kriterien.

Es konnten folgende Zielvorstellungen identifiziert werden, von denen 2 beispielhaft in dem nächsten Kapitel beschrieben werden.

- Fördergutspektrum
- Freie Rotation
- Freie Translation
- Einstellbarkeit der Fördergeschwindigkeit
- Multifunktionalität
- Steuerungsarchitektur
- Erfassung der Fördergutposition
- Modularität
- Änderung des Anlagenlayouts
- Verkabelung
- Steuerungstechnische Schnittstellen
- Geringer Platzbedarf

2.1.1 BEISPIEL: FORM

Die Form ist definiert als die äußere plastische Gestalt mit bestimmten Umrissen, in der etwas erscheint. Der Transport von Fördergütern auf Fördertechnik ohne Hilfsmittel erfolgt durch kraftschlüssige Verbindung zwischen Transportmittel und Fördergut. Aus diesem Grund wird die Definition der Form auf die Unterseite der Fördergüter begrenzt.

Die Form lässt sich ihrerseits weiter unterteilen. Das Fördergut kann fest oder verformbar sein. Die Kontaktfläche mit der Fördertechnik kann flach, konkav oder konvex bzw. durchgehend (geschlossen) oder mit Unterbrechungen (teiloffen) sein. Komplett offene Unterflächen von Stückgut können in der Kategorie konkav betrachtet werden. Es ergeben sich für die Form folgende Zielvorstellungen:

Tabelle 1. Zielvorstellung der Form.

| Nr. | Zielvorstellung | Punkte |
|------|--|--------|
| 1. | Es können folgende Arten relevanter Fördergüter schadensfrei und ohne zusätzliche Hilfsmittel transportiert werden (Mehrfachwahl möglich). | |
| Form | a) Flach, fest, regulär | 1 |
| | b) Auflagefläche nach innen gekrümmt, konkav | 1 |
| | c) Auflagefläche nach außen gekrümmt, konvex | 1 |
| | d) Verformbar | 1 |
| | e) Fest, irregulär | 1 |

Besonders im Versandhandel müssen Fördersysteme unterschiedliche Produkte transportieren können (z. B. Boxen, Taschen, Tüten). Je größer die Anzahl an unterschiedlichen Verpackungstypen, die transportiert werden können, desto besser die Bewertung. Jeder Verpackungstyp gibt einen Punkt. Eine Mehrfachauswahl war möglich.

2.1.2 BEISPIEL: MULTIFUNKTIONALITÄT

Herkömmliche Materialflusssysteme verwenden hochspezialisierte Fördermittel, um spezifische Aufgaben zu realisieren. Sie sind in der Regel nicht in der Lage, Aufgaben abseits des ursprünglich geplanten Funktionsumfangs zu übernehmen. Im Kapitel 1 wurden diverse hochflexible Fördersysteme vorgestellt, die in der Lage sind, mehrere Funktionen auszuführen, ohne mechanisch angepasst werden zu müssen. Die Fähigkeit, mehrere Funktionen mit einem System zu erfüllen, bedingt, dass die drei Grundfunktionen eines hochflexiblen Materialflusssystems erfüllt werden: Rotation und Translation sowie Einstellung der Geschwindigkeit. Es folgt eine Liste der relevanten Förderfunktionen in steigender Komplexität:

Tabelle 2. Zielvorstellung der Multifunktionalität.

| Nr. | Zielvorstellung | Punkte |
|---------------------|---|--------|
| 7. | Das System ist in der Lage, folgende Förderfunktionen ohne mechanische Änderungen am System und ohne Kollisionen der Fördergüter durchzuführen (nur eine Wahl möglich). | |
| Multifunktionalität | a) Transportieren | 1 |
| | b) Stauen | 2 |
| | c) Vereinzeln | |
| | d) Ausrichten | 3 |
| | e) Zusammenführen | |
| | f) Verteilen | |
| | g) Orientierung ändern | 4 |
| | h) Speichern | |
| | i) Sequenzieren | |
| | j) Sortieren | |
| | k) Clustering | 5 |
| | l) Descrambling | |

Die Flexibilität eines Materialflusssystem steigt mit der Anzahl an möglichen fördertechnischen Funktionen, die das System realisieren kann. Ob eine Funktion realisiert werden kann, hängt von den Fähigkeiten eines Systems ab, die drei Grundfunktionen allein oder in Kombination zu erfüllen. So kann das Transportieren durch einfache Antriebe realisiert werden. Beim Stauen und Vereinzeln wird eine Geschwindigkeitsanpassung notwendig. Ausrichten, Zusammenführen und Verteilen wird durch die Veränderung der Förderrichtung realisiert. Eine Rotation oder Geschwindigkeitsanpassung ist in der Regel nicht notwendig. Beim Orientieren, Speichern, Sequenzieren und Sortieren

werden Kombinationen von zwei der drei Grundfunktionen benötigt. Beim Clustern (z. B. in Palettieranlagen) und Descrambling (z. B. bei Depalettieranlagen) sind alle drei Grundfunktionen notwendig. Die Punktevergabe ist inkrementell organisiert. Bei einem System, das mehrere Funktionen erfüllen kann, soll die Funktion gewählt werden, die die höchste Komplexität aufweist und somit die höchste Punktzahl gibt.

2.2 GEWICHTUNG DER ZIELVORSTELLUNGEN

Nutzwertanalysen bieten eine gute Möglichkeit, Systeme miteinander zu vergleichen. Durch die Verwendung von paarweisen Vergleichen für die Ermittlung der Gewichtung zwischen den Zielvorstellungen zeigen Nutzwertanalysen ein großes Potenzial an Subjektivität, welche die Validität der Methode gefährden würde. Um eine objektive Gewichtung zu gewährleisten, wurden die Zielvorstellungen mittels maschinellen Lernens gewichtet. Hierfür wurde eine online Umfrage realisiert. Zielgruppe waren Hersteller von Fördertechnik (insb. Entwickler), Anwender der Fördertechnik und sonstige Experten auf dem Gebiet Intralogistik und Materialflusssysteme. Ein großer Nachteil von Online-Umfragen liegt daran, dass diese eine große Abbruchrate ausweisen, wodurch die Validität der Abgebrochenen Umfrage sinkt. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurden die Fragen derart konzipiert, dass jede Frage an sich eine vollständig beantwortete Umfrage darstellt und individuell valide wird (Siehe Abbildung 1). Hierfür wurden zwei zufällig generierten Systeme basierend auf einer grafischen Darstellung von Zielvorstellungen präsentiert (Abbildung 2). Der Befragte wählte das flexibelste System nur auf Basis der Eigenschaften des Systems, ohne eine bildliche Darstellung von technischen Lösungen zu bekommen. Des Weiteren wurden einige Zielvorstellung, die eine enge Zusammenhang zueinander haben, in sogenannten Flexibilitätstreiber zusammengefasst (z.B. Form, Gewicht und Größe zu Fördergutspektrum), mit dem Ziel die Übersichtlichkeit der Fragen zu steigern. Die Umfrage wurde von 34 Teilnehmern beantwortet, die insgesamt 235 gültige Datensätze lieferten.

| Treiber der Flexibilität | System A | Ausprägung der Flexibilität | System B | Treiber der Flexibilität |
|-------------------------------------|----------|-----------------------------|----------|-------------------------------------|
| Fördergutspektrum | 4 | | 2 | Fördergutspektrum |
| Freie Rotation | 2 | | 5 | Freie Rotation |
| Freie Translation | 4 | | 2 | Freie Translation |
| Einstellbarkeit der Geschwindigkeit | 4 | | 2 | Einstellbarkeit der Geschwindigkeit |
| Erfassung der Fördergutsposition | 5 | | 5 | Erfassung der Fördergutsposition |
| Multifunktionalität | 2 | | 3 | Multifunktionalität |
| Steuerungsarchitektur | 1 | | 4 | Steuerungsarchitektur |
| Modularität | 4 | | 4 | Modularität |
| Nachträgliche Layoutanpassung | 5 | | 1 | Nachträgliche Layoutanpassung |
| Geringer Platzbedarf | 1 | | 3 | Geringer Platzbedarf |

Abbildung 2. Vergleich von zwei Systemen innerhalb einer Frage [eigene Darstellung]

Ziel der Umfrage war die Gewichtung der Zielvorstellungen für die Nutzwertanalyse der Bewertungsmethode. Um eine Gewichtung aus den gültigen beantworteten Fragen abzuleiten, das Rankingalgorithmus SVMAttributeEval verwendet. Diese lieferte für jede Flexibilitätstreiber ein sog. Mehrwert in der Skala 1 bis 10. Je höher der Mehrwert, desto wichtiger ist dieser Flexibilitätstreiber für die

Bestimmung der Flexibilität eines Systems für die Befragten. Die Werte sind außerdem mit einer Toleranz versehen, in der der Mehrwert schwankt. Bei dem Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Materialflusssystemen waren die freie Bewegung von Fördergütern gefolgt von einem breiten Fördergutspektrum die ausschlaggebendsten Kriterien. Die Toleranz beider Attribute betrag hier null, wodurch geschlossen werden kann, dass alle Befragten diese ähnlich bewertet haben. An der dritten Stelle und mit einer relativ geringen Toleranz befand sich die Multifunktionalität des Materialflusssystem gefolgt von der Erfassung der Fördergutposition. Die weiteren Flexibilitätstreiber bekamen eine geringere Gewichtung (Siehe Abbildung 3).

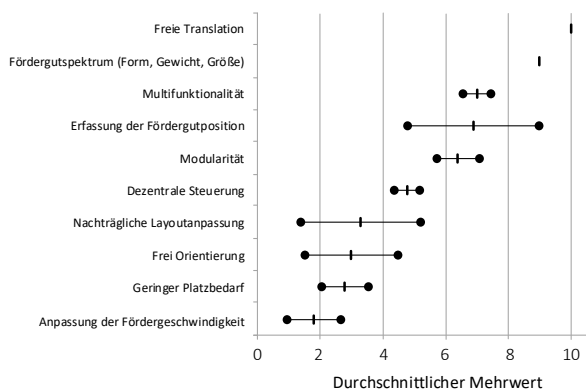


Abbildung 3. Ranking der der Flexibilitätstreiber nach SVMAttributeEval [eigene Darstellung]

Durch die Normalisierung des Mehrwerts des Rankers kann direkt die Gewichtung der Flexibilitätstreiber ermittelt werden. Diese beinhalten jedoch noch die gruppierten Zielvorstellungen, für dessen Rückumwandlung in vereinzelt Zielvorstellungen ein klassischer Paarweise-Vergleich verwendet wurde (Tabelle 3).

Es besteht nicht immer ein Eins-zu-eins-Verhältnis zwischen einer Zielvorstellung und einer Teilflexibilität oder Wandelbarkeit. Vielmehr beeinflusst eine Zielvorstellung in der Regel mehrere Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten. Eine Eins-zu-eins-Beziehung ist eher eine Ausnahme. Es gilt nun die Gewichtung der Zielvorstellungen auf die Teilflexibilitäten und die Wandelbarkeit zu übertragen. Hierfür wird die Annahme getroffen, dass eine Zielvorstellung, die mehrere Teilflexibilitäten oder Wandelbarkeiten beeinflusst, dies für alle gleichermaßen macht (Tabelle 4 mitte). Die Gewichtung wird nun gruppenbasiert erneut normalisiert (Tabelle 4 rechts), um den Einfluss der einzelnen Zielvorstellungen auf die jeweiligen Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten zu ermitteln.

Tabelle 3. Gewichtung der vereinzelt Zielvorstellungen.

| Ermittlung der Gewichtung der einzelnen Zielvorstellungen | | | | |
|---|--------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| Gruppierte Zielvorstellung aus der Umfrage | Gewichtung aus Ranker (normalisiert) | | Vereinzelt Zielvorstellung | Gewichtung aufgeteilt (normalisiert) |
| Freie Translation | 0,182 | → | Freie Translation | 0,1820 |
| Fördergutspektrum | 0,164 | ↙ | Form | 0,0729 |
| | | → | Gewicht | 0,0182 |
| | | ↘ | Größe | 0,0729 |
| Multifunktionalität | 0,128 | → | Multifunktionalität | 0,1280 |
| Erfassung der Fördergutposition | 0,126 | → | Erfassung der Fördergutposition | 0,1260 |
| Modularität | 0,116 | ↙ | Modularität | 0,0516 |
| | | → | Verkabelung | 0,0129 |
| | | ↘ | Steuerungstechnische Schnittstellen | 0,0516 |
| Steuerungsarchitektur | 0,087 | ↙ | Steuerungsarchitektur (Durchsatzflexibilität) | 0,0218 |
| | | ↘ | Steuerungsarchitektur (Layoutflexibilität) | 0,0653 |
| Nachträgliche Layoutanpassung | 0,060 | → | Nachträgliche Layoutanpassung | 0,0600 |
| Frei Rotation | 0,054 | → | Frei Rotation | 0,0540 |
| Geringer Platzbedarf | 0,051 | → | Geringer Platzbedarf | 0,0510 |
| Anpassung der Fördergeschwindigkeit | 0,033 | → | Anpassung der Fördergeschwindigkeit | 0,0330 |
| Summe | 1,000 | | | 1,0000 |

Tabelle 4. Übertragung der Gewichtung der Zielvorstellungen auf die Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten.

| Vereinzelt Zielvorstellung | Anteil in Ranking normalisiert gesplittet | Ranking normalisiert gesplittet verteilt auf | | | | | Gewichtung (normalisiert) | | | | | |
|---|---|--|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| | | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit |
| Freie Translation | 0,1820 | | | | | | | | | | | |
| Form | 0,0729 | | 0,073 | | | | | 0,370 | | | | |
| Gewicht | 0,0182 | | 0,018 | | | | | 0,092 | | | | |
| Größe | 0,0729 | | 0,073 | | | | | 0,370 | | | | |
| Multifunktionalität | 0,1280 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | | | 0,347 | 0,700 | 0,233 | | | |
| Erfassung der Fördergutposition | 0,1260 | | | 0,126 | | | | | 0,220 | | | |
| Modularität | 0,0516 | 0,052 | | | 0,052 | | 0,140 | | | | 0,800 | |
| Verkabelung | 0,0129 | 0,013 | | | 0,013 | | 0,035 | | | | 0,200 | |
| Steuerungstechnische Schnittstellen | 0,0516 | | | | 0,052 | | | | | 0,119 | | 1,000 |
| Steuerungsarchitektur (Durchsatzflexibilität) | 0,0218 | 0,022 | | | 0,052 | | | | | | | |
| Steuerungsarchitektur (Layoutflexibilität) | 0,0653 | 0,065 | | | | | 0,177 | | | | | |
| Änderung des Anlagelayouts | 0,0600 | 0,060 | | | | | 0,163 | | | | | |
| Frei Rotation | 0,0540 | | | 0,054 | | | | | | 0,094 | | |
| Geringer Platzbedarf | 0,0510 | 0,051 | | 0,051 | | | 0,138 | | | 0,089 | | |
| Anpassung der Fördergeschwindigkeit | 0,0330 | | 0,033 | 0,033 | | | | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | |
| Summe | 1,0000 | 0,369 | 0,183 | 0,197 | 0,574 | 0,064 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Das gewichtete Beziehungsdiagramm in Abbildung 4 fasst die Ergebnisse dieses Kapitels zusammen. Die einzelnen Zielvorstellungen werden mit den von ihnen beeinflussten Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten mittels einer durchgehenden Linie verbunden. Die Stärke und Farbe der Linie stellt die Stärke der Beziehung dar. Der Anwender der Methode soll bei der Entwicklung oder Weiterentwicklung von hochflexible Materialflusssysteme die Wechselwirkungen stets berücksichtigen, um eventuelle Fallstricke zu vermeiden oder mögliche Synergien auszunutzen.

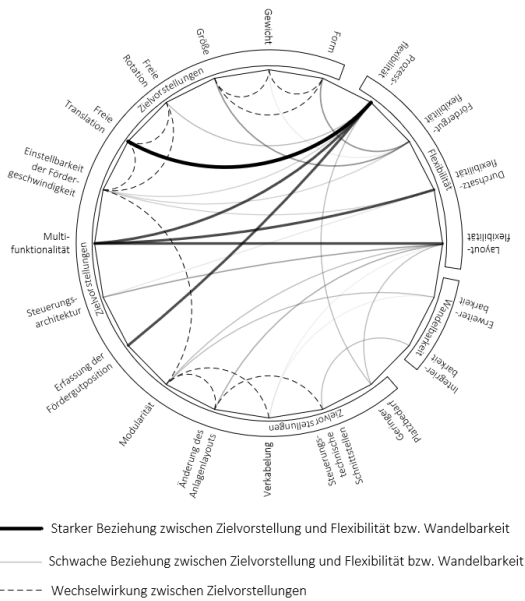


Abbildung 4. Gewichtetes Beziehungsdiagramm für die Zielvorstellungen und Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten [eigene Darstellung]

3 VALIDIERUNG DER METHODE

Mit der Definition der Gewichtung der einzelnen Zielvorstellungen und der Zuordnung der Gewichtung auf die Teilflexibilitäten und Wandelbarkeit ist die Erstellung des Modells abgeschlossen. Um die Anwendbarkeit und Richtigkeit der Bewertungsmethodik nachzuweisen, wurde die Methode in zwei Schritten validiert. Als Erstes wurde die Bewertungsmethode in die Entwicklungs- und Konstruktionsmethode der VDI2221 integriert, um den Herstellern die neue Methode im Kontext einer formellen methodischen Entwicklung anbieten zu können. In einem zweiten Schritt wurde die Bewertungsmethode rekursiv auf ein hochflexibles Materialflusssystem – den celluveyor – angewendet.

3.1 ANWENDUNG DER METHODE

Die Anwendung der Methode erfolgt innerhalb von vier Schritten, die in Abbildung 5 gezeigt sind. In einem ersten Schritt wird das Materialflusssystem nach den Kriterien der Zielvorstellungen bewertet. Im Beispiel erfüllt das System die Kriterien der Zielvorstellung Modularität sehr gut, jedoch nicht ideal und bekommt dafür 4 Punkte. In einem zweiten Schritt wird die Punktzahl der jeweiligen Bewertungen mit der Gewichtung der Zielvorstellung für eine bestimmte Teilflexibilität oder Wandelbarkeit multipliziert und liefert somit die gewichtete Bewertung. Dieser Schritt wird für alle Gewichtungen gemacht. Im Beispiel hat die Modularität Einfluss auf die Layoutflexibilität und Erweiterbarkeit. Die Erweiterbarkeit wird mit 0,8 gewichtet und ergibt eine gewichtete Bewertung von 3,2. In einem dritten Schritt werden für alle Teilflexibilitäten und Wandelbarkeiten die Werte addiert und am Ende der Tabelle

eingetragen. In unserem Beispiel erhält das Materialflusssystem eine Gesamtbewertung von 4,00 Punkten für die Erweiterbarkeit. Abschließend werden die Werte der Layout-, Durchsatz-, Fördergut- und Prozessflexibilität zu der Flexibilität addiert. Die Wandelbarkeit wird durch die Addition der Werte der Integrierbarkeit und Erweiterbarkeit ermittelt. In unserem Beispiel ergeben sich für die Flexibilität 17,69 von einem Maximum von 24 Punkten und für die Wandelbarkeit 9,00 von einem Maximum von 12 Punkten. Die Gesamtflexibilität bezeichnet die Addition der Flexibilität und Wandelbarkeit n und in unserem Beispiel 26,69 von einem Maximum von 36 Punkten.

| Nr. | Zielvorstellung | Systembewertung Zelluveyor Gen 3 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Zelluveyor Gen 3 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------|--|------|--|------|--|
| | | | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | | | | | | |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | | 0,937 | | | | | | 3,748 | | | | | | | | |
| 1 | Form | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 2 | Gewicht | 5 | | 0,692 | | | | | | | 0,46 | | | | | | | | | |
| 3 | Größe | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 7 | Multi-funktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | 0,223 | | | 1,74 | 3,50 | 1,11 | | | | | | | | | | |
| 16 | Modularität | 4 | 0,40 | | 0,220 | | 0,80 | 0,56 | | | 1,10 | | | | | | | | | |
| 12 | Modularität | 4 | 0,035 | | 0,200 | | 0,14 | | | | 0,80 | | | | | | | | | |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | 1,000 | | | | | | 5,00 | | | | | | | | |
| 8 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,119 | | | | | | | 0,60 | | | | | | | | | | |
| 8.2 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,177 | | | | | | | 0,71 | | | | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagenaufbaus | 4 | 0,163 | | | | | | | 0,65 | | | | | | | | | | |
| 4 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | | 0,47 | | | | | | | | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 5 | 0,138 | | 0,089 | | | 0,69 | 0,90 | 0,84 | | 0,44 | | | | | | | | |
| 6 | Integrierbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | | 0,33 | 0,28 | 0,29 | | 0,29 | | | | | | | | |
| Flexibilität | | | 4,49 | | | | | | 3,52 | | | | | | 4,69 | | 5,00 | | 4,00 | |
| Wandelbarkeit | | | 17,69 | | | | | | 9,00 | | | | | | 26,69 | | 24 | | 36 | |
| Gesamtbewertung | | | 26,69 | | | | | | 36,00 | | | | | | 62,69 | | 60 | | 72 | |

| Nr. | Zielvorstellung | Systembewertung Zelluveyor Gen 3 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Zelluveyor Gen 3 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------|--|------|--|------|--|
| | | | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | | | | | | |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | | 0,937 | | | | | | 3,748 | | | | | | | | |
| 1 | Form | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 2 | Gewicht | 5 | | 0,692 | | | | | | | 0,46 | | | | | | | | | |
| 3 | Größe | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 7 | Multi-funktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | 0,223 | | | 1,74 | 3,50 | 1,11 | | | | | | | | | | |
| 16 | Modularität | 4 | 0,40 | | 0,220 | | | 0,80 | 0,56 | | | 1,10 | | | | | | | | |
| 12 | Modularität | 4 | 0,035 | | 0,200 | | | 0,14 | | | | 0,80 | | | | | | | | |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | 1,000 | | | | | | 5,00 | | | | | | | | |
| 8 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,119 | | | | | | | 0,60 | | | | | | | | | | |
| 8.2 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,177 | | | | | | | 0,71 | | | | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagenaufbaus | 4 | 0,163 | | | | | | | 0,65 | | | | | | | | | | |
| 4 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | | 0,47 | | | | | | | | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 5 | 0,138 | | 0,089 | | | 0,69 | 0,90 | 0,84 | | 0,44 | | | | | | | | |
| 6 | Integrierbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | | 0,33 | 0,28 | 0,29 | | 0,29 | | | | | | | | |
| Flexibilität | | | 4,49 | | | | | | 3,52 | | | | | | 4,69 | | 5,00 | | 4,00 | |
| Wandelbarkeit | | | 17,69 | | | | | | 9,00 | | | | | | 26,69 | | 24 | | 36 | |
| Gesamtbewertung | | | 26,69 | | | | | | 36,00 | | | | | | 62,69 | | 60 | | 72 | |

| Nr. | Zielvorstellung | Systembewertung Zelluveyor Gen 3 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Zelluveyor Gen 3 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------|--|------|--|------|--|
| | | | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | | | | | | |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | | 0,937 | | | | | | 3,748 | | | | | | | | |
| 1 | Form | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 2 | Gewicht | 5 | | 0,692 | | | | | | | 0,46 | | | | | | | | | |
| 3 | Größe | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 7 | Multi-funktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | 0,223 | | | 1,74 | 3,50 | 1,11 | | | | | | | | | | |
| 16 | Modularität | 4 | 0,40 | | 0,220 | | | 0,80 | 0,56 | | | 1,10 | | | | | | | | |
| 12 | Modularität | 4 | 0,035 | | 0,200 | | | 0,14 | | | | 0,80 | | | | | | | | |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | 1,000 | | | | | | 5,00 | | | | | | | | |
| 8 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,119 | | | | | | | 0,60 | | | | | | | | | | |
| 8.2 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,177 | | | | | | | 0,71 | | | | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagenaufbaus | 4 | 0,163 | | | | | | | 0,65 | | | | | | | | | | |
| 4 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | | 0,47 | | | | | | | | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 5 | 0,138 | | 0,089 | | | 0,69 | 0,90 | 0,84 | | 0,44 | | | | | | | | |
| 6 | Integrierbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | | 0,33 | 0,28 | 0,29 | | 0,29 | | | | | | | | |
| Flexibilität | | | 4,49 | | | | | | 3,52 | | | | | | 4,69 | | 5,00 | | 4,00 | |
| Wandelbarkeit | | | 17,69 | | | | | | 9,00 | | | | | | 26,69 | | 24 | | 36 | |
| Gesamtbewertung | | | 26,69 | | | | | | 36,00 | | | | | | 62,69 | | 60 | | 72 | |

| Nr. | Zielvorstellung | Systembewertung Zelluveyor Gen 3 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Zelluveyor Gen 3 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------|--|------|--|------|--|
| | | | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | Integrierbarkeit | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Erweiterbarkeit | Wandelbarkeit | | | | | | |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | | 0,937 | | | | | | 3,748 | | | | | | | | |
| 1 | Form | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 2 | Gewicht | 5 | | 0,692 | | | | | | | 0,46 | | | | | | | | | |
| 3 | Größe | 3 | | 0,370 | | | | | | | 1,11 | | | | | | | | | |
| 7 | Multi-funktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | 0,223 | | | 1,74 | 3,50 | 1,11 | | | | | | | | | | |
| 16 | Modularität | 4 | 0,40 | | 0,220 | | | 0,80 | 0,56 | | | 1,10 | | | | | | | | |
| 12 | Modularität | 4 | 0,035 | | 0,200 | | | 0,14 | | | | 0,80 | | | | | | | | |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | 1,000 | | | | | | 5,00 | | | | | | | | |
| 8 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,119 | | | | | | | 0,60 | | | | | | | | | | |
| 8.2 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 4 | 0,177 | | | | | | | 0,71 | | | | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagenaufbaus | 4 | 0,163 | | | | | | | 0,65 | | | | | | | | | | |
| 4 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | | 0,47 | | | | | | | | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 5 | 0,138 | | 0,089 | | | 0,69 | 0,90 | 0,84 | | 0,44 | | | | | | | | |
| 6 | Integrierbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | | 0,33 | 0,28 | 0,29 | | 0,29 | | | | | | | | |
| Flexibilität | | | 4,49 | | | | | | 3,52 | | | | | | 4,69 | | 5,00 | | 4,00 | |
| Wandelbarkeit | | | 17,69 | | | | | | 9,00 | | | | | | 26,69 | | 24 | | 36 | |
| Gesamtbewertung | | | 26,69 | | | | | | 36,00 | | | | | | 62,69 | | 60 | | 72 | |

Abbildung 5. Vorgehensweise bei der Bewertungsmethode [eigene Darstellung]

3.2 INTEGRATION IN DER ENTWICKLUNGS- UND KONSTRUKTIONSMETHODE DER VDI2221

Der Arbeitsfluss für die Entwicklung und Konstruktion von technischen Systemen und Produkte ist in der VDI2221 [VDI2221] beschrieben. Diese behandelt die allgemeingültigen und branchenunabhängigen Grundlagen für das methodische Entwickeln und Konstruieren sowie Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse, die durch eine generelle Logik und Zweckmäßigkeit mittels eines Leitfadens für die Praxis dienen sollen. Die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik nach VDI2221 definiert das systematische Vorgehensmodell und unterteilt es in unterschiedliche Zyklen in Bezug zu der Lebensphase eines Systems. Die Methode des vorliegenden Beitrags kann den Phasen der Systemvorstudie und Systementwicklung zugeordnet werden. In der ersten Phase kann die Methode dabei helfen, die Frage zu beantworten „Soll die Entwicklung realisiert werden?“. In der zweiten Phase liefert sie eine Antwort auf die Frage „Wurde die erwartete Wandelbarkeit erreicht?“.

Die Bewertungsmethode der vorliegenden Arbeit kann in zwei Hinsichten den Entwickler unterstützen (Abbildung 6): Das Beziehungsdiagramm der Zielvorstellungen und Teilflexibilitäten und Wandelbarkeit gibt eine Orientierung, über welche Wege diese erhöht werden können (Problemformulierung). Die Bewertungsmethode gibt Aufschluss darüber, wie gut die gewählte Lösung die Anforderungen erfüllt hat (Beurteilung). In einem verkürzten Ablauf kann die Problemsynthese nur auf Lösungsansätze reduziert werden und die Detaillierung der Lösung in der Systemanalyse übersprungen werden, um gleich in die Bewertung zu gehen. Dadurch kann sehr schnell identifiziert werden, ob es sich lohnt, Aufwand in die Detaillierung der Lösung zu investieren. Des Weiteren kann die Methode in der Phase der Systementwicklung verwendet werden, um überprüfen zu können, ob die entwickelten technischen Lösungen die erwarteten Verbesserungen geliefert haben.

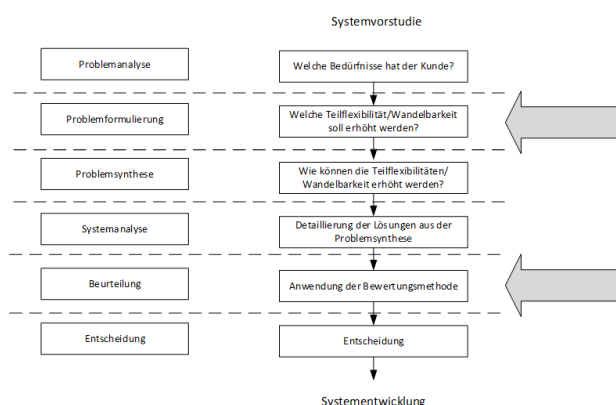


Abbildung 6. Anwendung der Methode im Rahmen des systemtechnischen Problemlösungszyklus nach VDI2221 [eigene Darstellung]

3.3 ANWENDUNG DER METHODE AM BEISPIEL EINES OMNIDIREKTIONALEN FÖRDERSYSTEMS

Mit dem Ziel, ein Materialflusssystem zu entwickeln, das die Anforderungen an hochflexible Materialflusssysteme erfüllt, wurde der cellueyvor (kurz für cellular conveyor, zu Deutsch: zellulärer Förderer) konzipiert.

Um möglichst viele Grundfunktionen der Fördertechnik zu erfüllen, muss das freie Bewegen und Rotieren der Objekte auf einer Fläche ermöglicht werden. Omnidirektionale Fahrtriebe für Kleinroboter sind in der Lage, dies zu leisten. Dem initialen Gedanken des cellueyvors folgend muss es, da die Roboter auf einem ebenen Boden omnidirektional bewegt werden können, ebenso möglich sein, den Roboter „umzudrehen“ und ein auf dem Antrieb liegendes Objekt omnidirektional zu bewegen. Durch die Kombination mehrerer solcher Antriebe muss auch eine Bewegung über größere Entfernungen möglich sein. Der cellueyvor ist als Teil eines größeren Materialflusssystem konzipiert, bei dem der cellueyvor ausgewählte fördertechnische Aufgaben erfüllt, bei denen konventionelle Fördersysteme nicht ausreichend Flexibilität bieten.

3.3.1 CELLUEYOR - PROOF OF CONCEPT (GENERATION 1)

Im Rahmen einer Erststudie wurde ein Funktionsdemonstrator mit dem Ziel konstruiert nachzuweisen, ob zum einen kleinskalige Module mit dem vorgeschlagenen mechanischen Aufbau Packstücke omnidirektional bewegen und positionieren können. Der Demonstrator ist ohne eine modulare Bauweise konzipiert. Er besteht aus zwölf omnidirektionalen Fördereinheiten, die vier omnidirektionale Module (Abbildung 7) darstellen, jedoch nicht trennbar realisiert wurden. In der ersten Generation des cellueyvors wurde die Steuerungsarchitektur mit Fokus auf der Erbringung des Nachweises des Gesamtkonzeptes der Omnidirektionalität zentral ausgelegt, sodass jeder Antrieb direkt mit einer SPS angeschlossen war. Als Antrieb wurden kleine Gleichstrom-Getriebemotoren aus dem Modelbau verwendet. Bei der Vorbereitung der Bewegungen erfolgt ohne eine Bahnplanung und die Ausführung der Fördergutbewegungen erfolgt durch direktes Ansteuern der Radgeschwindigkeit und nicht über die Position des Packstückes selbst. Aufgrund der Komplexität der Berechnung können nur lineare Bewegungen in fest definierten Richtungen bzw. Rotationen um den Mittelpunkt des Tisches (im Uhrzeiger und gegen Uhrzeigersinn) realisiert werden.

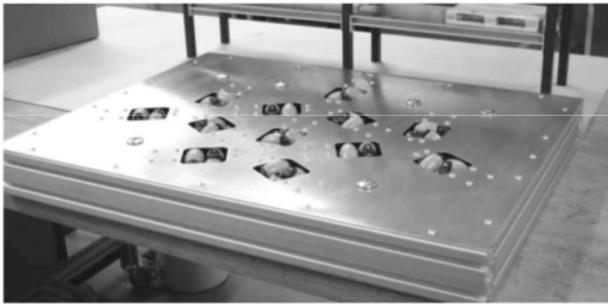


Abbildung 7. Demonstrator des celluveyor Gen 1. [eigene Darstellung]

Der Proof of Concept für den Demonstrator konnte nachweisen, dass omnidirektionale Bewegungen mit der vorgestellten Antriebskinematik möglich sind. Des Weiteren könnte gezeigt werden, dass die Steuerungsalgorithmen für die einzelnen Räder geeignet waren. Dennoch war schnell erkennbar, dass die Flexibilität und Wandelbarkeit des Systems sehr gering waren. Die Flexibilität erreichte 4,96 von 24 Punkten und die Wandelbarkeit 6,00 von 12 Punkten. Die Gesamtflexibilität beträgt somit 10,96 von 36 Punkten und wird in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des celluveyor Gen 1.

| Nr. | Zielvorgabe | Systembewertung celluveyor Gen 1 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Celluveyor Gen 1 | | | | | | | | | |
|-----|---|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|--|--|--|------|
| | | | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | | | | |
| 5 | Freie Translation | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Form | 1 | | | 0,270 | | | | | | 0,37 | | | | | | | |
| 2 | Gewicht | 1 | | | 0,092 | | | | | | 0,09 | | | | | | | |
| 3 | Größe | 1 | | | 0,370 | | | | | | 0,37 | | | | | | | |
| 7 | MultiFunktionalität | 1 | 0,347 | 0,700 | 0,223 | | | 0,95 | 0,70 | | 0,22 | | | | | | | |
| 9 | Erfassung der Fördergutposition | 1 | | | 0,220 | | | | | | 0,22 | | | | | | | |
| 10 | Modularität | 1 | 0,140 | | | | | 0,800 | 0,14 | | | | | | | | | 0,80 |
| 12 | Verkabelung | 1 | 0,035 | | | | | 0,200 | 0,03 | | | | | | | | | 0,20 |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | | | 1,000 | | | | | | | | | | 5,00 |
| 8-1 | Steuerungsgeschwindigkeit (Durchsatzflexibilität) | 1 | | | 0,119 | | | | | | 0,12 | | | | | | | |
| 8-2 | Steuerungsgeschwindigkeit (Layoutflexibilität) | 1 | 0,177 | | | | | | | | 0,18 | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagelayouts | 1 | 0,163 | | | | | | | | 0,16 | | | | | | | |
| 4 | Frei Rotation | 2 | | | 0,094 | | | | | | 0,19 | | | | | | | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 2 | 0,138 | | 0,089 | | | | | | 0,18 | | | | | | | |
| 6 | Einstellbarkeit der Geschwindigkeit | 1 | | | 0,181 | 0,168 | 0,057 | | | | 0,18 | 0,17 | 0,06 | | | | | |
| | | Teilsumme | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,14 | 1,00 | 1,00 | 1,82 | 5,00 | 1,00 | | | | |
| | | Flexibilität | | | | | | | 4,96 von 24 | | | | | | | | | |
| | | Wandelbarkeit | | | | | | | 6,00 von 12 | | | | | | | | | |
| | | Gesamtflexibilität | | | | | | | 10,96 von 36 | | | | | | | | | |

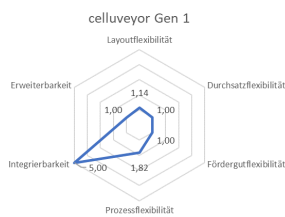


Abbildung 8. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des celluveyors Generation 1. [eigene Darstellung]

Es wird deutlich, dass bis auf die Integrierbarkeit alle Teilflexibilitäten und die Erweiterbarkeit sehr schwach ausgeprägt sind. Durch den Funktionsnachweis des Proof of Concept wird versucht, eine Anlage zu entwickeln, die in allen Kategorien die Flexibilität erhöht. Des Weiteren ist es Ziel der Weiterentwicklung des Systems, eine verbesserte Robustheit zu erreichen, die eine Anwendung in industriellen Umgebungen ermöglicht. Tabelle 6 zeigt mögliche technische Maßnahmen, die in Generation 2

implementiert werden können, mit den davon beeinflussten Teilflexibilitäten oder Wandelbarkeiten.

Tabelle 6. Vorschlag über technischen Maßnahmen für die Weiterentwicklung des celluveyors Generation 1.

| Technische Maßnahme für die Weiterentwicklung von Generation 1 | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit |
|--|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Modulare Bauweise (Zellen) | x | | | | | x |
| Reduktion des Abstands zwischen Antrieben | | | x | | | |
| Verbesserung der Antriebe | | x | x | | | |
| Verbesserung der Motorencoder | | | | x | | |
| Implementierung einer grafischen Bahnplanung | x | x | | x | | |
| Integration einer Funktionssteuerung | x | x | x | x | | |
| Bewegung von mehreren Packstücken parallel | x | x | | x | | |
| Einführung von Strom- und Datenschnittstellen (Zellenstecker) | x | | | | | x |

3.3.2 CELLUVEYOR GENERATION 2

Der celluveyor Generation 2 stellt die erste Weiterentwicklung der Technologie dar. Dabei wurde die erfolgreich erprobte Dreiecksanordnung der omnidirektionalen Räder übernommen. Mit dem Ziel, die Modularität zu erhöhen, wurde das Konzept der Zelle eingeführt. Dabei werden die Antriebseinheiten auf kleinere hexagonale Trägerplatten montiert, die mit anderen Trägerplatten verbunden werden können, um eine durchgehende Förderfläche zu bilden.

Die Anlage der Generation 2 besteht aus 60 Zellen mit insgesamt 180 Antrieben in einem rechteckigen Layout mit einer Größe von ca. 1,4 m x 1,6 m (Abbildung 9). Als Gestell wurde eine nichtmodulare Rahmenkonstruktion aus Aluminiumprofile gebaut, die die Zellen trägt wie auch die elektrischen Komponenten beinhaltet. Wie bei der ersten Generation ist die Steuerung zentral ausgeführt, wobei die Verkabelung zellen- statt antriebsweise realisiert wurde. Die Modelbauantriebe wurden durch stärkeren, effizientere Getriebemotoren in Industriequalität ersetzt. Sowie in Generation 1 arbeitete das ohne Feedback über die Position der Packstücke (Open-Loop), sodass begrenzte Anwendungen möglich waren.

Anders als bei der ersten Generation verfügte das neue System über die Möglichkeit, Packstücke nicht nur über Force Fields (ansteuern aller Antriebe gleichzeitig), sondern auch mittels individueller Bahnen zu bewegen, welche auf intuitive Weise auf einem mobilen Endgerät im Voraus vorbereitet und für die spätere Ausführung gespeichert werden. Durch die Verwendung der individuellen Bahnen war das System nun in der Lage, mehrere Packstücke parallel und auf unabhängigen Bahnen zu bewegen. Hierdurch konnte gegenüber der ersten Generation die Prozess- und Durchsatzflexibilität deutlich gesteigert werden. Der celluveyor Generation 2 war in der Lage, eine Fördergeschwindigkeit bis 0,8 m/s bei gewöhnlichen Packstücken im KEP-Bereich (max. 31,5 kg) zu erreichen.

entwickelt, sodass mit nur wenigen Basiselementen Anlagen mit beliebigen Geometrien getragen und seitlich verschlossen werden können.

Das Konzept der zentralen Steuerung mit einer SPS wurde durch eine teildezentrale Steuerungsarchitektur ersetzt, bei dem ein Industrie PC mit den Zellen kommuniziert. Hierfür wurde eine Steuerungsplatine entwickelt die in jede Zelle eingebaut. In dem zentralen Teil werden die logistischen Anwendungen programmiert und Steuerbefehle für die einzelnen Räder berechnet und über ein Bus-Kommunikationssystem an eine erste Zelle geschickt, wodurch die Befehle an den dezentralen Steuerungsteil übergeben werden. Die Zelle entnimmt den Teil des Befehls, der für sie relevant ist und leitet ihn an die benachbarten Zellen weiter. Diese entnehmen dessen relevante Informationen und leiten den Befehl erneut an alle Nachbarn weiter.

Mit dem Umstieg der zentralen SPS-basierten Steuerung auf eine teildezentrale Steuerung mit einem Industrie-PC und eine dezentrale Zellensteuerung wurde die Steuerungssoftware grundlegend überarbeitet. Die zentrale Steuerungseinheit wurde auf Basis der Open-Source-Middleware für die Entwicklung von Robotern ROS (Roboter Operating System) entwickelt, wodurch Zugang zu zahlreichen Open-Source-Tools und -Libraries erlangt werden konnte. Die Bahnplanung konnte automatisiert werden, sodass nun tausende von Bahnen erstellt und optimiert werden können, um eine effiziente Bewegung der Förderobjekte zu realisieren. Zahlreiche Softwaremodule wie z.B. Kamerafeedback für die Ermittlung der Position der Packstücke, Regelung für die Korrektur von Abweichungen in der Position von Packstücken sowie die Fähigkeit mehrere Objekte bewegen zu können.

Im cellueyvor Generation 3 konnten alle technischen Vorschläge implementiert werden, die aus der Bewertung der zweiten Generation entstanden. Die Weiterentwicklung und Verkleinerung der Zellen führte zu einer Erhöhung der Layout- und Prozessflexibilität. Die erneute Verbesserung der Antriebe steigerte die Durchsatzflexibilität. Die Integration von einem Feedbacksystem für die Pose der Packstücke und der Wechsel der SPS-Steuerung auf eine auf einem Industrie-PC mit deutlich höherer Rechenleistung basierende führte zu einer massiven Verbesserung der Parallelität und Genauigkeit der Bewegungen, sodass die Prozessflexibilität gesteigert werden konnte. Die Implementierung einer teildezentralen Steuerungsarchitektur mit automatischer Layouterkennung erhöhte die Layoutflexibilität, aber vor allem die Erweiterbarkeit. Trotz der massiven Erhöhung der Flexibilität und Wandelbarkeit bleibt unausgeschöpftes Verbesserungspotenzial, insbesondere in der Fördergutflexibilität, das in einer eventuellen Weiterentwicklung adressiert werden kann. Die Flexibilität erreichte 17,69 von 24 Punkten und die Wandelbarkeit 9,00 von 12 Punkten. Die Gesamtflexibilität beträgt somit 26,69 von 36 Punkten und wird in Tabelle 9 gezeigt.

Tabelle 9. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des cellueyvor Gen 3.

| Nr. | Zielerstellung | Systembewertung cellueyvor Gen 3 | Gewichtung | | | | | | gew. Bew. Cellueyvor Gen 3 | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|--|--|--|--|--|------|
| | | | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | | | | | | |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Form | 3 | | | 0,870 | | | | | | | | | | | | | | | 1,11 |
| 2 | Gewicht | 5 | | | 0,892 | | | | | | | | | | | | | | | 0,48 |
| 3 | Größe | 3 | | | 0,370 | | | | | | | | | | | | | | | 1,11 |
| 7 | Multifunktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | | 0,223 | | | | 1,74 | 3,50 | | | | | | | | | 1,11 |
| 9 | Erfassung der Fördergubposition | 5 | | | 0,220 | | | | | | | | | | | | | | | 1,10 |
| 10 | Modularität | 4 | 0,140 | | | | | | 0,800 | 0,58 | | | | | | | | | | 3,20 |
| 12 | Verkabelung | 4 | 0,035 | | | | | | 0,200 | 0,14 | | | | | | | | | | 0,80 |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | | 1,000 | | | | | | | | | | | | | 5,00 |
| 8 | Steuerungsgarchitektur (Durchsatzflexibilität) | 5 | | 0,119 | | | | | | | 0,60 | | | | | | | | | |
| 8 | Steuerungsgarchitektur (Layoutflexibilität) | 4 | 0,177 | | | | | | | | 0,71 | | | | | | | | | |
| 11 | Änderung des Anlagelayouts | 4 | 0,163 | | | | | | | | 0,65 | | | | | | | | | |
| 14 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | | | | | | | | | | 0,47 |
| 14 | Genauer Sitzbedarf | 5 | 0,138 | | 0,089 | | | | | | 0,69 | | | | | | | | | 0,44 |
| 6 | Einstellbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | | 0,181 | 0,188 | 0,057 | | | | | 0,90 | 0,84 | 0,29 | | | | | | | |
| Teilsumme | | | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 4,49 | 5,00 | 3,52 | 4,68 | 5,00 | 4,00 | | | | | | |
| Flexibilität | | | | | | | | | 17,69 von 24 | | | | | | | | | | | |
| Wandelbarkeit | | | | | | | | | 9,00 von 12 | | | | | | | | | | | |
| Gesamtflexibilität | | | | | | | | | 26,69 von 36 | | | | | | | | | | | |

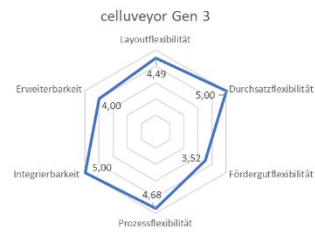


Abbildung 12. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des cellueyvor Gen 3. [eigene Darstellung]

Tabelle 10 zeigt mögliche technische Maßnahmen, die in Generation 3 implementiert werden können, mit den davon beeinflussten Teilflexibilitäten oder Wandelbarkeiten.

Tabelle 10. Vorschlag über technischen Maßnahmen für die Weiterentwicklung des cellueyvors Generation 3.

| Technische Maßnahme für die Weiterentwicklung von Generation 3 | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität | Prozessflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Weitere Verbesserung der Antriebe (Direct Drive) | | x | x | | | |
| Implementierung einer volldezentralen Steuerung | x | x | | | | |
| Entwicklung einer automatischen Bahnplanung (Erhöhung der Anzahl an parallelen Bewegungen, freien Rotationen und Translationen) | x | x | | x | | |
| Entwicklung eines volldezentralen Kamerafeedbacks mittels Edge Computing | | | | x | | x |

3.3.4 EXKURS: DEZENTRALES STEUERUNGSKONZEPT FÜR GENERATION 3

Mit jeder Generation konnten die Teilflexibilitäten gezielt erhöht werden, was sich positiv auf die Gesamtflexibilität auswirkte. Die dritte Generation von cellueyvor wurde mit einer teildezentralen Steuerung ausgeführt und zeigt eine sehr große Flexibilität und Wandelbarkeit. Laut der Literatur versprechen hochmodulare, skalierbare und insbesondere dezentral gesteuerte Materialflusssysteme große Potenziale bezüglich ihrer Flexibilität [Gün02, Fur10, Ove10, Gün11, Kir12, Krü12, Soh20].

In einem Exkurs zur dritten Generation wurde ein Konzept für eine volldezentrale Steuerung für kleinskalige

omnidirektionale Materialflusssysteme entwickelt und simuliert. Hierfür wurde ein Steuerungskonzept entwickelt, das auf alle kleinskalige Materialflusssysteme angewandt werden könnte, deren Grundeinheiten (Transporteinheiten) eine Grundgeometrie haben, mit denen geschlossene Flächen (sog. euklidische Ebenen) gebildet werden können. Das Konzept war in der Lage, optimale Routen zwischen zwei beliebigen Zellen in einem beliebigen Layout unter Berücksichtigung der Paketgröße und -geometrie dezentral zu finden (Abbildung 12). Das Steuerungskonzept wurde in einer Simulation validiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass der kürzeste Weg dezentral gefunden und reserviert werden konnte. Auch im Falle der Entfernung oder des Ausfalls von Zellen war der Algorithmus in der Lage, nahezu optimale Routen zu berechnen und zu reservieren. Das Konzept hatte jedoch viele Einschränkungen (keine parallele Bewegung von Paketen, keine Berücksichtigung von beweglichen Hindernissen, keine Rotation u. a.), so dass eine Verwendung in der Praxis noch nicht möglich ist. Dennoch konnte nachgewiesen werden, dass dezentrale Routenplanung und Reservierung möglich sind.

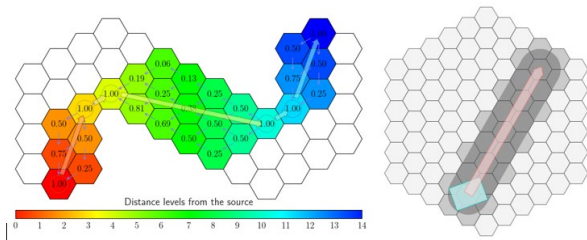


Abbildung 13. Entfernungskarte der Upstream-Kommunikation, inklusive multiple Pfade für konkave Anlagenlayouts und reservierten Pfad. Rechts: Geplante Trajektorie Packstück unter Berücksichtigung der Form und Größe des Packstücks [Ban18]

Das Konzept ist ein erster Versuch, eine dezentrale Steuerung in einem kleinskaligen omnidirektionalen Fördersystem zu realisieren und hat einige Einschränkungen. Zum einen kann das System Routen für einzelne Packstücken ohne Berücksichtigung von beweglichen Hindernissen (bspw. andere Packstücke) planen, reservieren und ausführen. Zum anderen kann es jedoch keine Packstücke rotieren. Um die Auswirkung der volldezentralen Steuerung auf die Flexibilität des celluveyors Generation 3 zu untersuchen, wird davon ausgegangen, dass alle Einschränkungen gelöst und technisch umgesetzt werden könnten. Es wird angenommen, dass die Steuerung mehrere Packstücke gleichzeitig und kollisionsfrei bewegen kann, dass ein dezentrales Feedbacksystem implementiert wurde und dass die Steuerung in der Lage ist, alle fördertechnischen Funktionen zu realisieren. Die Ergebnisse der Bewertung sind hier etwas überraschend, da die Gesamtflexibilität eines celluveyors Generation 3 mit dezentraler Steuerung marginal geringer als bei der gleichen Anlage mit teildezentraler Steuerung ist. Im Detail betrachtet sieht man, dass die Layoutflexibilität verbessert wurde, während gleichzeitig die Durchsatzflexibilität reduziert wurde.

Dies kann durch die Reduzierung des Verkabelungsaufwandes bei der Veränderung des Layouts, aber gleichzeitigem Verlust von globalen Informationen das Finden von globalen Optima verhindern und zu entsprechenden Durchsatzreduktionen führen. In der Realität sind jedoch weitere Verluste in der Flexibilität zu erwarten, da wahrscheinlich ein volldezentrales System aufgrund der fehlenden globalen Informationen alle fördertechnischen Funktionen entweder nicht oder nur mit sehr hohem technischen Entwicklungsaufwand erfüllen wird.

Tabelle 11. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des celluveyors Generation 3 (Exkurs).

| Nr. | Zielformulierung | Systembewertung | | Gewichtung | | | | | | gen. Bew. Celluveyor Gen 3 Exkurs | | |
|--------------------|--|-------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------|
| | | celluveyor Gen 3 Exkurs | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Förderflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit | Prozessflexibilität | Durchsatzflexibilität | Förderflexibilität | Integrierbarkeit | Erweiterbarkeit |
| 5 | Freie Translation | 4 | | | 0,317 | | | | | | 1,27 | |
| 1 | Form | 3 | | | 0,370 | | | | | | 1,11 | |
| 2 | Gewicht | 5 | | | 0,092 | | | | | | 0,46 | |
| 3 | Größe | 3 | | | 0,370 | | | | | | 1,11 | |
| 7 | Multifunktionalität | 5 | 0,347 | 0,700 | 0,233 | | | 1,74 | 3,30 | 1,11 | | |
| 9 | Erfassung der Fördergüterposition | 5 | | | 0,220 | | | | | | 3,10 | |
| 10 | Modularität | 4 | 0,140 | | | | | 0,800 | 0,56 | | | 3,20 |
| 12 | Verkabelung | 4 | 0,035 | | | | | 0,200 | 0,14 | | | 0,80 |
| 13 | Steuerungstechnische Schnittstellen | 5 | | | | 3,000 | | | | | | 5,00 |
| 9.1 | Steuerungsgarchitektur (Durchsatzflexibilität) | 5 | | 0,119 | | | | | 0,12 | | | |
| 9.2 | Steuerungsgarchitektur (Layoutflexibilität) | 4 | 0,177 | | | | | | 0,88 | | | |
| 11 | Änderung des Anlagenlayouts | 4 | 0,163 | | | | | | 0,65 | | | |
| 14 | Freie Rotation | 5 | | | 0,094 | | | | | | 0,47 | |
| 14 | Geringer Platzbedarf | 5 | 0,138 | 0,089 | | | | | | | 0,44 | |
| 6 | Einstellbarkeit der Geschwindigkeit | 5 | | 0,181 | 0,188 | 0,057 | | | 0,30 | 0,84 | 0,29 | |
| Tallsumme | | | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 4,66 | 4,52 | 3,52 | 4,68 | 5,00 |
| Flexibilität | | | | | | | | | | 17,39 | | 24 |
| Wandelbarkeit | | | | | | | | | | 9,00 | | 12 |
| Gesamtflexibilität | | | | | | | | | | 26,39 | | 36 |

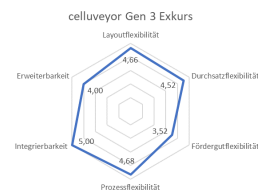


Abbildung 14. Bewertung der Flexibilität und Wandelbarkeit des Exkurs celluveyor Gen 3. [eigene Darstellung]

4 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Beitrages konnte eine Methode entwickelt werden, anhand derer hochflexible stationäre Materialflusssysteme für Stückguttransport in der KEP-Industrie entwickelt werden können. Die Bewertung der Flexibilität ermöglicht Herstellern von Fördertechnik, die Bedürfnisse von Anwendern besser umzusetzen und hilft dabei, bestehende Systeme derart weiterzuentwickeln, dass in jeder Generation die Flexibilität erhöht werden kann. Die Bewertung der Flexibilität einer Weiterentwicklung vor der technischen Umsetzung kann Hinweise geben, ob das geplante Vorhaben unter Berücksichtigung von Entwicklungsaufwand und -kosten die gewünschte Verbesserung erreicht, bevor mit der Entwicklung selbst angefangen wird.

In den jeweiligen Generationen des Testsystems konnten die Ansätze der Flexibilitätserhöhung aus der Literatur erfolgreich angewendet werden. Bei der Evaluation des Exkurses in eine volldezentrale Steuerung konnte, verglichen zu der dritten Generation, eine marginale Verschlechterung der Flexibilität erreicht werden. Obwohl diese Reduktion

nachvollziehbar ist, überrascht sie dennoch, da häufig die Vorteile von dezentraler Steuerung gegenüber den Nachteilen hervorgehoben werden.

So ergeben sich zwei Gedanken, die den Verlust von Flexibilität verantworten können, welche im Rahmen von zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden können: Zum einen können Vorteile einer dezentralen Steuerung in den Zielvorstellungen dieser Arbeit nicht ausreichend berücksichtigt worden sein (bspw. Reduktion der Planungszeit, Vereinfachung der Inbetriebnahme, Erhöhung der Reparaturfreundlichkeit usw.). Eine weitere mögliche Erklärung des Flexibilitätsverlusts könnte in der Auswahl der Kriterien und der Punktevergabe innerhalb der Zielvorstellung liegen. Obwohl diese mit großer Sorgfalt und möglichst objektiv nach technischen Merkmalen differenziert wurden, kann die Unterteilung der Kriterien ungeeignet gewesen sein. Eine Ursache durch eine subjektive Gewichtung kann durch die Verwendung der automatischen Gewichtung mit maschinellem Lernen ausgeschlossen oder zumindest stark reduziert werden. Diesen möglichen Ursachen können im Rahmen von zukünftigen Forschungsarbeiten nachgegangen werden.

Eine weitere Erklärung könnte in der Tatsache liegen, dass ein volldezentral gesteuertes System nur eine begrenzte Reichweite der Informationen verfügt, wodurch nur lokale Optima erreicht werden können und somit eine geringere Performance als ein teildezentrales oder zentrales System erreichen kann, das über globale Informationen verfügt. Es müsste untersucht werden, ob dies tatsächlich der Fall ist. Wenn es so wäre, müssten Untersuchungen mit dem Ziel realisiert werden, einerseits dezentrale Systeme mit globalen Informationen zu versorgen und andererseits dezentrale Steuerungsalgorithmen zu entwickeln, die in der Lage sind, mit diesen Informationen globale Optima dezentral zu finden und synchron auszuführen.

Weiterer Forschungsbedarf wird in der Frage gesehen, wie technische Lösungen aussehen können, die eine gezielte und schrittweise Erhöhung der Flexibilität bzw. Wandelbarkeit ermöglichen. Die gezielte Verbesserung einer Teilflexibilität oder Wandelbarkeit wird durch den Wechsel von einem niedrigen Kriterium zu einem höheren Kriterium (im Falle von Zielvorstellungen mit Einzelauswahl) oder mit dem Erfüllen von weiteren unabhängigen Kriterien erreicht (bei Zielvorstellungen mit Mehrfachwahl) realisiert. Diese Verbesserungen können durch die Entwicklung von völlig neuen technischen Lösungen oder durch die Implementierung von bewährten Konzepten resultieren. Auch wenn hierfür mehrere Kreativitätstechniken zur Verfügung stehen, bleibt der Blick auf den Stand der Technik unentbehrlich. Hierfür bietet sich an, die Patentdatenbanken als Quelle für Inspiration zu nutzen. Die Patentliteratur ist in gut recherchierbaren Datenbanken sortiert und sammelt Schätzungen zufolge 70 bis 95 % des technischen Wissens weltweit, von dem die Hälfte in keinen anderen Quellen zu finden ist [Göv18]. Aufgrund der

strikten Anforderungen an Offenbarung und Ausführbarkeit, die Patentämter an die hier beschriebenen Lösungen stellen [PatG § 34(4) und EPO § 83], stellt die Patentliteratur eine ausgezeichnete Quelle für Inspiration für Entwickler dar. Die Recherche der Patentliteratur ist jedoch ohne Spezialkenntnisse mühsam und fehleranfällig. Im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten könnte diese Untersuchung realisiert und ein Maßnahmenkatalog erarbeitet werden, mit dem die Entwickler von Materialflusssystemen neue Konzepte erarbeiten oder bestehende weiterentwickeln können. Hierfür könnte die Triz-Methode, die Erfindern und Entwicklern hilft, ihre Arbeit und die Lösungsfindung zu systematisieren, eine gute Hilfe leisten [Alt98].

Nach Abschluss dieses Beitrages stellt sich die Frage, ab wann ein Materialflusssystem als flexibel bzw. hochflexibel bezeichnet werden kann. Um diese Frage zu beantworten, könnten weitere Untersuchungen realisiert werden. Zum einen könnten reale Materialflusssysteme mit einer neuen Umfrage nach Flexibilität evaluiert werden. Hier könnten die Flexibilitätseigenschaften jedes System ermittelt und in anonymer Form dargestellt (durch die Verwendung der Fragengestaltung dieser Arbeit) und den Befragten präsentiert werden. So könnte die Beeinflussung (bspw. Zu- oder Abneigung gegenüber einem bestimmten Hersteller oder einer Technik) minimiert werden. In einer separaten Untersuchung könnte mit der hier erarbeiteten Methode die Flexibilität und Wandelbarkeit von existierenden Systemen gemessen werden. Die Ergebnisse der neuen Umfrage und der Messung könnten kombiniert werden, um ein Flexibilitäts- bzw. Wandelbarkeits-Benchmark zu erarbeiten, an dem zukünftige Systeme sich messen können.

LITERATUR

- [Hah10] Hahn-Woernle, C.: Neue Anforderungen für die Logistik des 21. Jahrhunderts. In: *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Günthner, W. A. und ten Hompel, M. (Hrsg.), Springer Verlag, Heidelberg-Dordrecht-London-New York, 2010.
- [Sho10] *Shopping Tomorrow – bent u klaar voor de consument van 2020?* Projekt Shopping2020, Endbericht. Beerens Business Press BV, 2015.
- [Hei06] Heinecker, M.: *Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme*. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2006.
- [Chi10] Chisu, R.: *Kommunikations- und Steuerungsstrategien für das Internet der Dinge*. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, 2010.

- [Hom06] ten Hompel, M.: Zellulare Fördertechnik. In: eLogistics Journal 2006, nicht referierte Veröffentlichungen, 2006.
- [IWL16] N. N. Intralogistik-Studie 2016. Bedürfnisse der Intralogistik. IWL AG, Ulm, 2016.
- [Tre14] Trebilcock, B.: Conveyor and Sortation Survey – How the Market is applying automation. In: Modern Material Handling, Peerless Research Group. 2014.
- [Fuk99] Fukuda, T., Kosuke, S., Yoshiaki, H., Yasuhisa, H., Susumu, S., Hironobu Y. und Yuji, I.: Distributed control of flexible transfer system (FTS) using learning automata. In: Robotics and Automation, 1999 IEEE International Conference on, 1:96, 101. 1999.
- [Oyo00] Oyobe, H., Kitajima, H. und Hori, Y.: Design and realization of autonomous decentralized object transfer system: magic carpet. In: IEEE 6th International Workshop on Advanced Motion Control, 2000.
- [May09] Mayer, S.: Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors. Dissertation, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Universität Karlsruhe, 2009.
- [Ger11] Gerthsen, M.: Dynamische Gleitförderung für automatisierte wandelbare Materialflusssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2011.
- [Nob10] Nobbe, C., Baur, T., Schönung, F. und Furmans, K.: Flächenbewegliche Fahrtriebe für moderne Materialflusselemente am Beispiel von KARIS. In: Logistics Journal, 06, 2010.
- [IFL16] N. N.: KARIS PRO – Autonomer Materialtransport für flexible Intralogistik Abschlussbericht des BMBF Forschungsprojekts, 2016.
- [Ove10] Overmeyer, L., Ventz, K., Falkenberg, S. und Krühn, T.: Interfaced multidirectional small-scaled modules for intralogistics operations. In: Logistics Research, 2, 123–133, 2010.
- [Fes15] N. N.: Website der Firma Festo GmbH & Co. KG. https://www.festo.com/net/de-at_at/SupportPortal/Details/380298/PressArticle.aspx. Zuletzt aufgerufen: 15.10.2015.
- [Lan17] N. N.: Website der Firma Langer GmbH und Co. KG. <http://www.lanfer-automation.de/leistungen/thingtelligence/>. Zuletzt aufgerufen am 17.11.2017.
- [Boa16] N. N.: The specialist in smart modular conveyor. Produktflyer der Firma Boa Concept. 2016.
- [Ito18] N. N. Website des Unternehmens Itoh Denki, Website https://www.itohdenki.co.jp/products/msd_test.html. Zuletzt aufgerufen am 12.02.2018.
- [Sie21] N. N.: Whitepaper der Siemens Logistics GmbH: Creating new business with mixed-mail automation. Integrating small parcel processing into mail sorting centers. 2021.
- [Nop11] Nopper, J. R.: Eine Methodik zur Bewertung von Wandelbarkeit in der Intralogistik am Beispiel selbstorganisierter Materialflusssysteme. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011.
- [VDI2221] N. N.: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993.
- [VDI2225] N. N.: VDI 2225 Blatt 3:1998-11: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1998.
- [Gün02] Günthner, W. A. und Wilke, M.: Anforderungen an automatisierte Materialflusssysteme für wandelbare Logistikstrukturen. Dokumentation/Wissenschafts-symposium Logistik der BVL 2002, Huss Verlag, 2002.
- [Fur10] Furmans, K., Schönung, F. und Gue, K. R.: Plug-and-work material handling systems. In: Proceedings of the international material handling research colloquium, 132–142, 2010.
- [Ove10] Overmeyer, L., Ventz, K., Falkenberg, S. und Krühn, T.: Interfaced multidirectional small-scaled modules for intralogistics operations. In: Logistics Research, 2, 123–133, 2010.
- [Gün11] Günthner, W. A. und Tenerowicz, P.: Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik-Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik. In: Industrie Management 01, 25–29, 2011.
- [Kir12] Kirks, T., Stenzel, J., Kamagaew, A. und ten Hompel, M.: Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme. In: Logistics Journal, Vol. 2012, 2012.
- [Krü12] Krühn, T. und Overmeyer, L.: Decentralized and Dynamic Routing for a Cognitive

Conveyor. In: 1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence, 85–87, 2012.

- [Soh20] Sohr, S.: Routing in dezentral gesteuerten, modularen Fördersystemen. Dissertation, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2021.
- [Göv18] Gövert, N.: Patente, Gebrauchsmuster, Marken, Designs. Informationszentrum Technik und Patente, Technische Universität Dortmund, 2018.
- [PatG § 34(4)] N. N. Patentgesetz, § 34 (4). Website des Bundesministerium für Justiz: https://www.gesetze-im-internet.de/patg/_34.html. Zuletzt aufgerufen am 13.11.2021.
- [EPO § 83] N. N.: Europäisches Patenteinkommen – Artikel 83 - Offenbarung der Erfindung. Website des Europäischen Patentamt (EPO): <https://www.epo.org/law-practice/legal-texts/html/epc/2016/d/ar83.html>. Zuletzt aufgerufen am 13.12.2021.
- [Alt98] Altschuller, G. S.: Erfinden: Wege zur Lösung technischer Probleme. PI-Planung und Innovation, 1998.

Dipl.-Ing. Claudio Uriarte, Chief Technology Officer bei der cellumation GmbH. Claudio Uriarte wurde in 1978 in Chile geboren Er studierte Maschinenbau an der Universidad de Chile und an der Technischer Universität Berlin. Von 2009 bis 2017 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen

Dr.-Ing. Hendrik Thamer, Chief Executive Officer bei der cellumation GmbH. Hendrik Thamer wurde in 1981 in Bad Soden/Taunus geboren Er studierte Informatik an der Universität Oldenburg und promovierte im Jahr 2019 beim BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen, wo er von 2009 bis 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Abteilungsleiter tätig war.

Adresse: cellumation GmbH, Kleiner Ort 7, 28357 Bremen, Germany,
Telefon: +49 421 331135 0,
E-Mail: uriarte@cellumation.com, thamer@cellumation.com