

KI-gestützte Plattform zur Auswahl, Einführung und Bewertung technischer Systeme für intralogistische Prozesse - Anforderungen und Konzeption

Nils Hendrik Hoppe¹,
Moritz Quandt¹,
Lennart Rolfs¹,
Michael Freitag^{1,2},

¹ BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Bremen

² Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen

Kontinuierlicher Wettbewerbsdruck zwingt Unternehmen, ihre Produktions- und Logistikprozesse zu optimieren. Sensorbasierte Ansätze unterstützen zunehmend bei der Problemidentifikation, doch die Dateninterpretation und die Auswahl konkreter technischer Lösungen zur Unterstützung erfordern weiterhin Expertenwissen. Die Datenbasis stellt dabei eine zentrale Herausforderung dar. Der Beitrag adressiert diese Lücke mit dem Konzept eines Entscheidungsassistenzsystems zur Technologieauswahl. Die Anforderungen an ein solches System werden mittels einer Markt- und einer Stakeholderanalyse erhoben, die die Stärken und Schwächen bestehender Plattformen sowie die Bedürfnissen potenzieller Anwender berücksichtigen. Daraus wird ein Konzept für das Entscheidungssystem abgeleitet, das Optimierungspotenziale auf Grundlage sensorisch erfasster Bewegungsdaten identifiziert. Unter Berücksichtigung technischer und prozessualer Anforderungen werden aus einem Katalog passende Maßnahmen bzw. Technologien anhand individuell gewichteter Kriterien vorgeschlagen. Nach der Umsetzung im Unternehmen ermöglicht ein Vorher-Nachher-Vergleich die Validierung der gewählten Lösung.

[Keywords: Technologiemanagement, KI, Sensoren, Anforderungen, Konzept]

1 EINLEITUNG

Unternehmen in Produktion und Logistik stehen unter kontinuierlichem globalem Wettbewerbs- und Kostendruck. Um langfristig die Effizienz zu steigern und die operativen Kosten zu senken, ist eine stetige Optimierung der Produktionsabläufe und intralogistischen Prozesse unerlässlich

[1, 2] Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Prozessketten, getrieben durch volatile Märkte und kundenindividuelle Anforderungen. Ein wirksamer Ansatz zur Begegnung dieser Herausforderungen liegt im Einsatz von Automatisierungstechnik, wie z.B. Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) [3], aber auch Assistenzsystemen [1, 4]. Diese bieten großes Potenzial, die Prozesse nicht nur aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu optimieren. Informatorische Assistenzsystemen auf dem Shopfloor [5] können z.B. Suchzeiten reduzieren und darüber hinaus auch einen Mehrwert für die Angestellten bieten, indem deren kognitive Belastung vermindert wird [6, 7]. Physische Assistenzsystemen, wie z.B. Exoskeletten [8], können die Ergonomie der Prozesse verbessern und so durch geringere Fehlzeiten dem Personalmangel begegnen [8]. Die Identifikation von Optimierungspotenzialen und die Auswahl geeigneter Technologien erfordern ein tiefgreifendes Fachwissen, sowohl über die eigenen operativen Abläufe als auch über den hochdynamischen Technologiemarkt. Die Intransparenz dieses Marktes sowie das Fehlen standardisierter Methoden zur Anforderungsaufnahme stellen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vor große Herausforderungen, da häufig die personellen und finanziellen Ressourcen fehlen, um Technologieprojekte systematisch zu planen und umzusetzen [1, 9].

Die fundierte Auswahl und die erfolgreiche Einführung technischer Systeme setzen eine systematische, datenbasierte Analyse der Ist-Prozesse voraus. Traditionell erfolgt diese Prozessanalyse durch zeitaufwändige Beobachtungen und Aufnahmen vor Ort, was entweder internes Planungspersonal stark bindet oder die kostenintensive Beauftragung externer Beratungsdienstleister erfordert [10, 11]. Zwar rücken in jüngster Zeit zunehmend sensorbasierte Ansätze zur automatisierten und anonymisierten Datenerfassung in den Fokus, welche über Wearables oder Flottendaten Laufwege, Aktivitäten und Prozesszeiten präzise aufzeichnen, doch

verbleibt in der Praxis eine entscheidende Lücke. Die anschließende Interpretation dieser Daten, welche die Identifikation konkreter Schwachstellen sowie die Ableitung und methodische Auswahl passender technologischer Lösungen ermöglicht. Bisherige Ansätze bieten häufig rein datenvisualisierende Systeme oder KI-gestützte Empfehlungssysteme, die auf isolierte Lösungskataloge zurückgreifen. Systeme, die einen durchgängig digitalen Prozess von der Prozessaufnahme bis zur Lösungsauswahl oder sogar darüber hinaus abbilden, sind nur in Grundzügen vorhanden. Diese Lücke kann durch die Konzeption und Entwicklung eines technologieübergreifenden Entscheidungs-Assistenzsystems adressiert werden, das den Prozess von der sensorgestützten Anforderungsanalyse über die kriterienbasierte Systemauswahl bis hin zur anschließenden Erfolgsbewertung (Vorher-Nachher-Vergleich) ohne Medienbrüche digital und automatisiert abbildet.

Dieser Beitrag stellt die Anforderungen und die Konzeption einer KI-gestützten Plattform vor, die Unternehmen, insbesondere KMU, bei der teilautomatisierten Auswahl, Einführung und Bewertung technischer Systeme für intralogistische Prozesse unterstützt. Dabei sollen sensorisch erfasste Bewegungsdaten mittels Machine-Learning-basierter Verfahren analysiert werden und eine automatische Identifikation von Optimierungspotenzialen erfolgen. Auf Basis eines strukturierten Lösungskatalogs und eines integrierten Prozesskennzahlensystems sollen anschließend bedarfsgerechte Technologie- und Produktempfehlungen generiert werden. Um von Beginn an eine hohe Praxisrelevanz, Datenqualität und Menschzentrierung des Systems sicherzustellen, wurden im Rahmen der Anforderungsanalyse leitfadengestützte Experteninterviews mit potenziellen Nutzen durchgeföhrt. Aus den identifizierten Anforderungen wird das hier präsentierte Soll-Konzept des Entscheidungs-Assistenzsystems abgeleitet.

2 STAND DER TECHNIK

Damit ein automatisiertes System den Anwender bei der Entscheidungsfindung unterstützen kann, muss eine entsprechende Datenbasis vorhanden sein, auf deren Grundlage die Technologieauswahl erfolgt. Zwischen den darin enthaltenen Lösungen, in diesem Fall Intralogistik-Technologien, und dem Problem des zu optimierenden Prozesses (z.B. Engpässe, ergonomische Belastungen, Weg- und Durchsatzzeiten) müssen die Zusammenhänge formalisiert werden. Das setzt wiederum eine vorangestellte Prozessanalyse voraus, die optimalerweise ebenfalls automatisiert erfolgt.

Im Folgenden werden der Stand der Technik und der Wissenschaft zu den Themen Technologiekatalogen, automatisierten Methoden zur Entscheidungsunterstützung und Datenerhebung und -auswertung vorgestellt.

2.1 TECHNOLOGIEKATALOGE

Technologiekataloge bilden die notwendige Grundlage für eine automatische Systemempfehlung. Im Kontext von Technologien für die Intralogistik wurden verschiedene Plattformen recherchiert (siehe Tabelle 1), die in Kapitel 4 ausführlicher betrachtet werden.

Grundsätzlich unterscheiden sich die recherchierten Plattformen in ihrem Umfang an katalogisierten Daten und in ihrer inhaltlichen Ausrichtung. Die inhaltliche Fokussierung gliedert sich in generell verfügbare Technologien, konkrete Produkte oder deren Anbieter. Die meisten Plattformen fokussieren sich auf Produkte. Hinsichtlich der inhaltlichen Abdeckung ist festzustellen, dass diese entweder breit gefächert, dafür aber oberflächlich, oder sehr spezifisch und detailliert ausfällt.

Das zeigt sich teils sehr deutlich an Plattformen mit dem Fokus auf Software [25–28]. Diese sind sehr breit aufgestellt und führen in ihren Datenbanken auch Warehouse Management Software (WMS), Warehouse Execution Systeme (WES) oder Supply Chain Management (SCM) Software, die in der Logistik eingesetzt werden. Durch den fehlenden Fokus ist hier jedoch zumindest fraglich, ob Personen mit konkreten Problemen im Logistik-Kontext diese überhaupt finden.

Das stellt ein allgemeines Problem der breit aufgestellten Plattformen dar, die nur selten detaillierte Informationen zu den übergeordneten Technologien anbieten, sodass die Anwender in der Regel sehr genau wissen müssen, wonach sie suchen.

Auf der anderen Seite existieren technologiespezifische Plattformen, die sich z.B. auf Automated Guided Vehicles (AGVs) und Autonomous Mobile Robots (AMRs) [19–22], oder Exoskelette [23, 24] spezialisieren. Diese gehen deutlich mehr in die Tiefe und bilden eine große Anzahl an Produkten in ihrer Datenbank ab, die anhand mehr oder weniger ausgeprägter Filter durchsucht werden können.

Für eine qualifiziertere Technologie- und Produktauswahl bieten einige Plattformen weiterführende Hilfestellung, beginnend bei Informationsmaterial, über Showcases und Best-Practice-Guides bis hin zu rudimentären Auswahlassistenten, die allerdings nur unwesentlich über die Möglichkeiten der Katalogfilter hinausgehen.

Die praxisseitigen Defizite unterstreichen den Bedarf an einem methodisch transparenten Empfehlungssystem und liefern zugleich konkrete Anforderungen für dessen Gestaltung, die in Kapitel 6 ausgeführt werden.

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Onlineplattformen mit Informationen zu Technologien (T), Produkten (P) und Anbietern (A) aus dem Bereich der Intralogistik (: nicht durchsuchbar)*

Plattform	Infos	Fokus	Relevante Technologien	Quelle
Plattform Industrie 4.0	T	Breit: Industrie 4.0	Allgemein Industrie 4.0	[12]
MotionMiners SOLUTIONS	T, P, A*	Breit: Intralogistik	Hardware, Software, Dienstleistungen, Organisationsstrategien und -methoden	[13]
even logistics	P, A	Breit: Intralogistik	Hardware, Software, Dienstleistungen	[14]
logikclick.io	P	Breit: Intralogistik	Hardware	[15]
DirectIndustry	P	Allgemein: Industriehardware	Intralogistik: Hardware	[16–18]
Mobile Robot Directory	P, A	Technologiespezifisch	AGVs und AMRs	[19]
AGV Network	P, A*	Technologiespezifisch	AGVs und AMRs	[20]
Lots of Bots	P, A*	Technologiespezifisch	AGVs und AMRs	[21]
SYNAOS	P, A*	Technologiespezifisch	AGVs und AMRs	[22]
Exoskeleton Report	P, A*	Technologiespezifisch	Exoskelette	[23]
exoskelette.com	P, A*	Technologiespezifisch	Exoskelette	[24]
SelectHub	P	Allgemein: Enterprisesoftware	WMS, WES	[25]
Software Advice	P	Allgemein: Enterprisesoftware	WMS	[26]
Gartner Peer Insights	P	Allgemein: Enterprisesoftware	WMS, Yard Management	[27]
OMR Reviews	P	Allgemein: Enterprisesoftware und Unternehmens-Dienstleistungen	WMS, WWS, SCM, Versandsoftware, Yard Management	[28]
automate.org (A3)	P, A	Allgemein: Automatisierungstechnik	Fördertechnik	[29]
induux.de	T, A	Allgemein: Automatisierungstechnik	Hardware, Software	[30]

2.2 AUTOMATISIERTE METHODEN ZUR ENTSCHEIDUNGSFINDUNG

Zur Entscheidungsunterstützung wird zwischen manuellen und automatisierten Verfahren unterschieden. Die ersten Ansätze zur Systemauswahl in der Intralogistik basieren auf manuellen, methodengestützten Verfahren zur multi-kriteriellen Entscheidungsfindung (Multi-criteria decision-making, MCDM), wie z.B. der Nutzwertanalyse (NWA) nach Zangemeister [31], der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225 [32], dem Analytic Hierarchy Process (AHP) nach Saaty [33] oder verwandte Methoden wie TOPSIS [34]. Diese finden breite Anwendung in der Auswahl von Förder- und Materialflusstechnik (Material Handling Equipment, MHE) [35–37], haben jedoch den Nachteil, dass ihr Einsatz für große Lösungsräume aufwändig und im Kontext subjektiver, unsicherheitsbehafteter Attribute ungeeignet ist [38].

Automatisierte Expertensysteme können auch ohne kontinuierliche Experteninteraktion eingesetzt werden. Frühe, regelbasierte Systeme wie MATHES [39] ermöglichen die Auswahl aus umfangreichen Katalogen mithilfe einfacher Wenn-Dann-Regeln. Ein Ranking, wie durch die zuvor ge-

nannten Methoden (AHP, NWA, etc.), ist hiermit jedoch nicht möglich, sodass die Anwendung eher in einer automatischen Vorselektion aus einer manuell gepflegten, starren Wissensbasis liegt. Hier greifen hybride Ansätze, die Automatisierung und Nachvollziehbarkeit verbinden und die regelbasierte Vorauswahl mit einer Methode zum MCDM-Ranking, wie z.B. AHP, kombinieren [40–42]. Jüngere Entwicklungen erweitern die Regelbasis um unscharf definierte, Fuzzy-Logic-basierte Regelansätze, die bei der Vorauswahl die vorhandenen Unsicherheiten in den Attributen berücksichtigen können [43, 44].

Dies verbessert zwar den Umgang mit der Datenbasis, die Entwicklung und Konfiguration der Regelsätze sind aber nach wie vor aufwändig. Perspektivisch können hybride Systeme aus KI, maschinellem Lernen und Wissensgraphen die datengetriebene und wissensbasierte Empfehlung miteinander verknüpfen [45]. Der Vorteil liegt in der Erweiterbarkeit, Wiederverwendbarkeit und maschinellen Interpretierbarkeit des Domänenwissens gegenüber klassischen Regelsystemen. Dieser Ansatz ordnet sich in die Entwicklung der Smart Consulting Services (SCS) ein, die Beratungsleistungen mit digitalen Werkzeugen zunehmend automatisieren [46]. Für die Empfehlung sowie Optimierung setzen die-

se SCS auf die grundlegende Funktion der automatischen Erhebung von Informationen sowie deren Analyse.

2.3 AUTOMATISIERTE DATENERHEBUNG & -ANALYSE

Für die Datenerhebung und -auswertung haben sich für den Bereich intralogistischer Anwendungen verschiedene Ansätze etabliert, die die klassische, subjektive und aufwändige manuelle Prozessaufnahme (etwa nach Methods-Time Measurement (MTM) oder REFA-Methode) ergänzen oder ersetzen.

Process Mining kann aus den Ereignisprotokollen von WMS- oder Enterprise Resource Planning (ERP)-Systemen die tatsächlichen Prozessabläufe rekonstruieren und so Abweichungen und Engpässe aufdecken. Systematische Übersichten belegen die zunehmende Anwendung in Produktion und Logistik [47, 48].

Darüber hinaus erfolgt das sogenannte Motion-Mining, wobei tragbare Inertialsensoren (IMU) und Bluetooth (BLE)-Beacons zur Aufnahme von Bewegungsdaten genutzt werden. Mit diesen werden Mitarbeitende und Fahrzeuge temporär ausgestattet. Mittels maschineller Aktivitätserkennung lassen sich Weg- und Pick-Zeiten sowie ergonomische Belastungen für einzelne Prozessschritte automatisiert erkennen und verorten [49, 50]. Neben IMUs und BLE kommen dazu auch Ortungssysteme auf Basis von Ultra-Wideband (UWB) zum Einsatz, um z.B. Suchzeiten, blockierte Wege, ungenutzte Stapler und lange Liegezeiten zu erkennen [51] und in einer Heatmap darzustellen, um Problemstellen zu identifizieren [52].

Neben dedizierter Technik zur Erfassung von Bewegungsdaten können auch Sensoren in ohnehin genutzten Geräten, wie z.B. Handrucksensoren verwendet werden, um die Bewegungen der Mitarbeiter zu analysieren und Probleme zu identifizieren, die die Prozesszeiten oder die Ergonomie negativ beeinflussen [53].

Auf die Ermittlung solcher ergonomischen Auswirkungen haben sich die Firmen Predimo [54] und scalefit [55] spezialisiert und nutzen mehrere am Körper getragene Sensoren, um mithilfe eines detaillierten Modells des Muskel-Skelett-Apparates Kräfte auf Muskeln und Gelenke zu erfassen. Anhand der Messwerte können Experten die Ergonomie der Prozesse verbessern, indem z.B. neue Technologien zur Senkung der körperlichen Belastung eingeführt werden.

Diese Verfahren liefern die problemseitige Datengrundlage, die ein automatisiertes Auswahlssystem mit den katalogseitigen Lösungsattributen verknüpfen muss, und schließen damit den Kreis zwischen Prozessanalyse, Datenbasis und Technologieempfehlung.

2.4 ZWISCHENFAZIT ZUM STAND DER TECHNIK

Der Stand der Forschung und Technik zeigt, dass die verbreiteten Technologiekataloge in Summe zwar einen breiten Marktüberblick bieten, jedoch Anwendenden ohne einschlägiges Fachwissen keine fundierte Technologieauswahl ermöglichen. Hierbei fehlt ein geführter Auswahlprozess mit einer nachvollziehbaren Bewertungsmethodik. Diese Kompetenz besitzen die vorgestellten Methoden zur Entscheidungsunterstützung. Weitgehend automatisierte, lernende Empfehlungsverfahren, die den Auswahlprozess selbst datenbasiert und adaptiv gestalten, sind für die intralogistische Technologieauswahl bislang jedoch nur ansatzweise erforscht. Als Quelle für die dafür nötigen vergleichbaren und strukturierten Technologiedaten ließe sich theoretisch auf Technologiekataloge zurückgreifen, jedoch weisen die hier vorgestellten Plattformen Probleme hinsichtlich Qualität, Struktur und Umfang auf. Die darüber hinaus erforderlichen Eingangsdaten, insbesondere Prozessdaten und Optimierungspotenziale, können zwar mithilfe sensorgestützter Verfahren zur Prozessaufnahme und -analyse ermittelt werden, allerdings fehlt diesen der Anschluss an ein System zur Technologieauswahl. Die Verbindung von formalisiertem Domänenwissen, maschinellem Lernen und einer belastbaren, aufbereiteten Datenbasis aus Katalog- und Prozessdaten stellt damit ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Entwicklungen dar.

3 METHODIK

Für die Anforderungsdefinition des technischen Systems wird methodisch auf den internationalen Standard ISO/IEC/IEEE 29148 [56] zurückgegriffen. Dieser sieht vor, zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen zu differenzieren. Funktionale Anforderungen beschreiben die geforderten Systemfunktionen. Nicht-funktionale Anforderungen unterscheiden zwischen Qualitätsmerkmalen und Randbedingungen. Die Identifikation der Randbedingungen sowie wettbewerbskritischer Qualitätsmerkmale erfolgt ergänzend durch eine systematische Marktanalyse konkurrierender Plattformen nach dem Ansatz des Market-Driven Requirement Engineering (MDRE) [57]. Dabei ermittelte Gemeinsamkeiten sowie Stärken und Schwächen dienen der Schärfung des funktionalen Anforderungsprofils und folgen der ingenieurwissenschaftlich etablierten Methodik zur systematischen Schwachstellenanalyse bestehender Lösungen im Rahmen der Aufgabenklärung [58]. Die Anforderungen der Stakeholder und der operationelle Kontext werden durch eine Stakeholderanalyse ermittelt [59]. Diese werden mittels qualitativer, strukturierter Interviews mit potenziellen Kunden und Endanwendern ermittelt, um deren spezifische Bedürfnisse empirisch zu erfassen [60].

Auf Basis des konsolidierten Anforderungsprofils erfolgt die anschließende Konzeptentwicklung. Dieses metho-

dische Vorgehen stellt sicher, dass die konzeptionellen Entscheidungen auf einer fundierten Grundlage getroffen werden.

4 MARKTANALYSE

Als zentraler Baustein für die Technologieempfehlung dienen Lösungskataloge. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des MDRE insgesamt 17 Plattformen recherchiert, die Informationen zu Technologien für den intralogistischen Einsatz bereitstellen. Diese wurden analysiert und hinsichtlich folgender Kriterien miteinander verglichen:

- Inhaltliche Abdeckung
- Datenstruktur & -qualität
- Entscheidungsunterstützung
- Vergleichsmethodik
- Geschäftsmodell

Je nach Abdeckung der einzelnen Kategorien wurden die Plattformen qualitativ bewertet und anhand von Harvey Balls in Tabelle 2 visualisiert. Dabei entspricht ○ keiner Übereinstimmung mit den nachfolgend beschriebenen positiven Ausprägungen innerhalb der Kategorien, ● einer sehr hohen.

Die **inhaltliche Abdeckung** ist dabei von übergeordnetem Interesse. Ein umfangreicher Lösungsraum

ist absolut notwendig, um eine qualifizierte Auswahl für spezifische Probleme zu gewährleisten. Zwischen den recherchierten Plattformen variiert der Umfang des Angebots deutlich, sowohl in der Breite der Produktgruppen (d.h. die abgedeckten Technologien) als auch in der Tiefe. Dabei geben die Plattformen entweder eine breite Übersicht über eine Vielzahl an Intralogistiktechnologien, weisen dann aber häufig eine geringe Tiefe auf. Auf der anderen Seite existieren auch sehr spezialisierte Plattformen, die in ihren Katalogen ein sehr schmales Technologiespektrum abbilden, dieses aber mit einer sehr großen Produkttiefe. Für die automatische Entscheidungsunterstützung ist das insofern von Interesse, da ohne einen breiten und darüber hinaus auch tiefgehenden Marktüberblick keine qualifizierte Empfehlung gegeben werden kann.

Mit dem Detailgrad der abgebildeten Inhalte ist das Kriterium der **Datenstruktur & -qualität** eng verbunden. Ausschlaggebend für die automatisierte Entscheidungsunterstützung sind aktuelle, vergleichbare und vollständige Daten, die eine konsistente Datenstruktur besitzen müssen. Die Varianz unter den untersuchten Plattformen ist diesbezüglich groß. Das beginnt bei der Taxonomie der katalogisierten Technologien, die je nach Plattform mehr oder weniger differenziert ausgeführt ist. In der Regel liegt der Großteil der Informationen in Form unstrukturierter Fließtexte vor und strukturierte Daten werden häufig nur ergänzend für die Filterung genutzt. Falls diese vorhanden sind, beschränken sie sich auf wenige Attribute mit teilweise uneinheitlichen Attributdefinitionen zwischen verschiedenen Produkten derselben Kategorie. Eine maschinelle Lösungsauswahl ist hierdurch erschwert und macht ei-

Tabelle 2: Vergleich der Onlineplattformen hinsichtlich der Kriterien inhaltliche Abdeckung, Datenstruktur & -qualität, Entscheidungsunterstützung, Vergleichsmethodik, Geschäftsmodell

Plattform	Inhalt	Daten	Entscheidung	Vergleich	Geschäftsmodell
Plattform Industrie 4.0	○	○	○	○	●
MotionMiners SOLUTIONS	●	●	●	○	●
even logistics	●	○	○	○	●
logiklick.io	●	○	○	○	●
DirectIndustry	●	●	○	○	○
Mobile Robot Directory	○	○	●	○	○
AGV Network	○	○	○	○	○
Lots of Bots	○	●	●	○	○
Exoskeleton Report	○	○	○	○	●
exoskelette.com	○	○	○	○	○
SelectHub	○	○	○	○	○
Software Advice	○	○	○	○	○
Gartner Peer Insights	○	○	○	○	○
OMR Reviews	○	○	○	○	○
automate.org (A3)	○	○	○	○	○
induux.de	○	○	○	○	○

ne manuelle Aufbereitung oder Text-Mining erforderlich. Darüber hinaus wurden veraltete Informationen, wie z.B. nicht mehr angebotene Produkte, als weiteres Problem identifiziert.

Die eigentliche Technologie- und Produktauswahl erfordert weitere Mittel zur **Entscheidungsunterstützung**, falls das explizite Fachwissen über die Auswahl der spezifischen Technologien fehlt. Verschiedene Hilfsmittel können die Anwender unterschiedlich stark in ihrem Entscheidungsprozess unterstützen und dabei das nötige Expertenwissen reduzieren. Die Plattformen bieten hierzu neben direkten Beratungsangeboten, Ratgeberinhalte (White-Paper, Praxis-Bespiele, Leitfäden mit expliziten Auswahlkriterien) oder interaktive Matching-Systeme. Ein automatisierter Prozess, der über die reine Filterung hinausgeht und einen tatsächlichen, qualifizierten Vergleich der Lösungen erlaubt, ist nur in Ansätzen vorhanden.

Vergleichsmethodik: Um eine quantifizierte Entscheidung zu treffen, sind nachvollziehbare Methoden zum Vergleich unterschiedlicher Lösungen erforderlich. Die Möglichkeiten zum Vergleich sind zwischen Plattformen unterschiedlich stark ausgeprägt. Neben reinen Listen, über eine unkommentierte Gegenüberstellung von Eigenschaften, bis hin zu unterschiedlich stark strukturierten Reviews, weisen einige Plattformen auch ein Scoring-System auf. Diese sind jedoch nur zum Teil transparent und nachvollziehbar gestaltet.

In diesem Zusammenhang spielt auch das **Geschäftsmodell** der Plattformen eine Rolle. Mechanismen, die wirtschaftliche Anreize für die Plattformbetreiber schaffen, können die Funktionalität und Objektivität der Entscheidungsfindung reduzieren. So schafft die Finanzierung mancher Plattformen durch gelistete Anbieter (Werbung, Lead-Generierung) strukturelle Anreize, bestimmte Lösungen bei der Empfehlung zu bevorzugen, was nicht immer transparent dargestellt ist.

Die Lücken der analysierten Plattformen lassen sich direkt in Anforderungen an ein umfassendes System zur automatisierten Technologieempfehlung umwandeln.

5 STAKEHOLDERANALYSE

Im Anschluss an die Marktanalyse wurden die verschiedenen Stakeholder des Projekts identifiziert und eine Analyse durchgeführt, um die relevanten Interessensgruppen des Systems zu ermitteln. Für die Gruppe mit dem größten Einfluss und Interesse wurden darauf basierend weiterführende Interviews durchgeführt.

5.1 IDENTIFIKATION RELEVANTER STAKEHOLDER

Die Identifikation der Stakeholder erfolgte im Rahmen eines strukturierten Workshops innerhalb des Projektteams. Anschließend wurden der Einfluss und das Interesse der einzelnen Gruppen auf das Entwicklungsprojekt vom Projektteam betrachtet und bewertet. Diese wurden hinsichtlich der Dimensionen Einfluss und Interesse in einer Stakeholder-Matrix (Abbildung 1) zusammengefasst.

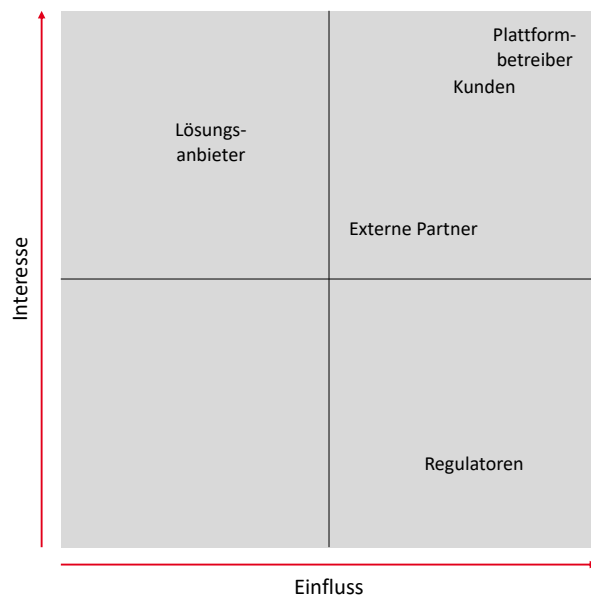


Abbildung 1: Stakeholder-Matrix in Anlehnung an Mendelow [61] zur Einordnung der unterschiedlichen Interessensgruppen nach Interesse und Einfluss.

Zentrale Gruppe stellen die **Kunden** dar. Ihr Interesse ist hoch, da sie Schwachstellen in ihren Prozessen erkennen und beheben, diese mithilfe der Plattform optimieren und Unterstützung bei komplexen Entscheidungen erhalten möchten. Ebenfalls hoch ist ihr Einfluss: Wird die Plattform von den Kunden nicht angenommen, scheitert das Vorhaben. Darüber hinaus prägt ihr Feedback maßgeblich das Produktdesign.

Der **Plattformbetreiber** verantwortet die Bereitstellung der Plattform und Pflege der Daten sowie die Akquise von Lösungsanbietern. Er hat ein sehr großes Interesse am Erfolg der Plattform und – durch die Steuerung des gesamten Vorhabens – einen sehr hohen Einfluss auf die inhaltliche Gestaltung. Da der Plattformbetreiber zugleich Teil des Projektteams ist, finden seine Interessen und Anforderungen unmittelbar Eingang in die Konzeption und Entwicklung des Systems.

Das Interesse an der Plattform durch die Gruppe der **Regulatoren** ist gering. Da sie über die Einhaltung geltender Datenschutzrichtlinien sowie die bestimmungsgemäße Verwendung der Fördermittel wachen, ist ihr Einfluss auf das Projekt von großer Bedeutung. Durch die sensorbasierte Erfassung von Bewegungsdaten werden sensible Daten verarbeitet, die eine potenzielle Mitarbeiterüberwachung darstellen oder personenbezogene Daten erfassen. Werden gelten- de Vorgaben – insbesondere die DSGVO – nicht eingehalten, kann das Projekt gestoppt werden oder scheitern.

Externe Partner arbeiten mit dem Betreiber an der Umsetzung der Software. Das kann, wie im vorliegenden Fall, die Unterstützung während der Konzeptphase sein, etwa für die Benutzungsschnittstelle. Darüber hinaus können diese als Dienstleister auch Teilfunktionen der Plattform umsetzen. Sie haben ein hohes geschäftliches Interesse am Projekterfolg und einen großen Einfluss auf die Architektur und die konkrete technische Umsetzung, sind dabei jedoch an die Anforderungen des Auftraggebers gebunden und grundsätzlich austauschbarer als die Kunden.

Als letzte Gruppe wurden die **Lösungsanbieter** identifiziert. Diese bieten technische Lösungen und Beratungsleistungen zur Unterstützung intralogistischer Prozesse an. Ihr Interesse, auf der Plattform sichtbar zu sein, ist groß. Ihr Einfluss auf die Gestaltung der Plattform ist jedoch gering, da ihre Lösungen nach vorgegebenen Kriterien in den Lösungskatalog aufgenommen werden. Für den Erfolg der Plattform sind sie jedoch nicht zu vernachlässigen, da ohne ihre Beteiligung die Darstellung eines aktuellen Lösungskatalogs nur mit erhöhtem Aufwand durch die Plattformbetreiber selbst erfolgen kann.

Auf Basis dieser Bewertung wurde entschieden, Interviews mit den Kunden/Anwendern der Plattform zu führen, da ihr Einfluss und Interesse als besonders entscheidend für den Projekterfolg eingeschätzt wurden. Auf die übrigen Stakeholder besteht demgegenüber ein direkterer Zugriff bzw. eine klare Vorstellung ihrer Anforderungen. Die Strukturen zur Datenaufbereitung und die Inhalte der Plattform werden gemeinsam mit den Lösungsanbietern erarbeitet und für die vorliegende Betrachtung festgelegt. Die externen Partner erhalten ein Lasten- und Pflichtenheft und lassen sich aufgrund der eigenen Entwicklungskompetenz des Plattformbetreibers eng überwachen, weshalb sie als unkritisch eingestuft werden. Die Interessen des Plattformbetreibers fließen als Teil des Projektteams ohnehin unmittelbar ein, und die Einhaltung der regulatorischen Vorgaben ist durch die Beachtung geltender Richtlinien, Gesetze und Normen sichergestellt.

5.2 INTERVIEWS MIT POTENZIELLEN ANWENDENDEN

Für die Interviews wurde ein Leitfaden erarbeitet, auf dessen Grundlage vier Logistikexperten aus den Branchen Medizintechnik, Schwerindustrie, Logistikberatung und Logi-

stikdienstleistung befragt wurden. Die Ergebnisse der Interviews wurden anhand der leitenden Fragen in 14 Kategorien zusammengefasst (siehe Tabelle 3 im Anhang dieses Beitrags).

Aus den Interviews lassen sich vier prägnante Kernaussagen ableiten. Erstens steht eine „klassische“, rein auf Kosten und ROI ausgerichtete Sichtweise einer stärker menschenzentrierten Perspektive gegenüber, die Ergonomie und Mitarbeiterbeteiligung betont. Zweitens wünschen sich die Experten einen Marktplatz, der zunächst ohne Anmeldung funktioniert, zugleich aber unmittelbar vergleichbare, einfache und individuelle Lösungen liefert. Drittens definiert sich der gewünschte Innovationsgrad wesentlich über die Berücksichtigung von Startups bei der Lösungsauswahl – ein Punkt, in dem die Experten sehr unterschiedliche Positionen vertreten. Viertens ist die Bereitschaft, selbst Daten beizutragen, also Bewertungen zu verfassen oder Best Practices zu teilen, gering, obwohl entsprechende Informationen von anderen sehr gerne genutzt würden.

6 ANFORDERUNGEN

Aus den Interviewergebnissen in Kapitel 5.2 sowie der Marktanalyse in Kapitel 4 wurden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen abgeleitet. Diese wurden den bereits in der Marktanalyse verwendeten Kategorien *Inhaltliche Abdeckung*, *Datenstruktur & -qualität*, *Entscheidungsunterstützung*, *Vergleichsmethodik* und *Geschäftsmodell* zugeordnet. Zusätzlich wurde die weitere Dimension der *Prozessaufnahme* berücksichtigt, da die vorgelagerte, standardisierte Prozessaufnahme eine notwendige Eingangsgröße für die automatisierte Empfehlung ist. Diese sind in Tabelle 4 zusammengefasst und im Folgenden ausgeführt.

Prozessaufnahme: Aus den Interviews geht hervor, dass die Erhebung der Ist-Prozesse in der Praxis heterogen und überwiegend unsystematisch erfolgt. Für eine automatische Empfehlung muss die Plattform die Nutzenden bei einer standardisierten Prozessaufnahme unterstützen und hierfür entsprechende Leitlinien kodifiziert bereitstellen (F-1).

Inhaltliche Abdeckung: Die untersuchten Plattformen sind entweder breit und oberflächlich oder spezialisiert, dafür aber umfangreich. Für eine qualifizierte Empfehlung ist ein Lösungskatalog mit hinreichendem Umfang (F-2) notwendig, der Technologien, Produkte/Dienstleistungen und Anbieter integriert (F-3). Auf Angebotsebene muss der Lösungskatalog technologieübergreifend Hardware, Software, Dienstleistungen und Organisationsmaßnahmen (F-4) umfassen, um ein breites Spektrum an Optimierungsansätzen bei der Empfehlung zu berücksichtigen. Um dem in den Interviews sichtbaren Spannungsfeld zwischen Innovation und etablierten Technologien zu begegnen, muss der

Katalog unterschiedliche Reifegrade (F-5) sowie etablierte Hersteller und Startups (F-6) abbilden.

Datenstruktur und Qualität: Aus der Marktanalyse geht hervor, dass der Großteil der Informationen unstrukturiert als Fließtext vorliegt. Strukturierte Daten, sofern vorhanden, beschränken sich auf wenige Attribute, weisen uneinheitliche Definitionen auf und sind teilweise unvollständig oder veraltet. Für eine maschinelle Auswahl werden standardisierte Attribute (F-7) benötigt, wodurch auch eine Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung (NF-1) ermöglicht wird. Um den manuellen Aufwand der Datenpflege gering zu halten, ist eine automatisierte Attributextraktion aus unstrukturierten Daten notwendig (F-8). Neue Dateneinträge sind vor ihrer Veröffentlichung einer fachlichen Prüfung zu unterziehen (NF-2) und die Aktualität der Katalogdaten ist durch eine dokumentierte Aktualisierung zu gewährleisten (NF-3).

Entscheidungsunterstützung: Die befragten Anwender formulieren konkrete Erwartungen an die Entscheidungsunterstützung. Hier wird insbesondere das Hervorheben schnell umsetzbarer Maßnahmen mit klarem Stärken-Schwächen-Profil betont (F-9). Da den Anwendern häufig das spezifische Fachwissen zur Technologieauswahl fehlt, sollen für jede Technologieklasse grundlegende Informationen bereitgestellt werden (F-10). Ergänzend wünschen sich die Experten Praxisbeispiele als Inspiration und als Beleg für die Praxistauglichkeit (F-11). Da mehrere Experten die Vorauswahl aufgrund zu komplexer Anforderungen als Hürde beschreiben, können ergänzend Auswahl-Ratgeber und Checklisten zur Anforderungsklä rung vor der eigentlichen Technologieauswahl bereitgestellt werden (F-14). Mit einem interaktiven Auswahlassistenten, der die Nutzeranforderungen erfasst und passende Technologien vorschlägt (F-13), kann dieser Problematik ebenfalls begegnet werden. Den bestehenden Plattformen fehlt ein solcher geführter Auswahlprozess, der über einfache Filter hinausgeht und einen qualifizierten Vergleich der Lösungen ermöglicht.

Um den Mehrwert eines Systems nach der Einführung systematisch zu überprüfen, müssen entsprechende Leitlinien zur Erfassung der Systemnutzung vorliegen (F-12). Dieser Aspekt wird den Aussagen aus den Interviews entsprechend vernachlässigt. Die dabei ebenfalls festgestellte geringe Feedbackbereitschaft und die Präferenz für persönlichen Kontakt müssen durch Möglichkeiten zur Kontaktaufnahme berücksichtigt werden (F-15).

Vergleichsmethodik: Die eingesetzte Vergleichsmethodik ist bei den untersuchten Plattformen unterschiedlich ausgeprägt und reicht von reinen Listen über unkommentierte Gegenüberstellungen bis hin zu Scoring-Systemen, die jedoch nur teilweise nachvollziehbar sind. Die Interviewpartner unterstreichen den Bedarf an einer methodisch fundierten Bewertung und wünschen sich quantifizierbare Kennzahlen als Entscheidungsgrundlage. Statt einer reinen

Auflistung soll eine mehrdimensionale Scoring- bzw. Bewertungslogik eingesetzt werden (F-16), wobei die Bewertungskriterien für die Nutzenden transparent und anpassbar sein müssen (F-17).

Als übergeordnetes Qualitätsmerkmal fordern die Experten die Nachvollziehbarkeit bzw. Erklärbarkeit der Empfehlung (NF-4); diese dient entweder der Schaffung interner Akzeptanz (Exp. 1 und 3) oder der Absicherung der eigenen Entscheidung (Exp. 2 und 4) und ist damit eine wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz der Plattform.

Geschäftsmodell: Die Marktanalyse weist darauf hin, dass das Geschäftsmodell der Plattformen Empfehlungen verzerren kann. Aus diesem Grund müssen Werbung und Bewertungslogik strikt getrennt werden (keine Pay-to-rank-/Pay-to-feature-Mechanismen) (NF-5). Diese Anforderung ist eng an die Offenlegung der Vergleichskriterien (F-17) gekoppelt, da nur eine transparente und zugleich anreizfreie Bewertung das Vertrauen der Nutzenden rechtfertigt. Aus den Gesprächen mit den Anwendenden geht hervor, dass diese Kernfunktionen ohne Paywall und Registrierungs-zwang nutzbar sein müssen (NF-6) und eine Anmeldung nur bei klarem Mehrwert akzeptiert wird. Ergänzende sollten die in den Interviews beobachteten Verhaltensmuster beim Abschluss des Entscheidungsprozesses und bei der Datenbereitstellung adressiert. Da Hardware-Entscheidungen als langwierig beschrieben werden und ein Proof of Concept bzw. Testphasen vor dem Rollout üblich sind, sollen Optionen für Hardwaretests, Mietmodelle oder geführte Proof of Concepts angeboten werden, um das Investitionsrisiko der Anwender zu minimieren (F-18).

7 KONZEPT

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein ganzheitliches, datenbasiertes Plattformkonzept entwickelt. Abbildung 2 illustriert das entwickelte Konzept, das als geschlossener Regelkreis aus sechs aufeinander aufbauenden Phasen konzipiert ist.

Baustein 1: Sensorgestützte Prozesserschfassung und Painpoint-Identifikation

Zur Erfassung der Prozessdaten kommen Beacons sowie von den Mitarbeitenden getragene Wearables oder an Flurförderzeugen angebrachte Sensorik zum Einsatz. Um die resultierenden Rohdaten in semantische Prozessschritte zu übersetzen, werden atomare Aktivitäten wie Greifen, Fahren, Suchen oder Transportieren identifiziert.

Die Ermittlung konkreter Optimierungspotenziale erfolgt automatisiert. Über die Verteilung der Prozesszeiten und Aktivitätsmuster werden statistische Ausreißer anhand definierter Quantile identifiziert. Durch den Abgleich mit historischen Benchmark-Daten aus vergleichbaren Projek-

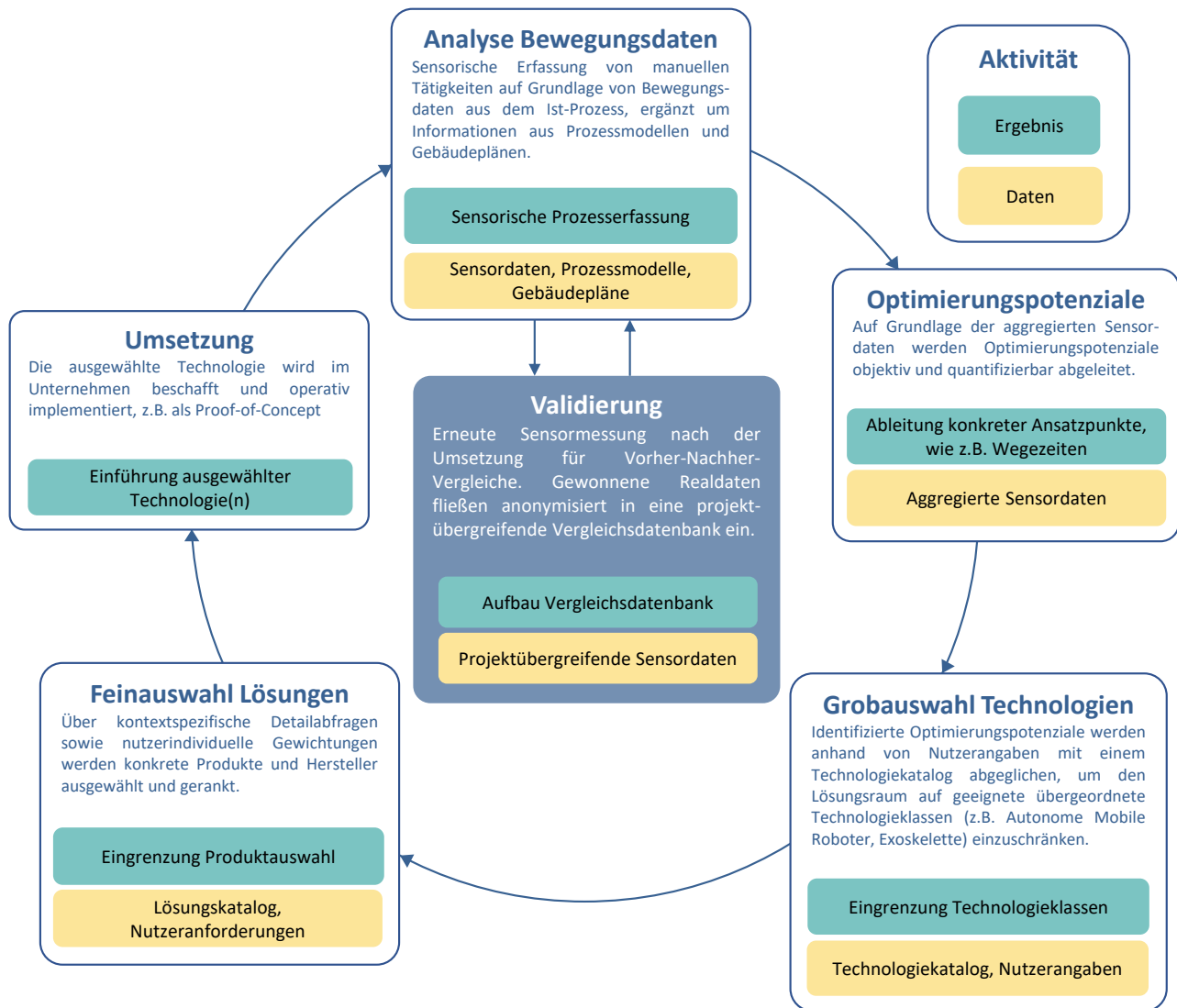


Abbildung 2: Konzept des Entscheidungsassistenzsystems zur Technologieauswahl zur Unterstützung des intralogistischen Arbeitsprozesses

ten lassen sich systemisch Optimierungspotenziale ableiten, wie beispielsweise:

- Überdurchschnittlich lange Transportwege
- Hohe Orientierungs- und Suchzeiten
- Häufige ergonomisch belastende Richtungswechsel oder Greifhöhen
- Lange Informationsaufnahmezeiten

Baustein 2: Mehrstufiger, kriterienbasierter Auswahlprozess

Um der geforderten Einfachheit bei gleichzeitiger Genauigkeit gerecht zu werden, ist der Auswahlprozess dreistufig aufgebaut:

Stufe 1 (Grobauwahl - Technologieklassen): In einem ersten Schritt wird eine Übereinstimmung zwischen den identifizierten Optimierungspotenzialen und übergeordneten Technologieklassen hergestellt. Aufgrund der Vielzahl an vorliegenden unstrukturierten Texten zur Beschreibung der Technologien ist eine rein Attribut-basierte Auswahl nicht ausreichend. Durch Embedding der

Texte können diese semantisch mit den Optimierungspotenzialen verknüpft und durch ein Large Language Model (LLM) ausgewertet werden, das die Auswahl hinsichtlich der Forderung nach Nachvollziehbarkeit (NF-4) begründen kann. An dieser Stelle kann bereits eine Reduktion des Lösungsraums stattfinden, indem Lösungen durch gezielte Rückfragen des LLMs zu bereits vorhandenen Technologien ausgeschlossen werden können oder durch sinnvolle Kombinationen eine Priorisierung erfolgen kann. Das Ergebnis dieser Stufe ist die Reduktion des Lösungsraums auf spezifische Technologien (z. B. Entscheidung für autonome Mobile Roboter anstelle manueller Wagen).

Stufe 2 (Spezifikation - Produkttypen): Nachdem der Lösungsraum im ersten Schritt auf geeignete Technologieklassen eingegrenzt wurde, dient der zweite Schritt der weiteren Reduzierung der Lösungen auf Produktebene. Die initial verwendeten Bewegungsdaten können zwar zur Problemidentifikation und Ableitung von Optimierungspotenzialen verwendet werden, für eine detaillierte Lösungsauswahl erforderliche Rahmenbedingungen im Einsatzumfeld liefern diese jedoch nicht. Fehlende Parameter werden über einen interaktiven Anforderungs-Assistenten (F-13) erhoben, der kontextabhängig gezielte, strukturierte Fragen, abhängig von der gewählten Technologieklasse, an den Nutzer stellt. Dabei kann es sich um Nachfragen zu infrastrukturellen Randbedingungen wie Gangbreiten, Lasten, Ladungsträgern oder IT-Infrastruktur handeln sowie um organisatorische Restriktionen. Durch den dynamischen Prozess und als Grundlage für diesen Schritt können dabei Informationen aus technologiespezifischen Auswahl-Ratgebern und Checklisten (F-14) einbezogen werden. Die ermittelten Parameter werden mit den standardisierten Attributen des Katalogs (F-7) abgeglichen, um den Lösungsraum hinsichtlich der Einsatzumgebungen einzuschränken.

Stufe 3 (Feinauswahl und Ranking - Produktebene): Im letzten Schritt des Auswahlprozesses erfolgt ein Ranking der verbleibenden Produkte anhand einer mehrdimensionalen Bewertungslogik (F-16), die einen Vergleich anhand mehrerer, in der Marktanalyse und den Interviews identifizierter Kriterien ermöglicht (z.B. Wirtschaftlichkeit, Ergonomie, Reifegrad und Integrationsaufwand). Da die Gewichtung der Kriterien bei verschiedenen Szenarien und Anwendern variieren kann, werden diese nicht starr definiert, sondern interaktiv festgelegt (F-17). Als Ergebnis liefert der letzte Schritt eine nachvollziehbare (NF-4) Empfehlung für das initial ermittelte Problem.

Baustein 3: Validierung, Benchmarking und datenschutzkonformes Wissensmanagement

Nach der Implementierung der ausgewählten Lösung im Betrieb erfolgt die Validierung durch eine erneute sensorische Erfassung. Durch Vorher-Nachher-Vergleiche von Kennzahlen (z. B. zurückgelegte Wegstrecken, Vertei-

lung der Handhabungshöhen, Ausführungszeiten) wird der tatsächliche Zielerreichungsgrad objektiv nachgewiesen.

Um dem Interview-Ergebnis der geringen manuellen Bewertungsbereitschaft zu begegnen, setzt die Plattform auf ein passives Wissensmanagement. Die im Validierungsschritt anonymisiert erhobenen Sensordaten und Vorher-Nachher-Deltawerte fließen automatisch in eine zentrale Vergleichsdatenbank (Benchmark-Datenbasis) zurück. Damit entfällt für Unternehmen die Notwendigkeit, langwierige Freitextbewertungen zu verfassen. Die Plattform lernt implizit aus den Systemdaten. Diese stetig wachsende Datenbasis dient der Verbesserung der Machine-Learning-Modelle und verbessert fortlaufend die Vorhersagegenauigkeit und Empfehlungsqualität für künftige Anwender.

8 ZUSAMMENFASSUNG & FAZIT

Mit dem vorliegenden Beitrag werden Herausforderungen bei der Technologieauswahl zur Optimierung intralogistischer Prozesse adressiert. Das hierzu notwendige Know-How ist bei den Entscheidungstragenden in den Unternehmen häufig nicht vorhanden, sodass externe Hilfestellung erforderlich ist. Diesbezüglich wurden verschiedene Ansätze zur sensorgestützten Prozessaufnahme, dem Aufbau von Lösungskatalogen und zur Bereitstellung von Auswahlhilfen vorgestellt sowie bestehende Lücken aufgezeigt.

Auf Basis einer Marktanalyse von 17 Technologieplattformen sowie einer Stakeholderanalyse mit anschließenden Experteninterviews unter potenziellen Anwendern wurden Anforderungen an ein Assistenzsystem zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Technologien zur Prozessunterstützung für die Intralogistik aufgestellt. Als Ergebnis der Analysen konnte der Bedarf an einem System aufgezeigt werden, das Anwendende über eine strukturierte Prozessaufnahme zur Problemidentifikation bei der Lösungsauswahl und Validierung unterstützt. Das Konzept des Systems zur Entscheidungsunterstützung sieht sechs Phasen vor und beginnt mit einer sensorgestützten Prozesserschfassung und Problem-Identifikation, gefolgt von einem dreistufigen Auswahlprozess mit LLM-gestütztem Abgleich zwischen Prozessanforderungen und Technologiespezifikationen bis zu einem Ranking auf Produktebene. Abschließend folgt eine sensorbasierte Validierung. Dabei werden anonymisierte Vorher-Nachher-Daten erhoben und in einer projektübergreifenden Benchmark-Datenbasis gesammelt, mit der die geringe Bewertungsbereitschaft der Nutzenden kompensiert und die Empfehlungsqualität kontinuierlich verbessert wird.

Das entwickelte Konzept bildet die Grundlage für die Weiterentwicklung eines datenbasierten, lernenden Empfehlungssystems, das die identifizierte Lücke zwischen Prozesserschfassung und Technologieauswahl schließt. Für die weitere Forschung ergeben sich insbesondere die Umset-

zung und Evaluation des LLM-gestützten Matchings zwischen Problemen und Technologieklassen sowie die Validierung des Gesamtkonzepts im Rahmen von Pilotanwendungen mit den identifizierten Anwendungspartnern.

9 FÖRDERHINWEIS

Teile dieses Beitrags entstanden im Rahmen des Projekts „SENSOMAI“, das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Kennzeichen 01IS24047B gefördert wird.

LITERATUR

- [1] H. Corsten, Ed., *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2018. ISBN 9783110471304.
- [2] T. Gudehus, *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien*, studienausg. der 4., aktualisierten aufl. ed., ser. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg, 2012, vol. 1, ISBN 3642293581.
- [3] G. Ullrich and T. Albrecht, *Mobile Robotik in der Intralogistik: DIE Fibel für FTS und AMR*, 5th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2026. ISBN 3658475978.
- [4] J. Sydow and G. Möllering, *Produktion in Netzwerken: Make, buy & cooperate*, 3rd ed., ser. Vahlen eLibrary. München: Verlag Franz Vahlen, 2015. ISBN 978-3-8006-5049-1.
- [5] P. Sapel, M. Bega, F. Ercan, M. Schmitz, C. Hopmann, and B. Kuhlenkötter, “Effizient digitalisieren mit Shopfloor Services,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 118, no. 9, pp. 623–627, 2023, doi:10.1515/zwf-2023-1119.
- [6] M. Quandt, M. Kreutz, M. Freitag, and H. Stern, “Intelligente AR-basierte Assistenzsysteme/Intelligent AR-based assistance systems,” *wt Werkstattstechnik online*, vol. 114, no. 06, pp. 325–333, 2024, doi:10.37544/1436-4980-2024-06-77.
- [7] A. Börold, D. Schweers, and M. Freitag, “Towards Multimodal Information Systems for Assisting Humans in Production and Logistics Processes,” *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 1089–1094, 2023, doi:10.1016/j.procir.2023.09.130.
- [8] B. Pupkes, N. Hoppe, C. Petzoldt, and M. Freitag, “Exoskelette in der Intralogistik,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 119, no. 6, pp. 445–451, 2024, doi:10.1515/zwf-2024-1074.
- [9] N. H. Hoppe, L. Rolfs, C. Petzoldt, A. Putzka, and M. Freitag, “Planung und anforderungsgerechte Auswahl von FTS/Requirement-appropriate recommendation for automated guided vehicle systems,” *wt Werkstattstechnik online*, vol. 112, no. 04, pp. 232–237, 2022, doi:10.37544/1436-4980-2022-04-32.
- [10] IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, “DGUV Information 208-033 Anhang 3: Bewertung physischer Belastungen,” in *DGUV Information 208-033*, 2015.
- [11] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, “Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS),” 2022.
- [12] “Plattform Industrie 4.0 Themen- und Technologie-katalog.” [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Angebote-Ergebnisse/Themen-und-Technologie-katalog/themen-und-technologie-katalog.html>

- [13] MotionMiners GmbH, “MotionMiners SOLUTIONS.” [Online]. Available: <https://mpi.motionminers.com/de/solutions>
- [14] even logistics GmbH, “even logistics.” [Online]. Available: <https://www.even-logistics.com/>
- [15] io-consultant GmbH & Co.KG, “Logiklick.” [Online]. Available: <https://logiklick.io/>
- [16] VirtualExpo SAS, “Handhabungssysteme und Hebetchnik: Alle Hersteller aus dem Bereich der Industrie.” [Online]. Available: <https://www.directindustry.de/cat/handhabungssysteme-hebetchnik-S.html>
- [17] —, “Fördertechnik: Alle Hersteller aus dem Bereich der Industrie.” [Online]. Available: <https://www.directindustry.de/cat/foerdertechnik-BD.html>
- [18] —, “Exoskelett: Alle Hersteller aus dem Bereich der Industrie.” [Online]. Available: <https://www.directindustry.de/industrie-hersteller/exoskelett-249053.html>
- [19] “The Mobile Robot Directory.” [Online]. Available: <https://www.mobile-robots.com>
- [20] KMC Srls, “Types of Robots: AGV Network,” o.J. [Online]. Available: <https://www.agvnetwork.com/robot-showroom/robot-list>
- [21] WAKU Robotics GmbH, “Roboter-Suche (FTS, AMRs) für Logistik & Produktion - Lots of Bots.” [Online]. Available: <https://www.lotsofbots.com/de/robot-finder/>
- [22] SYNAOS GmbH, “Mobile Robot Finder: SYNAOS Intralogistics Platform.” [Online]. Available: <https://www.synaos.com/de/partners/mobile-robot-finder>
- [23] Exoskeleton Report LLC., “Exoskeleton Catalog,” o.J. [Online]. Available: <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/>
- [24] awb GmbH, “Exoskelette für die Industrie.” [Online]. Available: <https://www.exoskelette.com/>
- [25] SelectHub, “Software Selection Management Tool By Research Analysts.” [Online]. Available: <https://www.selecthub.com/>
- [26] “Best Bussines Software, Reviews and Comparisons: Software Advice 2026.” [Online]. Available: <https://www.softwareadvice.com/>
- [27] Gartner Inc., “Gartner Peer Insights: Find & Compare Enterprise Software and Service Reviews.” [Online]. Available: <https://www.gartner.com/peer-insights/home>
- [28] Software Reviews GmbH, “OMR Review: Finde Software & Services für dein Business.” [Online]. Available: <https://omr.com/de/reviews>
- [29] “Member Companies List.” [Online]. Available: <https://www.automate.org/companies>
- [30] induux International GmbH, “Intralogistik Anbieter.” [Online]. Available: <https://www.induux.de/anbieter/intralogistik>
- [31] C. Zangemeister, *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projekialternativen: Zugl.: , Berlin, Techn. Univ., Diss., 1970*, 4th ed. München: Wittenmann, 1976. ISBN 978-3-923264-00-1.
- [32] Verein Deutscher Ingenieure e.V., “Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung.” Berlin, 1998.
- [33] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*, 2nd ed. Pittsburgh: RWS Publ, 1990. ISBN 0-9620317-2-0.
- [34] M. Beckmann, H. P. Künzi, C.-L. Hwang, and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981, vol. 186, ISBN 978-3-540-10558-9.
- [35] T. E. Saputro, I. Masudin, and E. Babek, “A literature review on MHE selection problem: levels, contexts, and approaches,” *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 17, pp. 5139–5152, 2015, doi:10.1080/00207543.2015.1005254.
- [36] A. Panek, M. Jacyna, R. Jachimowski, and E. Szczepański, “Reliability and efficiency in technology selection in logistics facilities – multi-criteria decision support using the AHP method,” *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 27, no. 2, 2025, doi:10.17531/ein/200684.
- [37] Z. Soufi, P. David, and Z. Yahouni, “A methodology for the selection of Material Handling Equipment in manufacturing systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 1, pp. 122–127, 2021, doi:10.1016/j.ifacol.2021.08.193.
- [38] R. Hamzeh and X. Xu, “Technology selection methods and applications in manufacturing: A review from 1990 to 2017,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 138, p. 106123, 2019, doi:10.1016/j.cie.2019.106123.
- [39] E. L. Fisher, J. B. Farber, and M. G. Kay, “Mathes: An expert system for material handling equipment selection,” *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 14, no. 4, pp. 297–310, 1988, doi:10.1016/0167-188X(88)90034-1.
- [40] F. Chan, “Design of material handling equipment selection system: an integration of expert system with analytic hierarchy process approach,” *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 58–68, 2002, doi:10.1108/09576060210411512.
- [41] Y.-C. Shen, S.-H. Chang, G. T. Lin, and H.-C. Yu, “A hybrid selection model for emerging technology,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, no. 1, pp. 151–166, 2010, doi:10.1016/j.techfore.2009.05.001.
- [42] A. Hoene, M. Jawale, T. Neukirchen, N. Bednorz, H. Schulz, and S. Hauser, *Bewertung von*

Technologielösungen für Automatisierung und Ergonomieunterstützung der Intralogistik, ser. ild Schriftenreihe. Essen: Institut für Logistik- & Dienstleistungsmanagement der FOM University of Applied Sciences, 2019, vol. Band 64. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/234149/1/FOM-ild-Schriftenreihe-Band-64.pdf>. ISBN 9783892751007

- [43] A. Hadi-Vencheh and A. Mohamadghasemi, “A new hybrid fuzzy multi-criteria decision making model for solving the material handling equipment selection problem,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 5, pp. 534–550, 2015, doi:10.1080/0951192x.2014.880948.
- [44] C. Kutzner, F. Lucas, C. Sönmez, M. Stonis, and P. Nyhuis, “Methode zur automatisierten Transportmittelauswahl mittels Fuzzy-Logik,” *Logistics Journal: Editorial-Reviewed*, 2020, doi:10.2195/lj_NotRev_kutzner_de_202012_01.
- [45] K. Hinkelmann, T. Hoppe, and B. G. Humm, *Hybride KI mit Machine Learning und Knowledge Graphs*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025. ISBN 978-3-658-44780-9.
- [46] V. Nissen and J. Brill, “Smart Consulting Services für die Unternehmensberatung — Status Quo und Entwicklungsprozess,” in *Digitale Serviceinnovationen*, ser. Forum Dienstleistungsmanagement, M. Bruhn and K. Hadwich, Eds. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2026, pp. 371–413.
- [47] J. Alnahas, “Application of Process Mining in Logistic Processes of Manufacturing Organizations: A Systematic Review,” *Sustainability*, vol. 15, no. 15, p. 11783, 2023, doi:10.3390/su151511783.
- [48] F. Oldenburg, K. Hoberg, and H. Leopold, “Process mining in supply chain management: state-of-the-art, use cases and research outlook,” *International Journal of Production Research*, vol. 63, no. 8, pp. 2889–2904, 2025, doi:10.1080/00207543.2024.2412285.
- [49] R. Grzeszick, J. M. Lenk, F. M. Rueda, G. A. Fink, S. Feldhorst, and M. ten Hompel, “Deep Neural Network based Human Activity Recognition for the Order Picking Process,” in *Proceedings of the 4th International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction*, K. Yordanova, M. Schröder, S. Bader, and T. Kirste, Eds. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 1–6, doi:10.1145/3134230.3134231.
- [50] MotionMiners GmbH, “MotionMiners INSIGHTS.” [Online]. Available: <https://www.motionminers.com/produkte/insights>
- [51] Kinexon GmbH, “RTLS-Asset-Tracking: Volle Transparenz, höhere Produktivität.” [Online]. Available: <https://kinexon.com/de/loesungen/asset-tracking>
- [52] Sewio Networks s.r.o., “Industrial Real-Time Location System (RTLS): Sewio RTLS.” [Online]. Available: <https://www.sewio.net/>
- [53] Workaround GmbH, “Wireless Barcode Scanners for Modern Supply Chain: ProGlove.” [Online]. Available: <https://proglove.com/de/>
- [54] Predimo GmbH, “Predimo: Prediction of Movement.” [Online]. Available: <https://www.predimo.com/industrie-logistik>
- [55] scalefit UG, “Körperliche Belastungen erkennen & Gefährdungen beurteilen: Ergonomieanalyse vor Ort und in Echtzeit.” [Online]. Available: <https://www.scalefit.de/>
- [56] International Organization for Standardization, “Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering,” International Organization for Standardization, Tech. Rep. ISO/IEC/IEEE 29148:2018-11, 2018.
- [57] B. Regnell and S. Brinkkemper, “Market-Driven Requirements Engineering for Software Products,” in *Engineering and Managing Software Requirements*, A. Aurum and C. Wohlin, Eds. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 287–308.
- [58] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering Design*. London: Springer London, 2007. ISBN 978-1-84628-318-5.
- [59] K. Pohl, *Requirements engineering: Fundamentals, principles, and techniques*. Berlin and Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-12577-5.
- [60] M. Glinz and R. Wieringa, “Guest Editors’ Introduction: Stakeholders in Requirements Engineering,” *IEEE Software*, vol. 24, no. 2, pp. 18–20, 2007, doi:10.1109/MS.2007.42.
- [61] A. Mendelow, “Environmental Scanning: The Impact of the Stakeholder Concept,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems*. Baltimore: Association for Computing Machinery, 1981. [Online]. Available: <https://aisel.isnet.org/icis1981/20>

Nils Hendrik Hoppe, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Produktion und Logistik.

Address: BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Phone: +49 421 218-50181, Fax: +49 421 218-98-50181, E-Mail: hpp@biba.uni-bremen.de

Tabelle 3: Zusammenfassung der Interviews

Kategorie	1. Interview	2. Interview	3. Interview	4. Interview
Prozessaufnahme	Standardisierte Prozessdokumentation erfolgt bei Bedarf; keine kontinuierliche Aufnahme; Expertenwissen nötig	Problemerkennung durch Beobachtungen; Prozesserfassung erfolgt nicht standardisiert	Prozesserfassung über Wertstromanalysen und Spaghettidiagramme; Sensorbasierte Lösungen ergänzen Beobachtungen	Prozesserfassung über Interviews, Beobachtungen und Sensoren; Fokus liegt auf Sonderfällen
Prozessoptimierung	Daten und Überblick über Prozessverbesserungen fehlen; Kompetenzen bei Experten vorhanden	Zentralisierte Strukturen erschweren lokale Anpassungen; IT und QM für Umsetzung benötigt	Externe Unterstützung für Lean-Methoden; Hindernisse sind Bereitschaft Management und hoher Zeitaufwand	Erfahrungswerte stehen im Vordergrund; keine klare Organisation für die Umsetzung
Auswahl technischer Lösungen	Basierend auf Mitarbeiterwissen und ROI; Benchmarks und Wirtschaftlichkeitsberechnungen entscheidend	Kosten sind das primäre Kriterium; Ergonomie wird eher untergeordnet betrachtet.	Ergonomie und Flexibilität sind wichtige Kriterien; Technische Anpassungen dienen primär der Zeitreduktion	Effizienz, Arbeitssicherheit und Zugänglichkeit entscheidend; Kosten sind meist hinter Verfügbarkeit priorisiert
Entscheidungsgrundlage	Wirtschaftlichkeit vorrangig, jedoch bleibt Unsicherheit bestehen	Nach Gesamteindruck; quantifizierbare Kennzahlen wären sinnvoll	Komplexe Anforderungen erschweren Vorauswahl der Technologien	-
Anforderungen Plattform	Marktüberblick; Skalierbarkeit von Technologien; Berücksichtigung von Technologiezyklen	Benchmark ermöglichen; Ergonomie und Funktionalität der Lösungen darstellen	Aufbau ähnlich zu Online-Marktplatz; einfache Lösungen bevorzugen	Produkt- und direkten Kategorievergleich ermöglichen
Erwartungen an Lösungsvorschläge	Kombination aus Technologie und Produkt, Aufzeigen von Stärken/Schwächen der Lösungen	Zunächst grob nach Kategorien, danach erfolgt die Auswahl von Detaillösungen	Schlanker Prozess mit direktem Lösungsvorschlag („Low hanging fruits“)	Produkte sollten sauber kategorisiert sein (viele Systeme innerhalb einer Kategorie).
Größe Lösungsraum und Innovationsgrad	Vollständigkeit und einfacher Vergleich sind für die Auswahl entscheidend	Auf wenige Optionen eingrenzen; Startups wegen hohem Innovationsgrad nicht ausschließen	Entdecken neuer Ideen; Filterfunktionen speziell für Startups gewünscht	Etablierte Hersteller bevorzugt; Startups nicht vollständig ausschließen
Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses	Wichtig für Akzeptanz; Benchmarks sind hierbei der entscheidende Faktor	Anzeige von Alternativlösungen und explizite Begründung der Vorschläge notwendig	Vergleichsangebote, um Unterschiede transparent und nachvollziehbar zu machen	Nachvollziehbarkeit dient der Evaluation der eigenen Entscheidung
Abschluss Entscheidungsprozess	Proof of Concept kann Prozess abbrechen; Bei Hardware nach Anschaffung abgeschlossen	Lange Entscheidungsprozesse; Probleme werden lokal erkannt, Entscheidungen fallen jedoch zentral	Test und Validierung, danach erfolgt der finale Rollout.	Starker Einfluss durch die Unternehmensgröße und die Einkaufskompetenzen

Kategorie	1. Interview	2. Interview	3. Interview	4. Interview
Benchmarks	Gut, sofern Ansprechpartner vor Ort und die konkrete Technologie benannt werden	Konkrete Anwendungsszenarien und Videos werden als sehr hilfreich eingeschätzt	Dienen als Inspirationsquelle, müssen mehr als nur plakative Aussagen bieten	Nicht benötigt, es sei denn, der Projektkontext trifft exakt die eigene Situation.
Bereitschaft als Praxisbeispiel zu dienen	Bereitschaft aus idealistischen und/oder eigennützigen Gründen vorhanden (z. B. Beziehung zum Lieferanten).	Bereitschaft zur Unterstützung vorhanden, um das System kontinuierlich zu verbessern.	Deutlicher Unterschied zwischen der internen Motivation und der Außendarstellung	Geringe Bereitschaft Erfahrungen zu teilen
Validierung von Prozessanpassungen	Phasen der Vorbereitung, Durchführung und Nachbetreuung sind aktuell eher schwach ausgeprägt	Validierung anhand von Zeitersparnis und Reduktion von Ausgaben	Nach Anpassung eher oberflächlich; Blick auf Gewohnheiten und ob Systeme real genutzt werden	-
Persönliche Bewertung von Lösungen auf der Plattform	Wird als schwierig eingestuft, eher als persönliches/individuelles Verhalten	Bewertung nur bei der Einführung oder bei sehr gutem Verlauf zu erwarten	Persönlicher Kontakt wird gegenüber Bewertung über Plattform bevorzugt	Hohe Hürde; Bei Mietsituationen kann Bewertung jedoch über Einführung entscheiden
Nutzerkonten / Anmeldung	Eher ohne Anmeldung bevorzugt	Anonyme Nutzung bevorzugt	Anmeldung nur bei klarem Mehrwert denkbar	Hybridlösung: Persönlicher Account oder Gastzugang

Tabelle 4: Funktionale (F) und nicht-funktionale (NF) Anforderungen aus der Stakeholderanalyse (SA) und Marktanalyse (MA)

ID	Kategorie	Anforderung	Quelle
F-1	Prozessaufnahme	Leitlinien zur standardisierten Prozessaufnahme bereitstellen	SA
F-2	Inhaltliche Abdeckung	Für relevante Technologiebereiche soll eine hinreichende Marktabdeckung sichergestellt werden, um qualifizierte Empfehlungen zu ermöglichen.	MA, SA
F-3		Die Plattform soll Technologien, Produkte, Anbieter und Dienstleistungen gemeinsam in einem integrierten Lösungskatalog abbilden.	MA
F-4		Die Plattform soll technologieübergreifend unterschiedliche Lösungsarten (Hardware, Software, Dienstleistungen und Organisationsmaßnahmen) berücksichtigen.	MA
F-5		Der Katalog soll Technologien unterschiedlicher Reifegrade von etablierten Lösungen bis hin zu innovativen Ansätzen enthalten.	MA
F-6		Die Plattform soll sowohl etablierte Hersteller als auch innovative Startups abbilden.	SA
F-7	Datenstruktur und Qualität	Technologieübergreifendes, standardisiertes Attributschema (Ontologie)	MA
F-8		Automatisierte Attributextraktion aus unstrukturierten Daten	MA
NF-1		Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung im Datenpflegeprozess sicherstellen	MA
NF-2		Fachliche Prüfung neuer Dateneinträge vor Veröffentlichung	MA
NF-3	Entscheidungsunterstützung	Dokumentierte Aktualisierung der Katalogdaten sicherstellen	MA
F-9		Schnell realisierbare Maßnahmen identifizieren und hervorheben	SA
F-10		Für jede Technologieklasse sollen grundlegende Technologieinformationen bereitgestellt werden.	MA
F-11		Reale Anwendungsbeispiele einbinden, die idealerweise nach Kontext des jeweiligen Kunden gefiltert werden können/bereitgestellt werden	SA
F-12		Leitlinien für die Erfassung der Systemnutzung bereitstellen, um nach dem Rollout den Mehrwert eines Systems systematisch zu prüfen	SA
F-13		Interaktiver Anforderungs-Assistent (Fragebogen/Konfigurator), der Nutzeranforderungen erfasst und passende Technologien vorschlägt	MA
F-14		Ergänzende Auswahl-Ratgeber/Checklisten zur Anforderungsklä rung vor der eigentlichen Technologieauswahl	MA
F-15		Möglichkeiten zur persönlichen Kontaktaufnahme anbieten, da die Kunden nur wenig Bereitschaft für Feedback auf der Plattform gezeigt haben	SA
F-16	Vergleichsmethodik	Mehrdimensionale Scoring-/Bewertungslogik statt reiner Auflistung, mit (ggf. nutzerseitig anpassbarer) Kriteriengewichtung	SA, MA
F-17		Explizite Offenlegung der Vergleichskriterien für Nutzer (diese Kriterien beeinflussen die Empfehlung).	MA
NF-4		Nachvollziehbarkeit/Erklärbarkeit der Empfehlung um Argumentation und Akzeptanz beim Kunden vorzubereiten/zu sichern	SA, MA
NF-5	Geschäftsmodell	Strikte Trennung von Werbung/Sponsoring und Bewertungslogik. Keine Pay-to-rank-/Pay-to-feature-Mechanismen	MA
NF-6		Freier Zugang ohne Paywall. Kernfunktionen müssen ohne Registrierung nutzbar sein und die Accountbindung einen Mehrwert bieten.	SA, MA
F-18		Optionen für Hardwaretests, Mietmodelle oder geführte Proof of Concepts auf der Plattform anbieten	SA
F-19		Anreize zur Bereitstellung von Praxisbeispielen bieten, da die Bereitschaft zur aktiven Teilnahme gering ist	SA