

Untersuchung der Potenziale von Predictive Maintenance für Regalbediengeräte

Predictive Maintenance for stacker cranes

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

B.Sc.

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Themenstellender: Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Betreuer/Betreuerin: Josef Xu

Eingereicht von: Lara Schuberth

Eingereicht am: 20.04.2020 in Garching

Inventarnr. fml: 2019073

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	3
2 Aktueller Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Definition, Verwendung und Betrieb von Regalbediengeräten	7
2.1.1 Begriffsdefinition und Verwendungszweck	7
2.1.2 Arbeitsweise	8
2.1.3 Betriebsarten	10
2.2 Komponenten von Regalbediengeräten	11
2.2.1 Tragwerk	11
2.2.2 Fahrtrieb	13
2.2.3 Hubwerk	16
2.2.4 Weitere Elemente	17
2.2.5 Energie und Datenübertragung	18
2.3 Lagerkonfiguration	18
2.3.1 Lastaufnahmemittel	18
2.3.2 Umsetzeinrichtung	22
2.4 Instandhaltung	22
2.4.1 Begriffsdefinition und Ziele der Instandhaltung	22
2.4.2 Instandhaltungsarten	30
2.4.3 Predictive Maintenance als Instandhaltungsart der Industrie 4.0	38
2.4.4 Instandhaltung in der Intralogistik und bei Regalbediengeräten	42
2.5 Ausfallursachen von Regalbediengeräten	48
2.5.1 Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene	48
2.5.2 Spiel einer Teleskopgabel in Bewegungsrichtung	50
2.5.3 Steifigkeitsverlust des Masts	52
2.5.4 Drehblockade der Führungsrollen	53

2.5.5 Radformfehler der Antriebsrolle	53
2.5.6 Schäden der Fahrschiene	54
2.5.7 Verschleiß der Lagerflansche von Laufradlagerungen	55
2.5.8 Weitere Ausfallursachen	55
3 Fragebogen zur Ermittlung von Ausfallursachen und Predictive Maintenance Vorkommen	57
3.1 Ergebnisse der Fragebogenauswertung	58
3.1.1 Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich Typ, Alter, Verfügbarkeit und Instandhaltungsstrategie der Regalbediengeräte	58
3.1.2 Ausfallursachen, Gegenmaßnahmen und Detektion	62
3.1.3 Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance Vorkommen	68
3.2 Diskussion der Fragebogenergebnisse	72
4 Bewertung der Übertragbarkeit von Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen	75
5 Zusammenfassung und Ausblick	79
Literaturverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	89
Tabellenverzeichnis	91
Anhang A Fragebogen Hersteller	A-1
Anhang B Fragebogen Generalunternehmer	B-1
Anhang C Fragebogen Betreiber	C-1
Erklärung C-1	

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BZ	Betriebszustand
CPU	Central Processing Unit
MDT	Mean Down Time
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
PM	Predictive Maintenance
RBG	Regalbediengerät
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VPN	Virtual Private Network
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Lieferfähigkeit ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Wirtschaftlichkeit eines Logistikunternehmens. Besonders in Zeiten hoher Nachfrageaktivitäten am Markt ist in der Logistikbranche zu beobachten, dass nicht das Unternehmen mit dem niedrigsten Preisgebot einen Zuschlag für ein ausgeschriebenes Angebot erhält, sondern jenes das die Nachfrage am schnellsten decken kann. Eine schnelle Lieferfähigkeit kann damit Marktanteile sichern und erhöhen. Sie ist wettbewerbsentscheidend. [Kau-2018, S. 32]

In einem Hochregallager kann ein Lieferverzug zum Beispiel durch einen Lagerausfall aufgrund eines nicht funktionsfähiges Regalbediengeräts (RBG) resultieren. Somit ist die Lieferfähigkeit auch abhängig von der Anlagenverfügbarkeit. Durch eine steigende Anzahl von ungeplanten Ausfällen sinkt die technische Anlagenverfügbarkeit erheblich ab. [Ebe-2014, S. 69; Kau-2017, S. 21].

Die Höhe von ungeplanten Ausfällen kann durch die Wahl geeigneter Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden. Die Instandhaltung setzt sich zum Ziel, die Anlagenverfügbarkeit, -zuverlässigkeit und -lebensdauer zu erhöhen. Gleichzeitig sollen die Ausfallzeit und die indirekten wie auch direkten Instandhaltungskosten reduziert werden. Unternehmen können abhängig von ihren Anforderungen an die Anlagenverfügbarkeit und den zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets auf unterschiedliche Arten der Instandhaltung zugreifen. [Paw-2016, S. 56; Aus-2016, S. 1f.]

Im Moment werden sowohl die korrektive, die vorausbestimmte als auch die zustandsorientierte Instandhaltung eingesetzt. Dabei reichen die Instandhaltungsmaßnahmen von einem Austausch einer Komponente, wenn bereits ein Anlagenausfall durch sie eingetreten ist (korrektiv) bis zur Ausfallsvermeidung, indem der Zustand von kritischen Anlagekomponenten überwacht wird (zustandsorientiert). Wird der Zustand einer Komponente kontinuierlich aufgenommen und überprüft, wird von Condition Monitoring gesprochen. Der Zustand wird dabei oft automatisiert durch Condition Monitoring Systeme analysiert. Im Zuge der Industrie 4.0 hat sich bereits in einigen Industriezweigen eine weitere Instandhaltungsart, die voraussagende Instandhaltung (engl. Predictive Maintenance) entwickelt. Sie wird als eine der Schlüsselinnovationen der vierten industriellen Revolution gesehen und stützt sich auf die von Condition Monitoring gebildeten Grundlagen. Intelligente Algorithmen erkennen bei Predictive

Maintenance (PM) in aufgenommenen Anlagendaten Muster, die Aussagen über den Anlagenzustand und die Restlebensdauer der Anlage ermöglichen. [Fel-2017, S. 3; DIN-13306; Müh-2018, S. 354; Aus-2016, S. 1f.; Lei-2014, S. 20]

Damit die Anlagenverfügbarkeit durch die vorausbestimmte bzw. zustandsorientierte Instandhaltung als auch durch Predictive Maintenance erhöht werden kann, sind Kenntnisse über Ausfallquellen entscheidend. Nur so können Komponenten identifiziert werden, die präventiv bzw. zustandsorientiert instandgesetzt werden sollten oder bei denen Predictive Maintenance eingesetzt werden kann. Vor allem für den Einsatz von Condition Monitoring und Predictive Maintenance muss bekannt sein, wie sich Ausfälle in Maschinendaten abzeichnen und wie sich die Daten mit zunehmender Schädigung des Bauteils bis zum Ausfall ändern.

Auch in der Logistik ist davon auszugehen, dass Predictive Maintenance an Bedeutung gewinnen wird. Nach Untersuchung von Günther et al. wird die Logistik ebenfalls eine vierte industrielle Revolution durchleben. Sie wird sich hin zu einer kognitiven Logistik entwickeln [Gün-2017, S. 97f.].

Intralogistische Systeme wurden laut Braun et al. im Jahr 2016 korrektiv oder vorausbestimmt instandgesetzt. Auch bei Regalbediengeräten als wichtige intralogistische Anlage ist nach den Untersuchungen von Große et al. 2018 die vorausbestimmte Instandhaltung Stand der Technik, bei der Instandhaltungsmaßnahmen in festgelegten Zeit- oder Nutzungsintervallen erfolgen. Dennoch werden ein paar Regalbediengeräte bereits zustandsorientiert instandgesetzt, wie realisierte Projekte zeigen. Hinsichtlich Predictive Maintenance geben Große et al. an, dass der Einsatz von Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten besonders aufgrund der betriebsbedingten Bewegung des Geräts erschwert wird. [Gro-2018, S. 1; Bra-2016, S. 6; Kri-2018, S. 36f.; Kum-o. J.; DIN-13306]

1.2 Ziel der Arbeit

In der Bachelorarbeit wird auf das Regalbediengerät als wichtige intralogistische Anlage für den Ein- und Auslagerungsprozess eingegangen. Ziel der Arbeit ist das Identifizieren von Ausfallursachen bei Regalbediengeräten sowie die Ermittlung von Komponenten des Regalbediengeräts, die durch ihre Ausfallhäufigkeit und Ausfallschwere besonders kritisch für die Verfügbarkeit des Regalbediengeräts sind. Neben dem Ermitteln der Ausfallursachen werden in der Bachelorarbeit ebenfalls Methoden identifiziert, um jene Verschleiß- und Fehlerfälle detektieren zu können, die zu einem Ausfall führen. Im Zuge der Industrie 4.0 gewinnt die Instandhaltungsart Predictive Maintenance verstärkt an Bedeutung. Ein weiteres Ziel der Bachelorarbeit ist es daher zu untersuchen, in welchem Ausmaß Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten bereits verbreitet ist bzw. zu prüfen, inwieweit Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen für den Einsatz am Regalbediengerät angewendet werden können.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden die Ausgangssituation und die Problemstellung beschrieben. Zudem wird das Ziel, der Aufbau und die Vorgehensweise bei der Bachelorarbeit erläutert.

Im zweiten Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik dargelegt. Dieser ist in fünf Unterkapitel gegliedert. Um die später identifizierten Ausfallursachen besser beschreiben und einordnen zu können, wird in Kapitel 2.1 bis Kapitel 2.3 das Regalbediengerät beschrieben. Es wird auf den Verwendungszweck, die Arbeitsweise und die Betriebsarten des Regalbediengeräts eingegangen. Zudem werden die Komponenten und ihre unterschiedlichen Ausprägungsformen sowie der Aufbau des Regalbediengeräts dargestellt. In Kapitel 2.4 werden zuerst die wichtigsten Begrifflichkeiten der Instandhaltung definiert. Zudem wird dargestellt, wie sich die Ausfallursachen über den Lebenszyklus einer Anlage verändern. Darauf aufbauend werden die Begriffe der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit erklärt und ihr Unterschied zueinander dargestellt. Es folgt eine Erläuterung der Instandhaltungsziele und der unterschiedlichen Instandhaltungsarten, um den Begriff Predictive Maintenance darauffolgend definieren und abgrenzen zu können. Zudem wird ein Einblick in die Instandhaltung in der Intralogistik bzw. bei Regalbediengeräten gegeben. Im Kapitel 2.5 werden die in der Literatur bekannten Ausfallursachen von Regalbediengeräten und ihre Detektionsmöglichkeiten identifiziert. Die Informationen im Stand der Forschung und Technik wurden mittels Literaturrecherche zusammengestellt. Dafür wurden überwiegend Normen, Richtlinien

und Lehrbücher verwendet. Die Literaturrecherche umfasste zudem Fachzeitschriften und aufgrund der Aktualität des Themas Internetquellen.

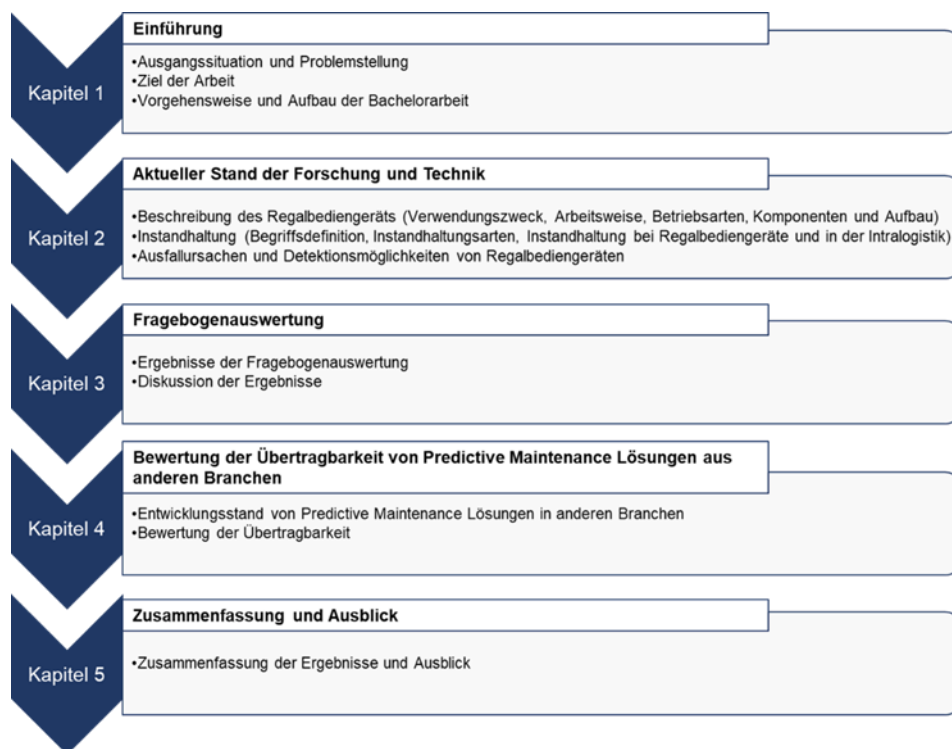


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde eine Fragebogenumfrage durchgeführt. Ziel des Fragebogens war das Identifizieren von Ausfallgründen bei Regalbediengeräten und das Ermitteln von Komponenten, die aufgrund ihrer Kritikalität, d.h. wegen ihrer Ausfallhäufigkeit und Schwere, zustandsüberwacht werden sollten. Des Weiteren sollte festgestellt werden, welche Instandhaltungsstrategien bei Regalbediengeräten dominierend eingesetzt werden bzw. in welchem Ausmaß Predictive Maintenance bereits bei Regalbediengeräten bei Herstellern, Generalunternehmern und Betreibern Anwendung findet. Durch den Fragebogen sollten Erkenntnisse gewonnen werden, die in der Literatur bisher nicht aufgeführt sind. Der Fragebogen ist nach der Einlesephase zum Stand der Forschung und Technik entstanden. Im Fragebogen wurden sowohl offene Fragen als auch geschlossene Fragen gestellt. Durch die offenen Fragen sollte gewährleistet werden, dass Informationen, die nicht in der Literatur, sondern nur den Herstellern und Betreibern bekannt sind, erfasst werden können. Der Fragebogen wurde an Unternehmen versandt, die Regalbediengeräte herstellen, betreiben oder warten. Er wurde in drei Teilen aufgebaut. Im ersten Teil werden zur besseren Einordnung der Unternehmensantworten hinsichtlich Ausfallursachen und Detektionsmöglichkeiten nach dem Typ, dem Alter und der Verfügbarkeit der von den Unternehmen vertriebenen/gewarteten/betriebenen Regalbediengeräten und nach der am häufigsten eingesetzten Instandhaltungsart gefragt. Im zweiten Teil werden die

Ausfallursachen, die von den Unternehmen ergriffene Gegenmaßnahme zur Beseitigung und Detektionsmöglichkeiten ermittelt. Im dritten Teil wird die Verbreitung von Predictive Maintenance bei den Unternehmen untersucht. Bei der Auswertung des Fragebogens wurden zuerst die Antworten auf Plausibilität geprüft und verglichen. Darauf folgend wurde versucht, Cluster in den Antworten zu finden, um die Ergebnisse strukturiert darzustellen. Die Ergebnisse der Fragebogenumfrage, wie auch die Diskussion der Erkenntnisse werden in Kapitel 3 dargestellt.

Im vierten Kapitel wird ein Einblick gegeben in wieweit die Entwicklung von Predictive Maintenance Lösungen in anderen Branchen fortgeschritten ist. Es wird geprüft, ob eine Anwendung dieser Lösungen am Regalbediengerät möglich ist bzw. welche Schritte durchlaufen werden müssten, damit Predictive Maintenance für Regalbediengeräte ermöglicht wird.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Bachelorarbeit zusammengefasst und abschließend ein Ausblick gegeben.

2 Aktueller Stand der Forschung und Technik

2.1 Definition, Verwendung und Betrieb von Regalbediengeräten

2.1.1 Begriffsdefinition und Verwendungszweck

Das Regalbediengerät ist ein schienengebundenes Förder- und Hebezeug, das zum manuellen oder automatischen Ein- und Auslagern von Ladeeinheiten, Langgütern oder zum Kommissionieren in einer Lageranlage verwendet wird. Ein Regalbediengerät gehört zu der Gruppe der Unstetigförderer. [Mar-2016, S. 398; FEM-9.101]

Nach Martin ist ein Unstetigförderer ein Transportmittel, welches Waren diskontinuierlich von einer Aufgaben- zu einer Abgabenstelle befördert. Unstetigförderer werden für den Transport von Schütt- oder Stückgut eingesetzt. Charakteristisch für einen Unstetigförderer ist der Wechsel von Last- und Leerfahrten während des Betriebs, wie auch Stillstandszeiten mit anschließenden Anschlussfahrten. Die Stillstandszeiten resultieren durch das Be- und Entladen von logistischen Einheiten, da diese nur im Stillstand und an bestimmten Stellen aufgenommen und abgegeben werden können. Das Be- und Entladen erfolgt mittels eines Lastaufnahmemittels. Durch den Wechsel von Stillstand und Fahrt, wie auch den Wechsel von Last- und Leerfahrten, werden die Antriebe von Unstetigförderern für einen Aussetz- oder Kurzzeitbetrieb ausgelegt. Ein Unstetigförderer besitzt üblicherweise für jede Bewegungsform, zum Beispiel Heben oder Fahren einen einzelnen Antrieb. Die Einsatzflexibilität, die beispielsweise bei der Änderung einer Transportaufgabe gefordert ist, ist ein Hauptvorteil von Unstetigförderern. [Mar-2016, S. 221]

Regalbediengeräte werden zum Ein- und Auslagern von Ladeeinheiten in Hochregallagern, Kanallagern oder automatischen Kleinteilelagern verwendet. Das Regalbediengerät wird außerdem in Satellitenlagern zum Umsetzen der Satelliten eingesetzt. Wie in Abbildung 2-1 dargestellt, fahren in einem Satellitenlager die Satelliten in den Lagerkanälen selbstständig zur erforderlichen Ladeeinheit, nehmen diese auf und verfahren zurück zum Regalbediengerät. Das Regalbediengerät bringt Satellit und Ladeeinheit zum Auslagerpunkt. Eine Einlagerung auf dieselbe Weise ist ebenfalls möglich. Die Ladeeinheiten werden bei diesem Lagertyp hintereinander eingelagert. [FEM-9.101]

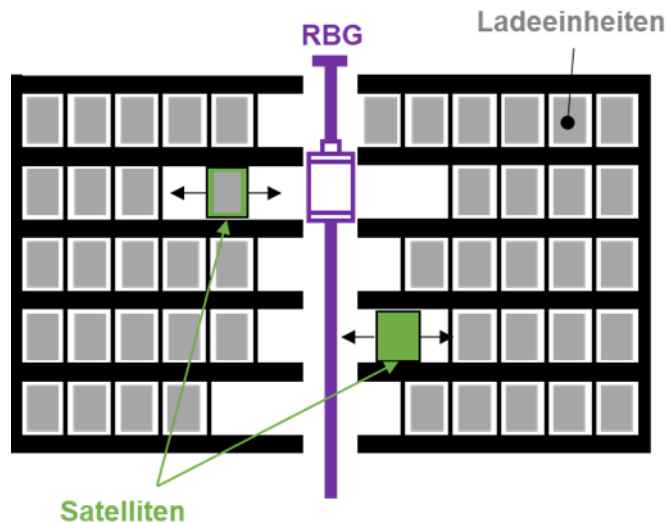


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Satellitenlagers mit Regalbediengerät [FEM-9.101]

Das Regalbediengerät wird auch zum Kommissionieren verwendet. Durch den Einsatz des Regalbediengeräts sind sowohl die Kommissioniermethoden Person-zur-Ware als auch Ware-zur-Person möglich. Erstere wird realisiert durch eine auf dem Regalbediengerät mitfahrende Person, die dadurch zum erforderlichen Regalfach befördert wird und die benötigte Ware manuell entnehmen kann. Bei der Methode Ware-zur-Person entnimmt das Regalbediengerät aus dem Lager eine zuvor eingelagerte Ladeeinheit, die für den Kommissionierprozess benötigt wird. Danach lagert das Regalbediengerät die beim Kommissionieren nicht benötigten Güter der Ladeeinheit wieder ein. [FEM-9.101]

2.1.2 Arbeitsweise

Nach FEM-9.101 kann ein Regalbediengerät drei Bewegungen ausführen [FEM-9.101]:

- Bewegen des gesamten Gerätes in x-Richtung parallel zur Gasse,
- Bewegen des Hubwagens in y-Richtung entlang des Mastes,
- Bewegen des Lastaufnahmemittels in z-Richtung.

Zum Ausführen der drei Bewegungsrichtungen besitzt ein Regalbediengerät einen Fahrtrieb, einen Hubtrieb und einen Antrieb für das Ein- und Ausfahren des Lastaufnahmemittels, die überwiegend durch Schleifleitungen mit Energie versorgt werden [Mar-2016, S. 398].

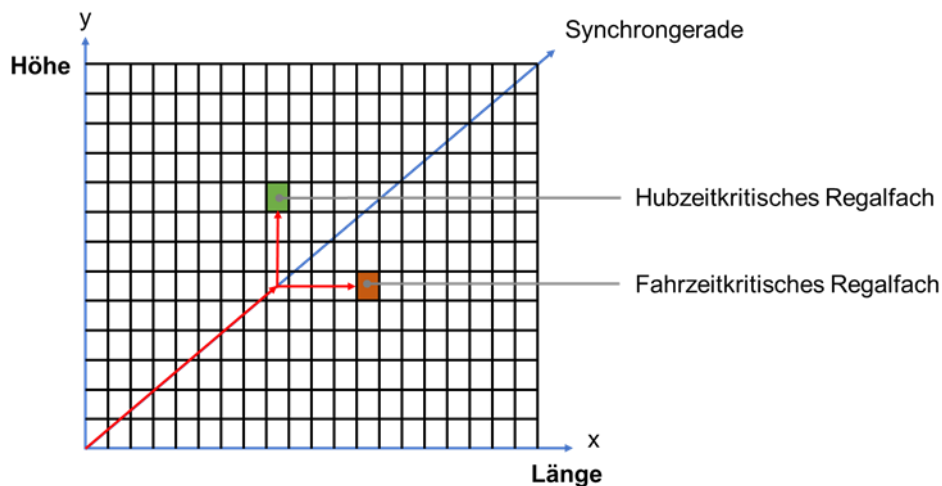


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der hubzeit- und fahrzeitkritischen Fächer als auch der Synchrongerade [FEM-9.101]

Bewegungsabläufe, die sich wiederholen, werden Arbeitsspiel genannt. Regalbediengeräte führen Einzel- oder Doppelspiele aus. Der exakte Bewegungsablauf während der Arbeitsspiele ist geprägt durch die Synchrongerade, die den Fahrweg des Regalbediengeräts angibt. Beim Modell der Synchrongerade wird vorausgesetzt, dass sich das Regalbediengerät ab dem Startpunkt mit maximaler Auslastung des Fahr- und Hubantriebs bewegt. Wie Abbildung 2-2 zeigt, werden die Regalfächer durch die Synchrongerade in hubzeit- und fahrzeitkritische Fächer eingeteilt. Die fahrzeitkritischen Fächer befinden sich unterhalb der Synchrongeraden, hubzeitkritische oberhalb der Geraden. [FEM-9.101]

Nach Arnold et al. führt ein Regalbediengerät bei einem Einzelspiel entweder eine Einlagerung oder eine Auslagerung aus. Soll beispielsweise eine Einlagerung mit einem Einzelspiel durchgeführt werden, startet das Regalbediengerät mit Ladeinheit beim Ein- und Auslagerpunkt, der sich in Abbildung 2-2 im Ursprung des Koordinatensystems befindet und fährt zum entsprechenden Regalfach. Da es beim Einzelspiel nach einer Einlagerung nicht zu einer Auslagerung kommt, transportiert das Regalbediengerät bei der Rückfahrt zum Ein- und Auslagerpunkt keine Ladeinheit, es kommt zu einer Leerfahrt. Dementsprechend stellt bei einer Auslagerung der Weg hin zum Regalfach eine Leerfahrt dar. Bei einem Doppelspiel wird eine Einlagerung mit einer Auslagerung verknüpft. Bei diesem Arbeitsspiel kommt es nur zwischen der Einlagerung und der darauffolgenden Auslagerung zu Leerfahrten. Der Anteil an Leerfahrten bei einem Doppelspiel ist klein, wenn die Ein- und Auslagerungsplätze nahe beieinander liegen. Ein Vierfachspiel, das bedeutet je zwei Ein- und Auslagerungen, ist bei einem Regalbediengerät möglich, wenn das Lastaufnahmemittel des Regalbediengeräts zwei Ladeinheiten parallel aufnehmen kann. [Arn-2019, S. 202]

In einem Hochregallager wird die Gesamtzahl an Ein- und/oder Auslagerungen pro Zeiteinheit als Umschlagsleistung definiert [FEM-9.851]. Die Betriebsstrategie, zum Beispiel die Doppelspielanteile während des Betriebs des Regalbediengeräts, beeinflusst die Leistung. Der Anteil an Doppelspielen sollte möglichst hoch sein. Auch eine hohe Leistung der Antriebe erhöht die Anzahl der Ein- und Auslagerungen pro Zeiteinheit. [FEM-9.101; Hom-2018, S. 202]

2.1.3 Betriebsarten

In der Regel wird ein Regalbediengerät im Automatikbetrieb gefahren. Gesteuert wird das Regalbediengerät dabei durch einen Materialflussrechner oder einer auf dem Regalbediengerät mitfahrenden Steuerung. In der Kommissionierung wird das Regalbediengerät teilautomatisch eingesetzt. Dabei sind die Bewegungen des Regalbediengeräts automatisiert. Das Entnehmen des Gutes wird manuell ausgeführt. Ein Regalbediengerät kann auch manuell durch eine Betriebsperson mit Handsteuerung betrieben werden. [FEM-9.101]

2.2 Komponenten von Regalbediengeräten

Ein Regalbediengerät besteht nach FEM-9.101 aus den folgenden Hauptkomponenten [FEM-9.101]:

- Tragwerk,
- Mast,
- Fahrwerk,
- Hubwagen mit Lastaufnahmemittel,
- Fahrtrieb,
- Hubwerk.

Je nach technischer Anforderung kann sich die Ausprägung der Hauptkomponenten unterscheiden [FEM-9.101].

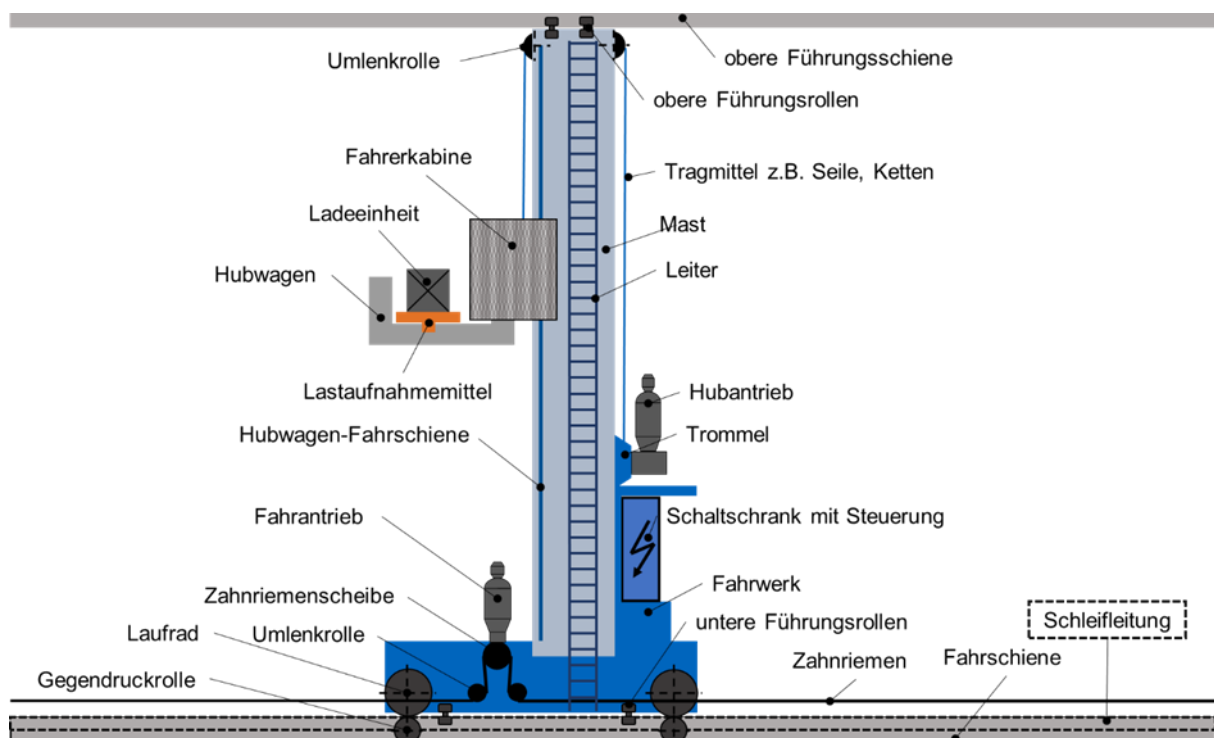


Abbildung 2-3: Aufbau und Komponenten eines Regalbediengeräts [DIN-15350; FEM-9.101; Ose-2008, S. 664]

2.2.1 Tragwerk

Unter der Hauptgruppe des Tragwerks werden alle Bauteile zusammengefasst, die eine tragende Funktion ausführen. Bei einem Regalbediengerät bilden der Mast, das Fahrwerk und der Hubwagen mit Lastaufnahmemittel das Tragwerk. [FEM-9.101]

Der **Mast** ist auf dem Fahrwerk angebracht und läuft oben entlang einer Führungsschiene [Ose-2008, S. 663; FEM-9.101]. Die obere Führung des Masts verhindert das Pendeln oder das Kippen des Regalbediengeräts [FEM-9.101]. Entlang des Masts wird der Hubwagen in y-Richtung, zum Beispiel durch eine Hubwagen-Fahrschiene geführt [Sch-2019a, S. 95; DIN-15350]. Nach Schmid et al. werden Regalbediengeräte mit einem oder zwei Masten hergestellt. Bei Zweimastgeräten ist der Hubwagen zwischen beiden Masten befestigt. Durch die beidseitige Aufhängung kann die Biegebelastung auf den Hubwagen verringert werden. Außerdem können die Belastungen, die durch den Hubwagen auf die Verbindungsflächen von Hubwagen und Mast wirken, reduziert werden. Auch eine verbesserte Verteilung der Belastungen, die auf die Verbindungselemente zwischen Masten und Fahrwerk wirken, ist durch den Einsatz von zwei Masten möglich. [Sch-2019a, S. 97]

Nach FEM-9.101 kann der Mast nach den folgenden drei Bauweisen ausgeführt sein [FEM-9.101]:

- Mast bestehend aus Kastenprofilen aus Aluminium oder Stahl,
- Mast bestehend aus stranggepressten Aluminiumprofilen,
- Fachwerkbauweise.

Schmid et al. geben an, dass neben Stahl und Aluminium auch Verbundwerkstoffe bei der Mastausführung eingesetzt werden. Prototypen aus Kohlefasern wurden bereits realisiert, haben sich allerdings aufgrund der Wirtschaftlichkeit noch nicht durchgesetzt. [Sch-2019a, S. 97f.]

Beim **Fahrwerk** handelt es sich um einen Rahmen, an dem der Mast befestigt ist. Das Fahrwerk beinhaltet alle Bauteile, die zum Fahren in x-Richtung benötigt werden. Dazu gehören Fahrtrieb, Lauf-, Gegendruck-, und Führungsrollen. [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 98]

Während des Fahrens bewegt sich das Regalbediengerät auf einer Fahrschiene, die am Gassenboden angebracht ist. Die Rollen, die von oben auf der Fahrschiene abrollen, werden Laufrollen genannt. Um ein Abheben der Laufrollen bei Beschleunigen von der Fahrschiene zu verhindern, werden Gegendruckrollen eingesetzt, die unter der Fahrschiene angebracht sind. An den Seiten der Fahrschiene befinden sich Führungsrollen. Mit den Führungsrollen wird das Regalbediengerät an der Schiene gehalten. An der Decke befindet sich eine Führungsschiene, an deren Seiten ebenfalls Führungsrollen laufen. [Sch-2019a, S. 95, 98]

Abbildung 2-4 zeigt die Anordnung der Führungsrollen an der oberen Führungsschiene, sowie die Anordnung der Laufrolle, der Führungsrolle und der Gegendruckrolle an der Fahrschiene.

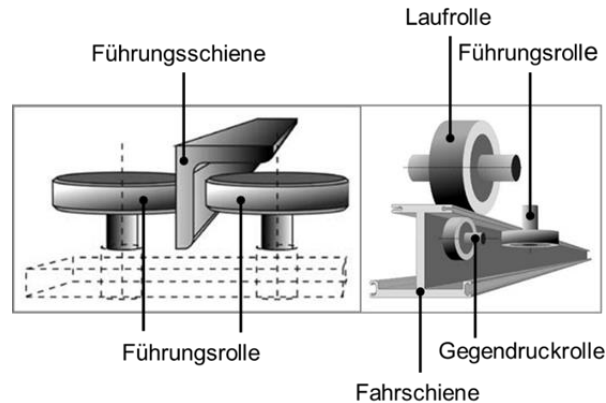


Abbildung 2-4: Links: Anordnung der Führungsrollen an der Führungsschiene; rechts: Anordnung der Laufrolle, der Führungsrolle und der Gegendruckrolle an der Fahrschiene [Ose-2008, S. 664]

Unter einem **Hubwagen** wird ein beweglicher Rahmen verstanden. Der Hubwagen kann entlang des Masts in y-Richtung bewegt werden und kann über ein oder mehrere Lastaufnahmemittel verfügen. [FEM-9.101]

Mit einem **Lastaufnahmemittel** kann eine Ladeinheit aus dem Regalfach ein- und ausgelagert werden und am Ein- und Auslagerpunkt übergeben oder aufgenommen werden [FEM-9.101]. Die unterschiedlichen technischen Ausführungsformen des Lastaufnahmemittels werden in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

2.2.2 Fahrtrieb

Das Regalbediengerät wird in x-Richtung durch einen oder mehrere Fahrtriebe bewegt. Eine Antriebseinheit besteht immer aus einer Leistungseinheit, einem Motor, einem Getriebe und weiteren Übertragungsgliedern, die je nach Verwendungszweck unterschiedlich ausgeprägt sind. Für den Antrieb von Regalbediengeräten werden frequenzgeregelte Drehstrommotoren, Servo-Asynchronmotoren oder Servo-Synchronmotoren eingesetzt. Der Fahrtrieb kann direkt am Regalbediengerät oder an einem stationären Punkt im Lager, zum Beispiel am Gassenende verbaut sein. Ein Grund für die Ausführung eines stationären Antriebs ist beispielsweise eine geforderte Gewichtseinsparung am Regalbediengerät. Ein Regalbediengerät kann entweder nur unten oder oben und unten angetrieben werden. [Sch-2019a, S. 98; FEM-9.101]

Wird ein Regalbediengerät nur unten angetrieben, neigt der Mast zum Schwingen. Durch das Schwingen erhöht sich die Dauer des Arbeitsspiels, da durch das

Ausschwingen des Regalbediengerät ein Zeitverlust entsteht. Die Schwingungen können durch eine Antipendeleinheit, einen weiteren Antrieb am Kopf des Masts reduziert werden. Oberer und unterer Antrieb können durch Kardanwellen oder sogenannte elektrische Wellen verbunden werden. Während bei Kardanwellen die Verbindung beider Antriebe mechanisch gewährleistet ist, wird bei einer elektrischen Welle die Verbindung durch eine geregelte Schaltung realisiert. [Sch-2019a, S. 98f.; FEM-9.101]

Im weiteren Abschnitt werden zuerst die reibschlüssigen Antriebsarten und darauffolgend die formschlüssigen Antriebsmöglichkeiten, die bei Regalbediengeräten sowohl für den Fahrtrieb als auch für den Hubtrieb eingesetzt werden, vorgestellt. Vor der Beschreibung der reibschlüssigen bzw. formschlüssigen Ausprägungsformen der Antriebe wird im Allgemeinen die Wirkweise von reibkraft- bzw. formschlüssigen Verbindungen erläutert.

Bei **reibkraftschlüssigen Verbindungen** entsteht der Kraftschluss durch das Auftreten von Normalkräften F_N und daraus resultierenden Reibungskräften F_R zwischen den Wirkflächen. Reibschlüssige Verbindungen können mit dem Coulomb'schen Reibungsgesetz beschrieben werden. Bei einer reibschlüssigen Verbindung ist die Kraftübertragung begrenzt durch die Höhe der auftretenden Reibungskräfte. [Pah-2007, S. 586]

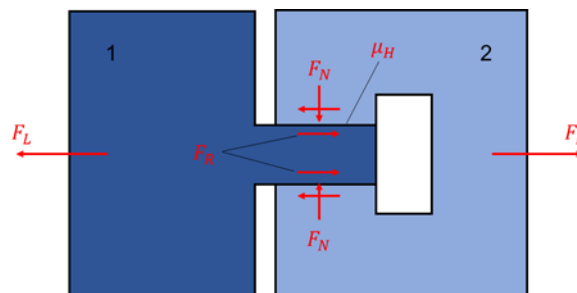


Abbildung 2-5: Reibkraftschlüssige Verbindung von zwei Bauteilen bei einachsiger Zugbelastung durch die Kraft F_L [Pah-2007, S. 586]

Der Reibradantrieb und der senkrechte Stegantrieb sind reibschlüssige Antriebe, die bei Regalbediengeräten eingesetzt werden [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 100].

Die Bewegung des Regalbediengerät wird bei einem **Reibradantrieb** durch das Antreiben eines oder mehrerer Laufräder erzeugt. Durch das reibungsbehaftete Abrollen der Räder auf der Fahrschiene bewegt sich das Regalbediengerät in x-Richtung. Die Fahrleistung erhöht sich durch den Einsatz eines Allradkonzepts. Dabei werden mehrere Räder durch voneinander getrennte Motoren angetrieben. [FEM-9.101]

Nach Schmidt et al. besteht der **senkrechte Stegantrieb**, wie Abbildung 2-6 zeigt, aus zwei Antriebsrädern, die den senkrechten Steg der Fahrschiene einklemmen. Durch das Antreiben der Räder entsteht die erforderliche Reibung, durch die sich das Regalbediengerät entlang der Schiene ziehen kann. Während bei einem Reibradantrieb die Laufräder sowohl eine Trag- als auch Antriebsfunktion erfüllen, kann beim senkrechten Stegantrieb Trag- und Antriebsfunktion getrennt werden. Der senkrechte Stegantrieb kann sowohl für den Antrieb am Fahrwerk, als auch für den Antrieb am oberen Teil des Masts verwendet werden und ermöglicht hohe Beschleunigungen in x-Richtung. [Sch-2019a, S. 100]

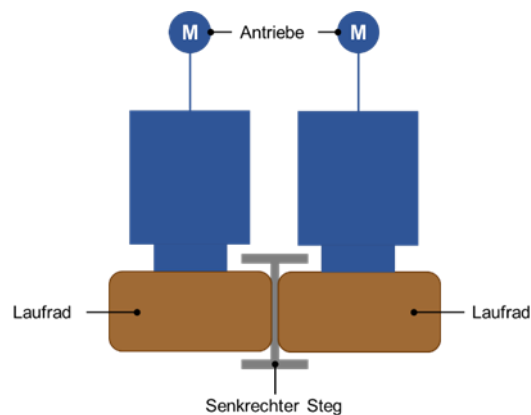


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des senkrechten Stegantriebs [Sch-2019a, S. 100]

Der mitfahrende oder stationäre Zugmittel-Antrieb und der Zahnstangenantrieb sind formschlüssige Antriebe, die bei Regalbediengeräten verwendet werden [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 99f.].

Eine **formschlüssige Verbindung** entsteht, wie Abbildung 2-7 zeigt, durch das Auftreten von Normalkräften F_N , die durch das Ineinandergreifen von Wirkflächen von zwei Bauteilen unter der Aufnahme von Flächenpressungen p resultieren. Die Beanspruchungen an den Kontaktflächen können durch das Hook'sche Gesetz beschrieben werden. [Pah-2007, S. 584]

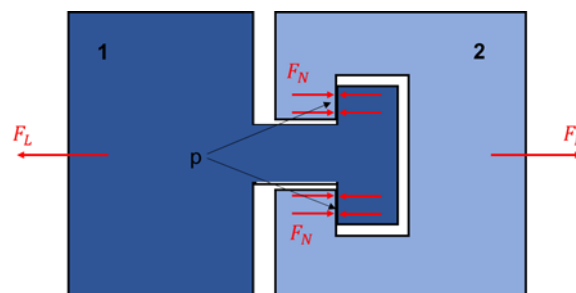


Abbildung 2-7: Formschlüssige Verbindung von zwei Bauteilen bei einachsiger Zugbelastung durch die Kraft F_L [Pah-2007, S. 586]

Der **mitfahrende Zugmittel-Antrieb**, wie Abbildung 2-8 zeigt, befindet sich auf dem Regalbediengerät. Er besteht aus einem einfach gespannten Zahnriemen und einer angetriebenen Zahnriemenscheibe. Der Zahnriemen ist entlang der Fahrschiene als Omega-Führung realisiert. Dafür wird der Zahnriemen durch zwei Umlenkrollen auf die Zahnriemenscheibe geführt. Durch die rotierende Zahnriemenscheibe zieht sich das Regalbediengerät entlang des Zahnriemens. [Sch-2019a, S. 99; FEM-9.101]

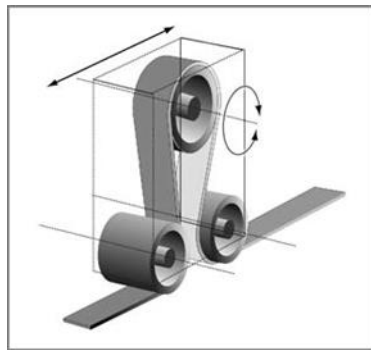


Abbildung 2-8: Mitfahrender Zugmittel-Antrieb / Omega Antrieb [Ose-2008, S. 664]

Beim **stationären Zugmittel-Antrieb** befindet sich der Antrieb mit Zahnriemenscheibe gesondert vom Regalbediengerät am Gassenende. Dafür muss der Zahnriemen umlaufend entlang der Fahrbahn realisiert sein. Das Regalbediengerät ist fest mit dem Zahnriemen verbunden. Durch das Antreiben der stationären Zahnriemenscheibe wird der Zahnriemen und mit ihm das Regalbediengerät bewegt. [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 99]

Das **Zahnstangensystem** besteht aus einem angetriebenen Zahnrad und einer Zahnstange, die entlang der Fahrschiene verlegt ist. Durch das Kämmen des Zahnrads in der Zahnstange kann das Regalbediengerät in x-Richtung fahren. [Sch-2019a, S. 100]

2.2.3 Hubwerk

Unter dem Hubwerk wird die Gesamtheit aller Bauteile verstanden, die zum Heben und Senken des Hubwagens in senkrechte Richtung benötigt werden. Das Hubwerk befindet sich am Fahrwerk, um einen leichten Zugang für Wartungszwecke zu gewährleisten. Die Möglichkeiten der technischen Ausführung des Hubantriebs sind dieselben wie die des Fahrtriebs. [FEM-9.101] Die beim Regalbediengerät eingesetzten Hubantriebe sind somit in Kapitel 2.2.2 Fahrtriebe beschrieben.

Um den Hubwagen mittels Hubantrieb zu heben und zu senken werden Seiltriebe, Kettentriebe oder Zahnriementriebe eingesetzt [FEM-9.101]. Im folgenden Abschnitt werden diese technischen Einrichtungen, die das Heben und Senken des Hubwagens ermöglichen, erläutert.

Für das Heben und Senken des Hubwagens mittels **Seiltriebs** ist am Hubwagen ein Drahtseil angebracht. Das Drahtseil, welches am Kopf des Masts durch Umlenkrollen geführt ist, wird durch eine sich auf dem Fahrwerk befindende angetriebene Trommel auf- bzw. abgewickelt. Die Seiltrommel wird vom Hubantrieb angetrieben. Durch die Verwendung von zwei parallel verlaufenden Seiltrieben kann der Hubwagen höhere Traglasten aufnehmen. [FEM-9.101]

Die Arbeitsweise des **Kettentriebs** ist vergleichbar mit der Funktionsweise des Seiltriebs. Die Bauteile sind jedoch verschieden ausgeführt. Anstelle des Drahtseils wird beim Kettentrieb eine Rundgliederkette verwendet. Die Kette wird auf eine Kettentrommel auf- und abgewickelt und am Kopf des Masts durch Kettenräder geführt. [FEM-9.101]

Beim **Zahnriementrieb** ist der Hubwagen fest mit dem Zahnriemen, der umlaufend entlang des Masts gespannt ist, verbunden. Der Zahnriemen mit befestigtem Hubwagen wird durch einen Antrieb bewegt, der sich auf dem Fahrwerk oder am oberen Ende des Masts befindet. Ist der Zahnriemenantrieb direkt am Hubwagen befestigt, kann bei dieser Ausführung der Zahnriemen einfach gespannt werden. Das Eigengewicht des Antriebs, welches beim Heben und Senken des Hubwagens mit bewegt werden muss, stellt jedoch einen Nachteil dar. [FEM-9.101]

2.2.4 Weitere Elemente

Das Regalbediengerät verfügt über eine Fahrerkabine, wenn das Gerät zum Kommissionieren im halbautomatischen oder manuellen Betrieb eingesetzt wird. Die Fahrerkabine muss sich dabei direkt am Hubwagen befinden. Verfährt das Regalbediengerät automatisch, kann die Fahrerkabine für Wartungszwecke als Notsteuerstand verwendet werden. Die Kabine und der Kopf des Mastes werden über Leitern erreicht, die sich am Mast befinden. [FEM-9.101]

Die Steuerung des Regalbediengeräts ist im Schaltschrank verbaut. Dieser befindet sich aufgrund der guten Zugänglichkeit bei einer Wartung auf dem Fahrwerk. [FEM-9.101]

Zur Bestimmung der Ist-Position des Regalbediengeräts werden Winkelcodierer oder Laserdistanzgeräte verwendet. Durch diese wird ebenfalls eine genaue Positionierung des Regalbediengeräts realisiert. Um zu vermeiden, dass unzulässige Lasten gehoben werden und der Hubwagen ruckartig anfährt, werden zur Lasterkennung ebenfalls Sensoren eingesetzt. [Mar-2016, S. 399; FEM-9.101]

2.2.5 Energie und Datenübertragung

Die Energieversorgung der elektrischen Antriebe und der Steuerung des Regalbediengeräts wird durch Schleifleitungen oder Schleppkabel sichergestellt. Dabei sind die Schleifleitungen als kunststoffummantelte und berührungsgeschützte Stromschiennen realisiert. Die Schleppkabel hängen von der Decke und sind in Schleifen verfahrbar. [FEM-9.101]

Die Übertragung von Daten ist sowohl über die Schleifleitungen, als auch über die Schleppkabel möglich [FEM-9.101]. Bei vollautomatisierten Regalbediengeräten können Daten vom Lagerverwaltungs- und Materialflussrechner an das Regalbediengerät optisch durch Datenübertragungslichtschranken, zum Beispiel durch Infrarot, Datenfunk oder induktiv mittels Schlitzhohlleiter übermittelt werden. Voraussetzung dabei ist eine gerade Fahrstrecke des Regalbediengeräts. [Mar-2016, S. 399]

Steigende Energiepreise und Forderungen der Energieeinsparung aufgrund des Klimawandels haben die Senkung des Energieverbrauches von Regalbediengeräten zu einem wichtigen Faktor werden lassen. Bei der Auslegung des Regalbediengeräts kann durch Einsparung von Masse in der Konstruktion Energie gespart werden. Durch den Einsatz einer Zwischenkreiskopplung von zwei Antrieben kann die Energie, die beim Bremsen eines Antriebs frei wird, für den Betrieb des anderen Antriebs verwendet werden. [FEM-9.101]

2.3 Lagerkonfiguration

Wichtige Merkmale der Lagerkonfiguration sind zum einen die Lagertiefe, zum anderen die Anzahl der am Regalbediengerät eingesetzten Lastaufnahmemittel, wie auch die Tiefe, das bedeutet die Aufnahmekapazität, dieser verwendeten Lastaufnahmemittel [FEM-9.101].

2.3.1 Lastaufnahmemittel

Nach Schmidt et al. ist die Tiefe des Lastaufnahmemittels abhängig davon, wie viele Ladeeinheiten ein Lastaufnahmemittel aufnehmen kann. Kann auf einem Lastaufnahmemittel nur eine Ladeeinheit transportiert werden, wird von einem einfach tiefen bzw. einfach breiten Lastaufnahmemittel gesprochen. Ein Lastaufnahmemittel ist doppelt breit bzw. tief, wenn es zwei Ladeeinheiten aufnehmen kann. [Sch-2019a, S. 101]

Oser differenziert zwischen Einfachlastaufnahmemittel und Mehrfachlastaufnahmemittel. Von Mehrfachlastaufnahmemittel wird gesprochen, wenn mehrere

Einfachlastaufnahmemittel gleichzeitig auf einem Regalbediengerät angebracht sind oder wenn das Regalbediengerät über ein mehrfachtiefes Lastaufnahmemittel verfügt. Mehrfachlastaufnahmemittel erfordern mehrfachtiefe Lager. [Ose-2008, S. 666]

In einem mehrfachtiefen Lager werden in einem Regalfach mehrere Ladeeinheiten hintereinander gelagert. Eine weit verbreitete Form des mehrfachtiefen Lagers ist das doppeltiefe Lager. [Sch-2019a, S. 93; FEM-9.101]

Die Leistung und die Arbeitsweise von Regalbediengeräten wird stark bestimmt von der Anzahl und der Ausprägungsform der auf dem Regalbediengerät verbauten Lastaufnahmemitteln [Hom-2018, S. 200]. Werden auf einem Regalbediengerät mehrere Lastaufnahmemittel verwendet, wird die Spielzeit verkürzt und der Lagerdurchsatz gesteigert, da das Regalbediengerät über mehr Ladekapazität verfügt und dadurch Fahrten zum Ein- und Auslagerpunkt reduziert werden. Der Einsatz eines doppelbreiten Lastaufnahmemittels kann sich ebenfalls spielzeitverkürzend und durchsatzsteigernd auswirken. Doppelbreite Lastaufnahmemittel werden in doppel tiefen Lagern eingesetzt und können zwei Ladeeinheiten hintereinander aufnehmen. Dadurch entfallen Fahrten zum Ein- und Auslagerpunkt. Jedoch ist die Effizienz von mehrfachtiefen Lastaufnahmemitteln stark abhängig von der verwendeten Lagerplatzvergabe. Des Weiteren kann es bei der doppel tiefen Lagerung zu einem Umlageraufwand kommen, wenn sowohl das hintere als auch das vordere Regalfach belegt ist und nur die hintere Ladeeinheit benötigt wird. Um auf die hintere Ladeeinheit zugreifen zu können, muss die vordere Ladeeinheit umgelagert werden. Das Umlagern wirkt sich spielzeitverlängernd aus. [Arn-2019, S. 216; FEM-9.101; Hom-2018, S. 203]

Bei der Wahl eines einzusetzenden Lastaufnahmemittels sind vor allem die zu transportierenden Güter entscheidend. Besonders bei leichteren Stückgütern, die mittels Kleinladungsträger, wie zum Beispiel Behälter, Kartons oder Tablare transportiert werden, sind die Ausprägungsformen des Lastaufnahmemittels vielfältig, da aufgrund des geringen Gewichts ein Schieben oder Ziehen der Kleinladungsträger möglich ist. [Hom-2018, S. 200; FEM-9.101]

Im Folgenden werden technische Ausführungen und Funktionsweisen von Lastaufnahmemitteln beschrieben.

In Palettenlagern werden als Lastaufnahmemittel am häufigsten **Teleskopgabeln** eingesetzt. Bei der Entnahme einer Ladeeinheit aus dem Regalfach erfolgt nach dem Positionieren des Regalbediengeräts am Regalfach das Ausfahren der Teleskopgabel in y-Richtung unter die Ladeeinheit. Während des Ausfahrvorgangs besteht zwischen der Unterseite der Ladeeinheit und der oberen Seite der Teleskopgabel ein

Sicherheitsabstand in z-Richtung. Dieser Abstand wird mit Beendigung des Ausfahrvorgang durch eine Bewegung des Hubwagens in z-Richtung überwunden. Die Ladeeinheit befindet sich nun auf der Teleskopgabel. Die Teleskopgabel wird anschließend mit der aufgenommenen Ladeeinheit eingefahren. Das Regalbediengerät bringt die Ladeeinheit zum Auslagerpunkt. Das Regalbediengerät steht während des gesamten Aufnahmeprozesses der Ladeeinheit still. Die Dauer der Lastübergabe ist aufgrund der sequenziellen Bewegungsreihenfolge und der daraus bedingten Positionierzeiten relativ hoch. Teleskopgabeln werden auch in doppeltiefen Lagern eingesetzt. [Arn-2019, S. 204; FEM-9.101; Hom-2018, S. 200]

Der **teleskopierbare Riemenförderer**, wie Abbildung 2-9 darstellt, verfügt neben der Teleskopgabel über einen Riemenförderer. Das Anheben der Ladeeinheit bei Lastaufnahme mittels mit Teleskopgabel wirkt sich spielzeitverlängernd aus. Der beim teleskopierbaren Riemenförderer verwendete Riemen ersetzt das Anheben der Ladeeinheit. Die Ladeeinheit wird durch den Reibschluss zwischen Riemen und Ladehilfsmittel aus dem Regalfach gezogen. [FEM-9.101; Ose-2008, S. 667]

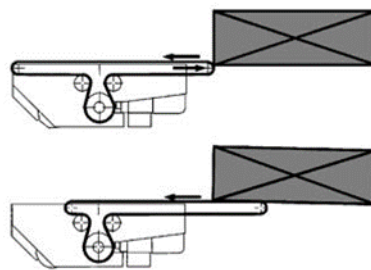


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung eines teleskopierbaren Riemenförderers [Ose-2008, S. 667]

Bei der **Ziehtechnik** wird eine Ladeeinheit mittels Ziehbolzen und zwei gegenläufigen waagrechten Ketten aus dem Regalfach gezogen bzw. ins Regalfach geschoben. Die Ziehbolzen greifen dabei in eine spezielle Nute, die an der Stirnseite von Behältern oder Tablaren angebracht ist. Abbildung 2-10 zeigt die schematische Funktionsweise der Ziehtechnik. [Ose-2008, S. 666]

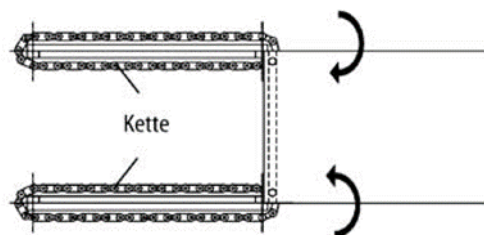


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Ziehtechnik [Ose-2008, S. 666]

Eine weitere technische Lösung für Lastaufnahmemittel ist die in Abbildung 2-11 dargestellte **Greif- und Klammertechnik**. Dafür wird die logistische Einheit durch Greifbacken eingeklemmt. Die Greifbacken werden durch Ketten- oder Riementriebe ein- bzw. ausgefahren und fassen in die Nuten am Behälter. Im Gegensatz zur Ziehtechnik kann durch den Einsatz von Greifbacken der Volumennutzungsgrad des Lagers vergrößert werden, da die Behälter dichter gelagert werden können. Der Einsatz von Greifbacken ist auch in mehrfachtiefen Lagern möglich. [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 102; Ose-2008, S. 667]

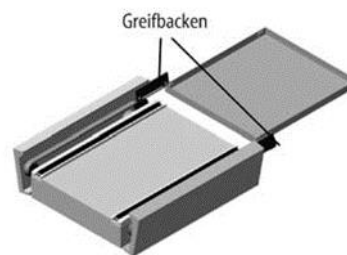


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Greif- und Klammertechnik [Ose-2008, S. 666]

Die **Teleskopierunterfahrtechnik** findet nach FEM-9.101 ebenfalls Anwendung bei Lastaufnahmemitteln [FEM-9.101]. Schmidt et al. bezeichnen diese Anwendungsform als Teleskoptischtechnik [Sch-2019a, S. 104]. Zur Entnahme einer logistischen Einheit fährt ein teleskopierbarer Tisch, wie Abbildung 2-12 zeigt, unter die Ladeeinheit. Nachdem der Tisch ausgefahren ist, wird das Lastaufnahmemittel und somit auch die Ladeeinheit durch eine Bewegung des Hubwagens angehoben. Im Anschluss fährt der Tisch mit Ladeeinheit ein. Grundvoraussetzung für die Funktionsweise der Teleskopierunterfahrtechnik ist eine frei zugängliche Unterseite der Ladeeinheit, wie es zum Beispiel Regale mit Auslagewinkeln ermöglichen. Die Technik kann ebenfalls in mehrfachtiefen Lagern eingesetzt werden. Die Dauer der Lastübergabe reduziert sich durch den Einsatz eines zusätzlichen Riemenförderers am Lastaufnahmemittel, da der Tisch hierbei nicht vollständig ausgefahren werden muss. Befindet sich der Tisch zu drei viertel unter der Ladeeinheit, wird das Lastaufnahmemittel angehoben und der Riementrieb betätigt, zum gleichen Zeitpunkt fährt der Tisch wieder ein. [FEM-9.101; Sch-2019a, S. 104f.; Ose-2008, S. 667]

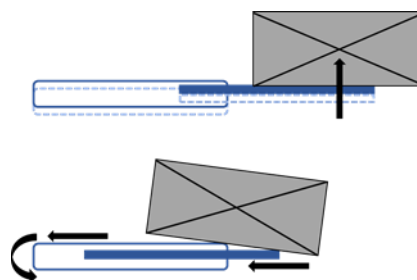


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Teleskopierunterfahrtechnik [Ose-2008, S. 667]

Ladeeinheiten mit speziellen Oberflächen können bei **Vakuum-Greifsystemen** mittels Saugglocke transportiert werden [FEM-9.101].

Magnetische Ladeeinheiten, zum Beispiel Metallplatten, werden durch **Hebemagneten**, die sich auf dem Lastaufnahmemittel befinden, angezogen und aufgenommen [FEM-9.101].

2.3.2 Umsetzeinrichtung

Ist der Güterumschlag eines Lagers gering, kann ein Regalbediengerät auch für mehrere Regalgassen verwendet werden [Mar-2016, S. 400].

Die Umsetzeinrichtung ermöglicht einen Gassenwechsel. Für einen Gassenwechsel kann das Regalbediengerät mit einem für Kurvenfahrten ausgelegten Fahrwerk ausgestattet sein. Schienen- und Weichensysteme leiten es in die Gassen. Alternativ kann ein Regalbediengerät die Gasse durch einen Umsetzwagen wechseln. Der Umsetzwagen fährt quer zu den Regalgassen. Über Schienen kann das Regalbediengerät auf den Umsetzwagen gelangen und nach dem Transport in eine andere Gasse diesen wieder verlassen. [FEM-9.101; Mar-2016, S. 400]

2.4 Instandhaltung

2.4.1 Begriffsdefinition und Ziele der Instandhaltung

Nach DIN-13306 wird unter **Instandhaltung** die Gesamtheit aller technischen und administrativen Maßnahmen, sowie Maßnahmen des Managements verstanden, die während des Lebenszyklus eines Objektes stattfinden und folgende Ziele verfolgen [DIN-13306]:

- Erhalt des funktionsfähigen Zustands des Objekts,
- Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands des Objekts.

Dabei stellt der **funktionsfähige Zustand** eines Objekts jenen Zustand dar, in welchem das Objekt eine geforderte Funktion ausführen kann, unter der Annahme, dass die dafür erforderlichen externen Ressourcen zur Verfügung gestellt sind. Die **geforderte Funktion** sind jene Funktion bzw. Funktionen, die zur Erfüllung der definierten Anforderungen als erforderlich aufgefasst werden. [DIN-13306]

Wenn das Objekt die geforderte Funktion nicht erfüllen kann, wird von einem **Ausfall** gesprochen. Das Objekt geht dabei von einem funktionsfähigen Zustand in einen

vollständigen oder teilweisen Fehlzustand über. Der Ausfall eines Objekts ist somit ein Ereignis, während der **Fehler** eines Objekts einen Zustand darstellt, indem das Objekt nicht fähig ist seine geforderte Funktion auszuführen. [DIN-13306]

Auch Eberlin et al. definieren ein Objekt als fehlerhaft, „wenn es seine erwartete Funktion nicht erfüllt.“ [Ebe-2014, S. 9]. Von einem Fehler wird nicht nur dann gesprochen, wenn ein Objekt komplett funktionsunfähig ist, sondern auch wenn die Funktion nicht im geforderten Umfang erbracht wird. Als Beispiel kann ein Drucker genannt werden, der laut seinen technischen Daten zehn Seiten pro Minute drucken kann, jedoch bei Betrieb nur fünf Seiten in einer Minute druckt. Obwohl die Seiten in der geforderten Qualität nach zwei Minuten vorliegen, ist der Drucker fehlerhaft. [Ebe-2014, S. 9f.]

Ein Ausfall bzw. ein Fehler kann mittels der Schwere und der Kritikalität klassifiziert werden. Die **Schwere** bewertet, welche potentiell schädlichen oder tatsächlich schädlichen Folgen durch den Ausfall oder durch den Fehler entstehen. Die Schwere kann dabei Bezug nehmen auf die Ziele der Instandhaltung wie Sicherheit, Verfügbarkeit oder Qualität. Die **Kritikalität** eines Ausfalls bzw. eines Fehlers ist ein zahlenmäßiger Index. Dafür wird die Schwere eines Ausfalls oder eines Fehlers in Verbindung gesetzt mit der **Auftrittshäufigkeit** des Ausfalls bzw. des Fehlers. Dadurch kann für einen Ausfall oder einen Fehler eine Kritikalitätsmatrix generiert werden. Abbildung 2-13 zeigt eine exemplarische Kritikalitätsmatrix. [DIN-13306]

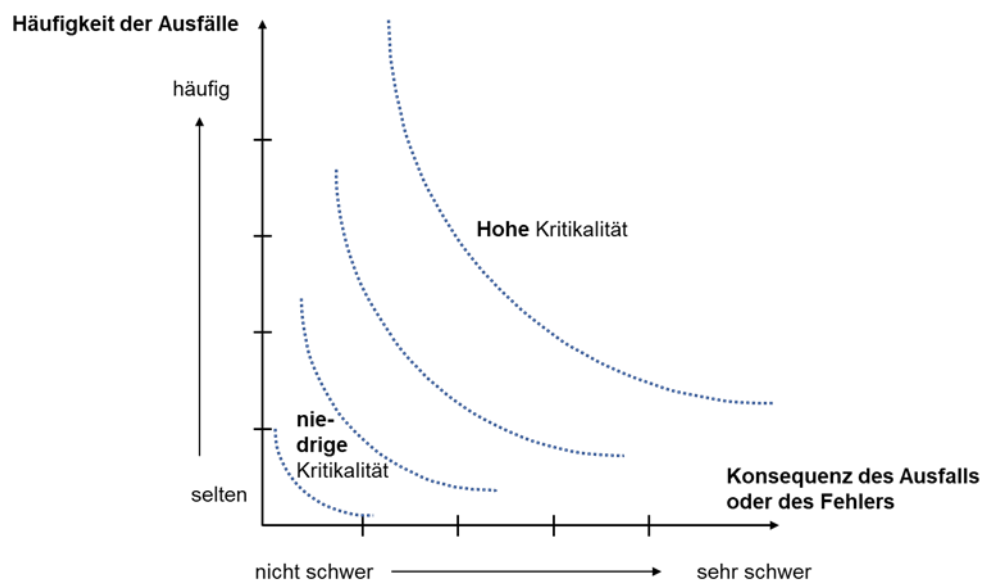


Abbildung 2-13: Kritikalitätsmatrix eines Ausfalls bzw. eines Fehlers [DIN-13306]

Ausfallursachen sind laut DIN-13306 die „Umstände, die während der Planung, des Konstruktionsentwurfs, der Herstellung, der Inbetriebnahme, der Nutzung oder der Instandhaltung zum Ausfall führen“ [DIN-13306].

Nach DIN-13306 gibt es unter anderem abnutzungsbedingte, alterungsbedingte Ausfälle oder Ausfälle durch eine unsachgemäße Verwendung. Bei einem **abnutzungsbedingten Ausfall** steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit mit der Zahl der Betriebseinätze oder mit der Betriebszeit des Objekts. Die Abnutzung ist ein physikalisches Phänomen und äußert sich zum Beispiel durch Verlust oder Verformung des Werkstoffes. Die Auftrittswahrscheinlichkeit **eines alterungsbedingten Ausfalls** steigt mit der Zeit, die unabhängig von der Betriebszeit des Objekts ist. Der Alterungsprozess ist ebenfalls ein physikalisches Phänomen, der beispielsweise zu physikalischen oder chemischen Eigenschaftsänderungen eines Werkstoffes führt. Wirken während des Betriebs eines Objekts Beanspruchungen, die über den Auslegungskriterien liegen und die angegebenen Fähigkeiten des Objekts übertreffen, kann es zu einem **Ausfall durch unsachgemäße Verwendung** kommen. [DIN-13306]

Die Ausfallursachen verändern sich während des Lebenszyklus von Anlagen. Abbildung 2-14 zeigt in blau eingefärbt die sogenannte Badewannenkurve, die die Ausfallrate $\lambda(t)$ von Anlagen über ihre Betriebsdauer t darstellt. Die Badewannenkurve bildet einen idealisierten Verlauf der Ausfallrate ab, da im Feld ein Ausfall nicht nur eine Ursache haben kann, sondern mehrere und unterschiedliche, die auch zeitlich versetzt eintreten können. Dennoch ist das Ausfallverhalten von Anlagen relativ zuverlässig bestimmt durch Frühausfälle, Zufallsausfälle und Altersausfälle. Die Badewannenkurve ist dadurch in eine Frühphase, eine Gebrauchsphase und eine Spätphase untergliedert. Der Verlauf der Badewannenkurve in den einzelnen Phasen ergibt sich durch die Addition der Ausfallraten der Ausfälle, die in der jeweiligen Phase auftreten. Da Zufallsausfälle in allen Phasen auftreten, wird zum Beispiel für die Frühphase die Ausfallrate der Frühausfälle, die in Abbildung 2-14 durch grün gestrichelte Linien dargestellt ist, mit der Ausfallrate der Zufallsausfälle (orange gestrichelte Linie) addiert. [Ryl-2010, S. 48f.; Hod-2018, S. 142; Paw-2016, S. 70; Lau-1999, S. 331; Ebe-2014, S. 11f.]

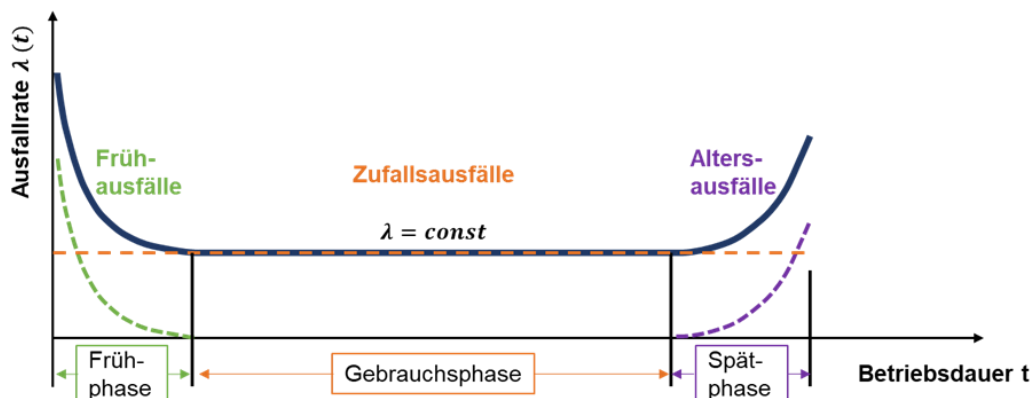


Abbildung 2-14: Darstellung der Ausfallrate über die Betriebszeit
[Lau-1999, S. 331; Paw-2016, S. 70; Ryl-2010, S. 48; Ebe-2014, S. 12]

- In der **Frühphase** sinkt, wie in Abbildung 2-14 gezeigt, die Ausfallrate von einem zunächst sehr hohen Wert ab. Frühausfälle entstehen oft durch Fehler bei der Projektierung, Konstruktion, Fertigung oder Montage der Anlage. Vor allem bei der Installation und Bedienung von neu entwickelten Systemen kann es durch unerfahrenes Personal zu Ausfällen in der Frühphase kommen. [Ebe-2014, S. 11; Lau-1999, S. 331; Hod-2018, S. 143]
- Während der **Gebrauchsphase** ist die Ausfallrate konstant. Es treten Zufallsausfälle auf, die nicht abhängig vom Alter oder Verschleißzustand der Anlagen sind. Ausfälle werden in dieser Phase vor allem durch äußere Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel durch Bedienfehler, durch den Betrieb mit nicht zulässigen Belastungen oder durch ungenügende Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst. [Ryl-2010, S. 48; Paw-2016, S. 70; Lau-1999, S. 331]
- In der **Spätphase** steigt die Ausfallrate, da es zu Altersausfällen kommt, die durch betriebsbedingten Verschleiß entstehen. Altersausfällen entstehen üblicherweise erst dann, wenn die Betriebszeit an die Lebenszeit der Anlagenkomponenten heranreicht. [Ebe-2014, S. 11; Lau-1999, S. 331; Paw-2016, S. 70]

Nach Eberlin et al. treten in den beschriebenen Phasen frühe Fehler, zufällige Fehler, und Alterungsfehler auf. Im Gegensatz zu den frühen Fehlern und den Alterungsfehlern ist es nicht möglich zufällige Fehler zu vermeiden oder zu beseitigen. Frühe Fehler können durch Tests, zum Beispiel während der Entwicklung, ermittelt und durch geeignete Maßnahmen eliminiert werden. Alterungsfehler werden umgangen, indem verschlissene Komponenten rechtzeitig ausgetauscht werden. Bei zufälligen Fehlern können adäquate Reaktionsmaßnahmen nur durch statistische Berechnungen abgeleitet werden. Da sie zudem noch in allen Lebensphasen einer Anlage auftreten, haben sie einen wesentlichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Anlagen. [Ebe-2014, S. 5, 11f., 14]

Die **Zuverlässigkeit** wird durch das Fachgebiet der Zuverlässigkeitstheorie bewertet, prognostiziert, erhalten und verbessert. Ziel ist es, die unterschiedlichen Einflussfaktoren, die zu einem Ausfall eines technischen Systems führen zum Beispiel Herstellungsfehler oder Verschleißprozesse zu beschreiben, um das Ausfallrisiko und seine zum Teil gravierenden Folgen zu minimieren. Bei der Bewertung der Zuverlässigkeit wird auf quantifizierbare Zuverlässigkeitskenngößen zurückgegriffen, die stochastische bzw. statistische Zusammenhänge zwischen Einflussfaktor und Zuverlässigkeit wiedergeben. Ein Beispiel für eine solche Kenngröße ist die Ausfallrate oder die Verfügbarkeit. [Ryl-2010, S. 43f.]

Bei der Berechnung von Zuverlässigkeit muss ebenfalls zwischen zufälligen Fehlern und frühen Fehlern bzw. Alterungsfehlern unterschieden werden, da diese durch

unterschiedliche Lebensdauerverteilungen beschrieben werden. Für zufällige Fehler, die sich durch eine konstante Ausfallrate auszeichnen, eignet sich eine Exponential-Verteilung. Für frühe Fehler und Alterungsfehler wird als mathematisches Modell auf eine Weibull-Verteilung zurückgegriffen. Im Folgenden soll auf die Beschreibung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von zuverlässigen Fehlern eingegangen werden. [Ryl-2010, S. 50ff.; Ebe-2014, S. 13, 188]

Laut DIN-13306 wird von **Zuverlässigkeit** gesprochen, wenn ein Objekt fähig ist, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen über einen festgelegten Zeitraum auszuführen. Bei Bedarf kann der festgelegte Zeitraum auch durch eine vorgegebene Anzahl an Nutzungseinheiten, beispielsweise Anzahl an Zyklen oder Anzahl an Betriebsstunden, ersetzt werden. [DIN-13306]

Die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$, gegeben durch die Formel

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (2-1)$$

mit λ für die konstante Ausfallrate und t für die Zeit, gibt die relative Anzahl von Komponenten an, die zu einem bestimmten Zeitpunkt t , d.h. nach Ablauf einer bestimmten Betriebsdauer, noch fehlerfrei sind [Ebe-2014, S. 30]. Die Gleichung drückt aber auch die Wahrscheinlichkeit dafür aus, dass sich eine bestimmte Komponente zu einem Zeitpunkt t , nach Ablauf einer bestimmten Betriebsdauer, in einem funktionsfähigen Zustand befindet. Diese Wahrscheinlichkeit wird auch Überlebenswahrscheinlichkeit genannt. [Ryl-2010, S. 44; Ebe-2014, S. 30, 65]

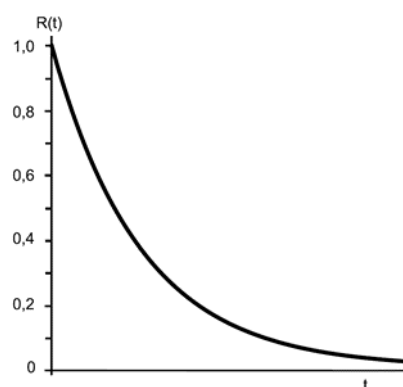


Abbildung 2-15: Verlauf der Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ [Ebe-2014, S. 30]

Ein Maß für die Zuverlässigkeit stellt die Mean Time Between Failures, (MTBF) dar. Die MTBF ist die mittlere Zeit, die zwischen zwei Fehlern verstreicht. Die Zuverlässigkeit einer Anlage steigt, wenn die MTBF zunimmt. Die Kenntnis, wie lange eine

Komponente im Mittelwert fehlerfrei d.h. ohne zufälligen Fehler betrieben werden kann, verbessert u.a. die Instandhaltung, da Ressourcen und Ersatzteile besser eingeplant werden können. [Ebe-2014, S. 4, 30]

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Zuverlässigkeit und **Verfügbarkeit** ist, dass die Anlage bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit sich selbst überlassen wird. Das bedeutet, es werden keine Instandhaltungsmaßnahmen, wie zum Beispiel der Austausch von verschlissenen Komponenten durchgeführt. Erfolgt eine Instandsetzung der Anlage, wird nicht mehr von Zuverlässigkeit, sondern von Verfügbarkeit gesprochen, da bei der Bestimmung der Verfügbarkeit Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Nach der in Abbildung 2-15 dargestellten Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ liegt die Zuverlässigkeit zu Beginn der Betriebszeit einer Anlage, d.h. bei $t=0$, bei 100%. Mit Verlauf der Zeit sinkt die Zuverlässigkeit exponentiell ab und konvergiert gegen 0%. Wird eine Anlage instandgesetzt, wird aus dem Gesichtspunkt der Zuverlässigkeit gesehen, immer wieder ein Zustand erzeugt, der $R(t=0)$ entspricht. Ist eine Anlage nicht instandsetzbar, entspricht die Verfügbarkeit der Überlebenswahrscheinlichkeit. [Ebe-2014, S. 27, 30, 66; Ryl-2010, S. 49]

Ein weiterer Unterschied lässt sich durch die Definitionen zeigen. Nach Eberlin et. al. kann die Zuverlässigkeit als Wahrscheinlichkeit angegeben werden, dass die Anlage nach Ablauf einer *bestimmten Zeit* noch fehlerfrei funktioniert. Die Verfügbarkeit spiegelt hingegen eine Wahrscheinlichkeit wider, dass sich die Anlage zu einem *beliebigen Zeitpunkt* in einem funktionsfähigen Zustand befindet. [Ebe-2014, S. 65]

Auch nach DIN-13306 ist die Verfügbarkeit eines Objekts dann gegeben, wenn ein Objekt fähig ist bei Erfordernis und unter gegebenen Bedingungen sich in einem Zustand zu befinden, in dem es die geforderte Funktion ausführen kann, wenn die erforderlichen externen Ressourcen zur Verfügung gestellt sind. [DIN-13306]

Eine wichtige Größe für die Ermittlung von Verfügbarkeit stellt die mittlere Ausfallzeit, die Mean Down Time (MDT) dar. Die MDT ist die mittlere Zeit, die zwischen dem Auftreten eines Fehlers bis zum fehlerfreien Weiterbetrieb der Anlage verstreift. Eine Anlage ist umso zuverlässiger, je länger sie sich in einem fehlerfreien Zustand befindet, d.h. je höher die MTBF ist. Eine Anlage ist desto verfügbarer, je kürzer die Ausfallzeit, d.h. je kürzer die MDT ist, im Vergleich zur Gesamtbetriebszeit ist. [Ebe-2014, S. 14, 68]

Die MDT ist zu unterscheiden von der Mean Time To Repair (MTTR), da die MTTR nur die mittlere Zeit für die Reparatur umfasst und nicht beispielsweise die Zeit, die zur Suche der Fehlerursache oder für Funktionstests nach der Reparatur benötigt wird.

Wenn die MTTR gleich der MDT ist, stellt dies einen Sonderfall dar. Für die im Kapitel 2.4.4 verwendeten Formeln gilt dieser Sonderfall ebenfalls wie für die Ergebnisse in Kapitel 3. [Ebe-2014, S. 68]

Die Verfügbarkeit setzt die Zeit, in der sich die Anlage in einem funktionsfähigen Zustand befindet d.h. die MTBF, ins Verhältnis mit Gesamtzeit, die sich durch die Addition von MTBF und MDF ergibt [Ebe-2014, S. 69].

Für die Verfügbarkeit A gilt:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (2-2)$$

mit MTBF für die mittlere funktionsfähige Zeit einer Anlage und MDT für die mittlere Ausfallzeit einer Anlage. Sie gibt somit im Mittel den Zeitanteil an, in dem die Anlage fehlerfrei funktioniert. [Ebe-2014, S. 68f.]

Die Erhaltung der Verfügbarkeit eines Objekts in der geforderten Funktion ist ein Instandhaltungsziel [DIN-13306].

Laut Pawellek sind die **Instandhaltungsziele** an den Unternehmenszielen ausgerichtet. Oberstes Ziel jedes Unternehmens ist eine adäquate Renditeerzielung und Gewinnmaximierung. Dazu kommen weitere Ziele, die durch Managementphilosophie und Unternehmenspolitik geprägt sind, wie zum Beispiel die Reduktion des Energieverbrauchs. Auf diese Ziele ist die Instandhaltung auszurichten. [Paw-2016, S. 55]

Daraus ergeben sich für die Instandhaltung die folgenden Ziele [Paw-2016, S. 56]:

- Reduzierung von Ausfallzeiten,
- Reduzierung der vorbeugenden Instandhaltungszeit,
- Reduzierung der direkten und indirekten Instandhaltungskosten,
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit,
- Erhöhung der Zuverlässigkeit,
- Erhöhung der Lebensdauer,
- Reduzierung der Life-Cycle-Costs.

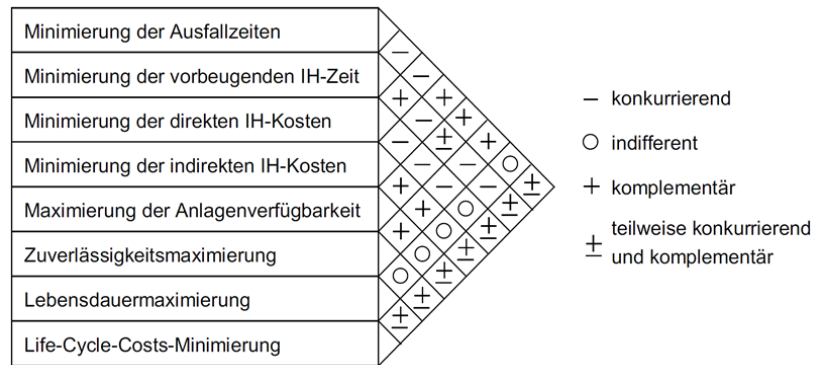


Abbildung 2-16: Abhängigkeiten der Instandhaltungsziele [Paw-2016, S. 56]

Wie der Abbildung 2-16 zu entnehmen ist, können die genannten Ziele komplementär, konkurrierend oder indifferent sein. Zum Beispiel ist das Ziel der Maximierung der Anlagenverfügbarkeit konkurrierend mit dem Ziel der Minimierung der direkten Instandhaltungskosten. Wie im nächsten Kapitel beschrieben, kann die Verfügbarkeit durch die Wahl unterschiedlicher Instandhaltungsarten erhöht werden. Eine Erhöhung der Verfügbarkeit kann beispielsweise mit einer vorausbestimmten Instandhaltung erzielt werden. Zur Realisierung der vorausbestimmten Instandhaltung, bei der eine Instandhaltung in festgelegten Zeitintervallen erfolgt, wird jedoch ein hoher Personal- und Materialaufwand benötigt, welche die direkten Instandhaltungskosten erhöhen. [Bra-2016, S. 6, 23; DIN-13306; Paw-2016, S. 56]

Nach Pawellek fallen unter **direkte Instandhaltungskosten** zum Beispiel Personal-, Ersatzteil- und Materialkosten, wie auch Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe. Sie können direkt den Inspektions-, Wartungs-, Instandsetzungs- und Verbesserungstätigkeiten zugewiesen werden. [Paw-2016, S. 61]

Unter **indirekte Instandhaltungskosten** fallen Kosten, die durch einen Anlagenausfall oder einen Stillstand entstehen. Kommt es zu einem Produktionsausfall so sind die entgangenen Deckungsbeiträge und die anfallenden Kosten, um den Produktionsrückstand wieder aufzuholen, beispielsweise Überstunden, indirekte Instandhaltungskosten. [Paw-2016, S. 61]

Weitere Instandhaltungsziele liefert DIN-13306. Demnach können die oben genannten Ziele durch die folgenden Instandhaltungsziele ergänzt werden [DIN-13306]:

- Sicherung der gelieferten Produktqualität und/oder Qualitätssicherung der erhaltenen Dienstleistungen bei Kostenbeachtung,
- Berücksichtigung der Umwelt- und Sicherheitsanforderungen, der personellen und anderen verpflichtenden Anforderungen, die durch das Objekt entstehen,
- Werterhalt und Verlängerung der Brauchbarkeitsdauer einer Anlage.

2.4.2 Instandhaltungsarten

Nach DIN-13306 lassen sich die Instandhaltungsarten in drei Hauptgruppen gliedern [DIN-13306]:

- Verbesserung,
- Korrektive Instandhaltung,
- Präventive Instandhaltung.

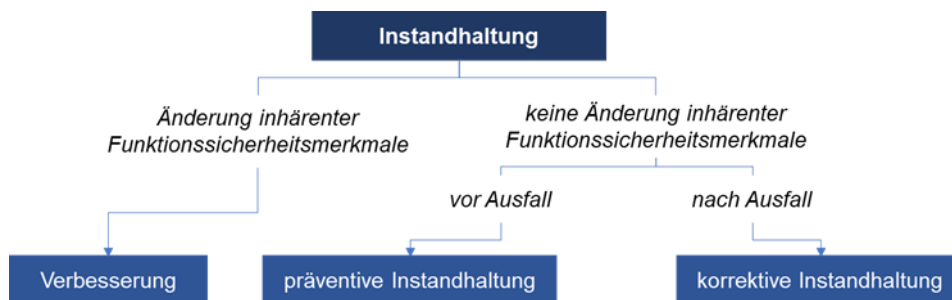


Abbildung 2-17: Erste Untergliederungsebene der Instandhaltungsarten [DIN-13306]

Unter **Verbesserung** wird die Gesamtheit aller technischen und administrativen Maßnahmen, sowie Maßnahmen des Managements verstanden, die folgende Ziele verfolgen [DIN-13306]:

- Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit und/oder,
- Steigerung der Instandhaltbarkeit und/oder,
- Steigerung der Sicherheit eines Objekts.

Bei der Verbesserung wird die ursprüngliche Funktion des Objekts nicht geändert [DIN-13306].

Dabei wird unter immanenter Zuverlässigkeit jene Zuverlässigkeit verstanden, die durch Konstruktionsplanung und Fertigung unter Betriebsbedingungen ermittelt wird. Hierbei wird angenommen, dass nur Routine-Instandhaltungen und keine präventive Instandhaltung ausgeführt werden. [DIN-13306]

Die Instandhaltbarkeit eines Objekts ist dann gegeben, wenn das Objekt unter gegebenen Einsatzbedingungen in einem funktionsfähigen Zustand gehalten oder in ihn zurückversetzt werden kann bei Durchführung von Instandhaltung. [DIN-13306]

Wird beispielsweise die Konstruktion eines Bauteils einer Anlage verändert, um eine erkannte Schwachstelle zu beseitigen, fällt diese Maßnahme unter die Instandsetzungsart einer Verbesserung. [Ryl-2010, S. 24]

Bei der **korrektiven Instandhaltung** werden erst dann Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen, wenn es bereits zu einem Anlagenausfall oder einer Anlagenstörung gekommen ist. Dadurch differiert sie zu den präventiven Instandhaltungsarten, deren Ziel es ist, Ausfälle nicht entstehen zu lassen. Zum Beispiel fällt bei einem PKW der Austausch der Batterie nach einem Ausfall unter die korrektive Instandhaltung. [DIN-13306; Paw-2016, S. 174; Lei-2014, S. 20; Eng-2018, S. 3]

Der Zeitpunkt für die Durchführung von Instandhaltungsaktivitäten wird bei der korrektiven Instandhaltung nicht durch den Menschen, sondern durch die Anlage festgelegt. Dadurch treten bei der korrektiven Instandhaltung ungeplante Ausfälle auf. Ein zweiter daraus resultierender Nachteil ist die unzureichende Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen. Es ist möglich, dass nach einem Ausfall notwendige Instandhaltungsressourcen, wie beispielsweise Personal oder Ersatzteile nicht vorhanden sind oder eine Vorhaltung derer speziell für die Art des Schadens nötig ist. Die Instandsetzung wird zudem unter einem hohen Zeitdruck durchgeführt. Da nicht vorhergesehen werden kann, wann ein Schadensfall eintritt, können keine Aussagen über die garantierte Verfügbarkeit der Anlage getroffen werden. Des Weiteren können auch unvorhersehbare Folgeschäden an anderen Anlagen oder Anlagenkomponenten entstehen, weil es oft zu einer Unterschreitung der Abnutzungsgrenze kommt. Die Ausfallzeit und die Ausfallfolgekosten sind im Vergleich zu den anderen präventiven Instandhaltungsarten bei der korrektiven Instandhaltung deshalb am höchsten. Jedoch wird bei der korrektiven Instandhaltung der Abnutzungsvorrat, wie Abbildung 2-18 zeigt, vollständig ausgeschöpft. Auch der Aufwand, der für die Instandhaltung aufgewendet werden muss, bevor ein Ausfall eintritt, ist gering. [Lei-2014, S. 20; Ryl-2010, S. 28; Aus-2016, S. 1; Bra-2016, S. 23]

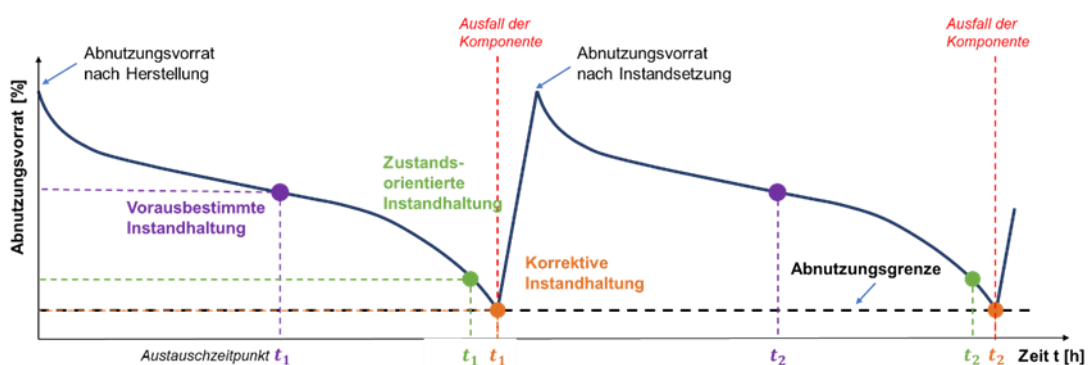


Abbildung 2-18: Nutzung des Abnutzungsvorrats abhängig von der gewählten Instandhaltungsart [DIN-31051; Bra-2016, S. 7; Ryl-2010, S. 29f.]

Aus den oben genannten Gründen sollte eine korrektive Instandhaltung nur bei Anlagen mit redundanten Systemen und bei Produktionsprozessen mit geringer Kritikalität angewandt werden [Aus-2016, S. 1]. Des Weiteren sollte sie nur bei Anlagenkomponenten eingesetzt werden, die einfach und kostengünstig austauschbar sind und bei denen kein Sicherheitsrisiko durch einen Ausfall besteht [Müh-2018, S. 354].

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der korrektiven Instandhaltung nach [Lei-2014, S. 20; Ryl-2010, S. 28; Aus-2016, S. 1; Bra-2016, S. 23]

Vorteile korrektiven Instandhaltung	Nachteile korrektiven Instandhaltung
Vollständige Ausschöpfung des Abnutzungsvorrats	Ungeplante Ausfälle
Niedriger Instandhaltungsaufwand vor Ausfallseintritt	Unzureichende Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen <ul style="list-style-type: none"> → Hoher Zeitdruck, → Nichtvorhandensein von Instandhaltungsressourcen → Vorhaltung von Instandhaltungsressourcen
	Keine Aussagen über Anlagenverfügbarkeit möglich
	Unvorhergesehene Folgeschäden aufgrund von Betrieb unter Abnutzungsgrenze
	Sehr hohe Ausfallzeiten und Ausfallfolgekosten

Wie in Abbildung 2-19 ersichtlich, kann die korrektive Instandhaltung in eine **sofortige korrektive Instandhaltung** und in eine **aufgeschobene korrektive Instandhaltung** untergliedert werden. Im Gegensatz zu der sofortigen korrektiven Instandhaltung, bei der die Instandhaltungsmaßnahme unmittelbar d.h. ohne Aufschub nach der Erkennung eines Fehlers durchgeführt wird, erfolgt bei der aufgeschobenen korrektiven Instandhaltung, die Instandsetzung nicht sofort nach der Fehlererkennung. [DIN-13306]



Abbildung 2-19: Übersicht über Instandhaltungsarten [DIN-13306]

Bei der **präventiven Instandhaltung** wird der Abbau, d.h. eine schädliche physikalische Zustandsänderung, die durch Zeit, durch Nutzung oder externe Ursachen eintritt, beurteilt und/oder vermindert. Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Objekts soll durch ihren Einsatz reduziert werden. Die präventive Instandhaltung kann, wie Abbildung 2-19 zeigt, untergliedert werden in eine vorausbestimmte Instandhaltung und in eine zustandsorientierte Instandhaltung. [DIN-13306]

Bei der **vorausbestimmten Instandhaltung** erfolgen Instandhaltungsmaßnahmen in festgesetzten Zeitintervallen oder nach einer festgesetzten Zahl von Nutzungseinheiten. Der Zustand des Objekts wird dabei nicht berücksichtigt. Im Vergleich zur reaktiven Instandhaltung kann die Ausfallwahrscheinlichkeit durch die regelmäßigen Instandhaltungsaktivitäten stark reduziert werden. Daraus resultiert eine ansteigende Anlagenverfügbarkeit. Am Beispiel des oben genannten PKWs wäre ein Motorölwechsel eine vorausbestimmte Instandhaltungsmaßnahme, da ein Ölwechsel u.a. nach einer gewissen Anzahl an gefahren Kilometern durchgeführt wird. Die vorausbestimmte Instandhaltung eignet sich vor allem gut bei Anlagenkomponenten, bei denen ein sehr gutes Wissen über deren zu erwartende Lebensdauer besteht. Des Weiteren wird sie bei Anlagen eingesetzt, durch deren Ausfall Mensch oder Umwelt stark gefährdet werden. [DIN-13306; Bra-2016, S. 23; Müh-2018, S. 354; Lei-2014, S. 18; Ryl-2010, S. 28, 30]

Durch die regelmäßigen Zeitintervalle bzw. feste Zahl an Nutzungseinheiten wird die Planbarkeit der Instandsetzung hinsichtlich Ablauf, Material und Ressourcen verbessert. Dementsprechend erfordert die vorausbestimmte Instandhaltung aber auch einen höheren Planungsaufwand. Die präventive Instandhaltung ermöglicht eine

Reduzierung von Ausfallkosten d.h. von indirekten Instandhaltungskosten, bedingt jedoch einen Anstieg von direkten Instandhaltungskosten. Ein Grund dafür sind neben dem Personalaufwand vor allem ein hoher Materialaufwand, da aufgrund der definierten Zeitintervalle bzw. festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten die Restlebensdauer der Bauteile nicht ausgeschöpft werden kann. Wie Abbildung 2-18 zeigt, wird der Abnutzungsvorrat nicht vollständig genutzt. Bei der vorausbestimmten Instandhaltung kann es deshalb zu einem, aus technischer Sicht, nicht nötigen und somit nicht wirtschaftlichen Komponentenaustausch kommen, da der tatsächlich vorliegende Zustand des Bauteils nicht berücksichtigt wird. Wie lange eine Komponente eingesetzt werden kann, bis sie aufgrund ihres geringen Abnutzungsvorrats ausgetauscht werden sollte, ist allein abhängig von den Erfahrungswerten der Anlagenhersteller und -betreiber. Indem die Instandsetzungsintervalle variiert werden, kann eine bessere Nutzung des Abnutzungsvorrats erzielt werden. Hierfür sind detailliert beschrieben vergangene Schadensfälle wichtig, da durch sie, zum Beispiel mittels statistischer Untersuchungen, Aussagen über die Länge der Austauschintervalle getroffen werden können. [Ryl-2010, S. 29f.; Bra-2016, S. 6, 23; Aus-2016, S. 2; Paw-2016, S. 175f.]

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile der vorausbestimmten Instandhaltung nach [Müh-2018, S. 354; DIN-13306; Bra-2016, S. 6, 23; Ryl-2010, S. 29f.]

Vorteile vorausbestimmte Instandhaltung	Nachteile vorausbestimmte Instandhaltung
Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit	Keine vollständige Ausschöpfung des Abnutzungsvorrats → Hoher Personal- und Materialaufwand
Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit	Keine Berücksichtigung des tatsächlichen Zustands
Reduzierung der indirekten Instandhaltungskosten	Steigerung der direkten Instandhaltungskosten
Verbesserte Planbarkeit der Instandsetzung hinsichtlich Ablauf, Material und Ressourcen	Steigender Planungs- und Instandhaltungsaufwand

Die **zustandsorientierte Instandhaltung** berücksichtigt den Zustand des Objekts, der sich zum Beispiel über den Abnutzungsvorrat ermitteln lässt. Bei dieser Art der Instandhaltung werden Instandhaltungsmaßnahmen aufgrund von Beurteilung und Analysen des physikalischen Zustands des Objekts durchgeführt. Erst wenn es der Abnutzungsvorrat, wie in Abbildung 2-18 dargestellt, erzwungen, erfolgen Instandhaltungsaktivitäten. Dementsprechend ist eine zustandsorientierte Instandhaltung nur dann realisierbar, wenn es technisch möglich ist die Veränderung des Abnutzungsvorrats zu bestimmen. Die Dauer, die zwischen zwei Instandhaltungen vergeht, ist abhängig von der Entwicklung des Abnutzungsvorrats. Beispielsweise ist bei einem PKW der Reifen austausch bei Erreichen einer Profiltiefe von zwei mm eine zustandsorientierte Instandhaltung. Wann der Reifen die Profiltiefe erreicht, kann der Fahrer immer wieder durch manuelle Messungen überprüfen. Die Dauer zwischen zwei Reifenwechseln ist u.a. abhängig von der gefahrenen Kilometeranzahl. Wird das Auto häufig bewegt, kommt es zu einer schnelleren Ausschöpfung des Abnutzungsvorrats des Reifens, dadurch verkürzt sich das Austauschintervall. [Ryl-2010, S. 30f.; DIN-13306; Eng-2018, S. 3]

Die Beurteilung des Zustands kann kontinuierlich, bei Bedarf oder nach einem Plan erfolgen. Wird bei der zustandsorientierten Instandhaltung der Zustand kontinuierlich überwacht, wird im Allgemeinen von **Condition Monitoring** gesprochen. Die manuelle regelmäßige Inspektion des Objekts durch einen Mitarbeiter stellt die einfachste Variante dar, um den Objektzustand zu ermitteln und zu bewerten. Diese aufwändigen Inspektionen können durch den Einsatz von Condition Monitoring Systemen verringert werden, da diese Systeme automatisch in regelmäßigen Abständen oder kontinuierlich den Zustand prüfen. Die Zustandsaufnahme erfolgt dabei durch Sensoren, die am Überwachungsobjekt festinstalliert sind und Daten, wie zum Beispiel Beschleunigungen oder Temperatur aufzeichnen. Abhängig vom überwachten Bauteil können aus den Daten bauteilspezifische Kennwerte gebildet werden. Der Zustand kann durch die Veränderung der Kennwerte analysiert werden. Um eine Veränderung in den Kenngrößen zu erkennen, kann zum Beispiel eine Grenzwertüberwachung, wie schematisch in Abbildung 2-20 dargestellt, eingesetzt werden. Bevor die Zustandsbewertung möglich ist, müssen in einem ersten Schritt Referenzwerte, die unterschiedliche Betriebszustände oder Fehlergrößen widerspiegeln, bestimmt werden. Die Referenzwerte können beispielsweise während eines Testbetriebs aufgenommen werden oder sind bereits vom Anlagenhersteller vorgegeben. Aus diesen Referenzwerten lassen sich dann abhängig vom Überwachungsobjekt Grenzwerte ableiten. Werden die Grenzwerte von den dann aufgenommenen Messgrößen über- bzw. unterschritten, liegt eine Abweichung vom Normalzustand und somit eine Schädigung des Objekts vor. Die Zustandsbewertung zielt darauf ab, eine Komponente so lange wie möglich betreiben zu können, sodass der der Abnutzungsvorrat maximal ausgenutzt wird und gleichzeitig

Ausfälle zu vermeiden. [DIN-13306; Aus-2016, S. 2; Ryl-2010, S. 31; Paw-2016, S. 163, 168f., 175; Müh-2018, S. 354]

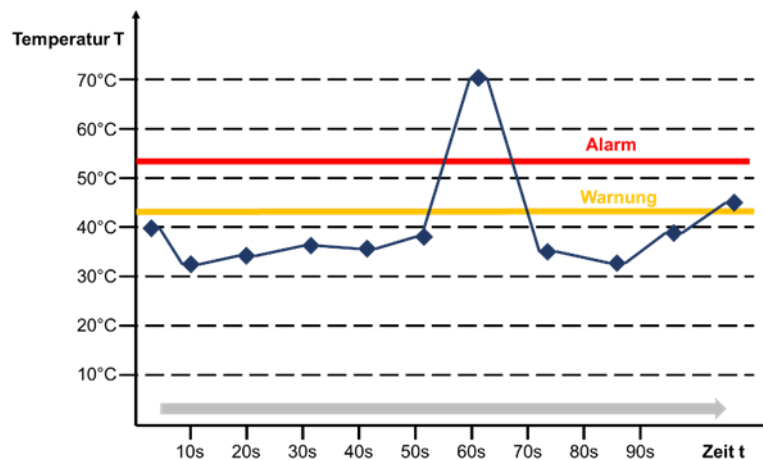


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung einer Grenzwertüberwachung [Paw-2016, S. 169]

Durch die Zustandsüberwachung ermöglicht die zustandsbasierte Instandhaltung eine sehr gute Ausschöpfung des Abnutzungsvorrats. Außerdem ist das Ausfallrisiko gering und es treten keine Folgeschäden auf. Zugleich weist sie die geringste Ausfallzeit im Vergleich zur vorausbestimmten und korrektiven Instandhaltung auf. Da Schäden frühzeitig erkannt werden können, ist es möglich die Instandhaltungsmaßnahmen zu einem für das Unternehmen günstigen Zeitpunkt anzusetzen. Außerdem können Instandhaltungsaktivitäten gut vorbereitet werden, die somit eine schnelle und kostenoptimierte Instandhaltung gewähren. Die zustandsorientierte Instandhaltung ist zudem im Vergleich zur vorausbestimmten Instandhaltung ressourceneffizienter, da ein Bauteilwechsel nur bei tatsächlichem Bedarf durchgeführt wird. Jedoch verlangt der Einsatz von zustandsorientierter Instandhaltung höhere Qualifikationsanforderungen an das Instandhaltungspersonal. Auch der Inspektions-, Überwachungs- und Investitionsaufwand ist hoch. [Ryl-2010, S. 30f.; Müh-2018, S. 354; Bra-2016, S. 23; Aus-2016, S. 2]

Nach Braun et al. ist für Betreiber u.a. die erhöhte Anlagenverfügbarkeit, die durch die zustandsbasierte Instandhaltung ermöglicht wird, attraktiv. Aber auch für Hersteller lohnt sich hinsichtlich der Prüfung möglicher Gewährleistungsansprüche die Zustandsüberwachung von Anlagen. Kommt es zu Schädigungen von Bauteilen im Betrieb, unter der Voraussetzung, dass die Bauteile nicht über ihrer Spezifikation betrieben worden sind, entstehen Gewährleistungsansprüche an den Hersteller. Belastungen, die auf die Bauteile wirken, werden bei der Zustandsüberwachung gemessen und dokumentiert. Eine mögliche Fehlnutzung seitens des Betreibers kann somit nachgewiesen und ein gestellter Gewährleistungsanspruch zurückgewiesen werden. Die

Zustandsüberwachung kann auch zur Bauteilverbesserung beitragen, da Bauteile durch die Kenntnis der im Betrieb wirkenden Beanspruchungen und Belastungen besser dimensioniert und besser auf ihre Betriebsanforderungen angepasst werden können. Dies führt zu einer Steigerung der Systemleistung und einer Reduktion von Material und Materialkosten. Zudem fördert die Zustandsüberwachung den wirtschaftlichen Einsatz von modernen Faserverbundwerkstoffen in der Intralogistik, da eine Verwendung dieser Werkstoffe nur möglich ist, wenn die tatsächlich wirkenden Belastungen bekannt sind. Moderne Faserverbundwerkstoffe verfügen über eine sehr gute Dämpfungseigenschaft und können zu einer Minimierung der Masse beitragen. Diese Eigenschaften machen sie besonders für den Einsatz in Unstetigförderern attraktiv. [Bra-2016, S. 7f.]

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der zustandsbasierten Instandhaltung nach [Ryl-2010, S. 30f.; Müh-2018, S. 354; Bra-2016, S. 7f., 23; Aus-2016, S. 2]

Vorteile zustandsorientierte Instandhaltung	Nachteile zustandsorientierte Instandhaltung
Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit	Hoher Inspektions-, Überwachungs- und Investitionsaufwand
Niedriges Ausfallrisiko	Hohe Qualifikationsanforderungen an das Instandhaltungspersonal
Geringste Ausfallzeit	
Berücksichtigung des tatsächlichen Objektzustands → Sehr gute Ausschöpfung des Ausnutzungsvorrats	
Frühzeitige Erkennung von Schäden → Zeitpunkt für Instandhaltung ausrichtbar am Logistikprozess	
Gute Planbarkeit von Instandhaltungsaktivitäten → schnelle, ressourceneffiziente und kostenoptimierte Instandhaltung	
Keine auftretenden Folgeschäden	
Unterstützt Hersteller bei der Prüfung von Gewährleistungsansprüche	
Fördert Bauteilverbesserungen	
Fördert den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Intralogistik	

2.4.3 Predictive Maintenance als Instandhaltungsart der Industrie 4.0

Die zustandsorientierte Instandhaltung kann, wie Abbildung 2-19 zeigt, weiter untergliedert werden in eine **voraussagende Instandhaltung** und eine **nichtvoraussagende Instandhaltung**. Nach DIN-13306 wird von einer voraussagenden Instandhaltung gesprochen, wenn das Fortschreiten des Abbaus durch eine Prognose vorausgesagt werden kann. Die Prognose basiert auf wiederholten Analysen des physikalischen Zustands des Objekts, auf bekannten Eigenschaften und wichtigen Parametern, die den Abbau des Objekts charakterisieren. Die voraussagende Instandhaltung ist auch unter ihrer englischen Übersetzung, **Predictive Maintenance**, bekannt. Predictive Maintenance ist ein neuer Instandhaltungsansatz der Industrie 4.0. Dieser wird als eine der Schlüsselinnovationen der Industrie 4.0 bezeichnet. [Fel-2017, S. 3; DIN-13306; Gro-2018, S. 1]

Wie in Abbildung 2-19 zu erkennen ist, ist Predictive Maintenance eine Weiterentwicklung der zustandsorientierten Instandhaltung. Dabei basiert Predictive Maintenance auf Condition Monitoring. Durch Condition Monitoring werden Informationen über den Zustand eines überwachten Objekts bereits in Echtzeit erfasst. Auf dieser Grundlage kann der Zustand des Objekt bewertet und entschieden werden, ob eine Instandhaltungsmaßnahme benötigt wird. Durch Predictive Maintenance können nicht nur Aussagen über den aktuellen Zustand getroffen, sondern vielmehr **Prognosen über den zukünftigen Zustand des Objekts** hinsichtlich Ausfall und Verschleiß gegeben werden. Es kann somit eine Prognose über die Rest-Lebensdauer von überwachten Objekten ausgesprochen werden. So können durch Predictive Maintenance die Risiken von ungewollten Betriebszuständen eingeschätzt werden. Möglich ist Predictive Maintenance durch den Einsatz von ausgereifter Sensorik, leistungsstarken Kommunikationsnetzwerken und leistungsfähigen Computing Plattformen. Auf den Computing Plattformen arbeiten stochastische Algorithmen, die aufgenommene Messdaten mit Fehlerbildern abgleichen. Durch dieses System sind eine Identifizierung und Bewertung von Mustern in den Messdaten möglich. Erst durch die Erkennung und Bewertung von Mustern kann eine genaue Prognose der Lebensdauer von Komponenten berechnet werden. Ein Ausfall einer Maschine kann zum Beispiel dadurch erkannt werden, in dem der Algorithmus in den Betriebsdaten der Maschine die Muster identifiziert, die sich vor einem Ausfall typischerweise einstellen. [Wie-2019, S. 402; Fel-2017, S. 3; Fra-o.J.; Gom-2019, S. 1619; DIN-13306]

Im Zusammenhang der Mustererkennung in Datensätzen wird oft über **maschinelles Lernen** gesprochen. Die Klassifikation von Daten, automatisch und ohne Mithilfe durch den Menschen, ist ein zentraler Bestandteil von maschinellem Lernen. Für den Erfolg von maschinellem Lernen müssen hinreichende Datenmengen in hoher Qualität vorhanden sein. [Wie-2019, S. 402]

Nach Frochte gibt es beim maschinellen Lernen folgende drei Typen von Algorithmen [Fro-2019, S. 20]:

- Überwachtes Lernen,
- Beschränktes Lernen,
- Unüberwachtes Lernen.

Alle drei Arten der Algorithmen basieren darauf, dass eine mathematische Funktion f

$$f: X \rightarrow Y \quad (2-3)$$

mit den sich unterscheidenden Mengen X und Y konstruiert bzw. gelernt werden soll [Fro-2019, S. 20].

Beim **überwachten Lernen** besitzt der Algorithmus eine Sammlung von Zielwerten. Das bedeutet, der Algorithmus verfügt über eine genügend große Menge an Ein- und Ausgaben, denen bereits korrekte Funktionswerte durch den Menschen zugewiesen wurden. Die Datensätze, die durch den Menschen aufbereitet werden, werden gelabelte Datensätze genannt. Frochte gibt für das überwachte Lernen folgendes, einfaches Beispiel: Es existieren Bilder, auf denen entweder ein Hund oder eine Katze abgebildet sind. Dem System wird für jedes Bild mitgeteilt, ob eine Katze oder ein Hund auf dem Bild dargestellt ist. Dadurch lernt das System die Bilder zu unterscheiden. Kommen nun unbekannte Bilder, kann das System im Idealfall durch das vorherige Training erkennen, ob ein Hund oder eine Katze darauf zu sehen ist. Dieses Beispiel kann auch auf die Erkennung von Maschinenschäden übertragen werden. Abbildung 2-21 zeigt, dass für das Training der Algorithmen unterschiedliche Datensätze von Betriebszuständen (BZ) existieren. Es ist bekannt, welcher Betriebszustand zu welchem Schaden, zum Beispiel Schaden 1, gehört. Beim Training der Algorithmen wird dem System mitgeteilt, welcher Datensatz welchen Schaden bzw. Gutklasse widerspiegelt. Das System lernt die unterschiedlichen Muster, die charakteristisch für jeden Schaden sind. Durch dieses Wissen ist es dem Algorithmus möglich, kommende Datensätze richtig einzuordnen. Aufgrund der Aufarbeitung der Daten für das Training ist das überwachte Lernen kostenintensiv. [Fro-2019, S. 20, 24]

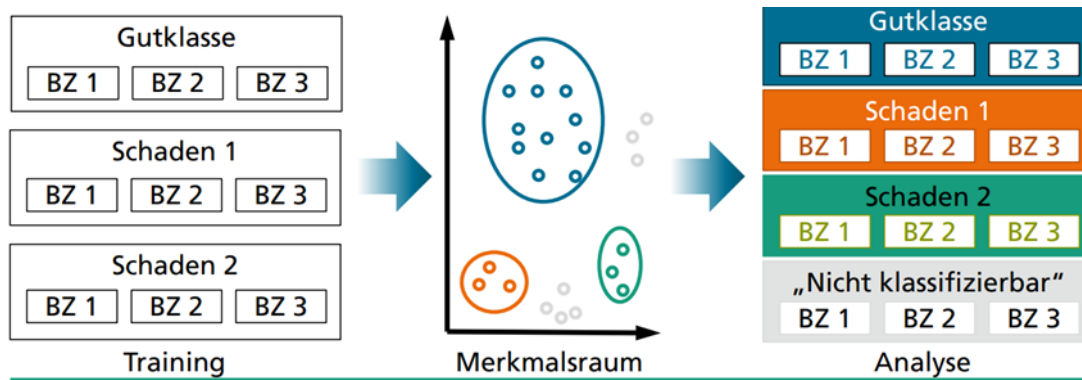


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der Funktionsweise von überwachtem Lernen [Eng-2018, S. 7]

In manchen Fällen ist es möglich, dass Datensätze nicht gelabelt werden können. Sind jedoch die Anforderungen an den Ausgang, zum Beispiel ein bestimmtes Systemverhalten bekannt, so kann das **beschränkte Lernen** eingesetzt werden. Der gewünschte Ausgang, zum Beispiel das gewünschte Systemverhalten kann erlernt werden, indem die Ergebnisse des Ausgangs, zum Beispiel die Ergebnisse des Systemverhaltens, während des Trainings nach positiv und negativ beurteilt werden. [Fro-2019, S. 23f.]

Das **unüberwachte Lernen** wird verwendet, wenn in nicht gelabelten Datensätzen gemeinsame Strukturen ermittelt werden sollen, die zu Beginn des Lernens noch unbekannt sind. Während beim überwachten Lernen der Algorithmus zum Beispiel trainiert wird, die ihm gegebenen Bilder von Vögeln, Hunden und Affen nach Tierarten zu klassifizieren, würde der Algorithmus beim unüberwachten Lernen nach gemeinsamen Merkmalen der Tiere suchen. Ein solches Merkmal wäre zum Beispiel, kann nicht fliegen. [Fro-2019, S. 24f.]

Bei der Frage nach der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von maschinellem Lernen für ein Unternehmen sind die Verhältnisse folgender Kosten zueinander entscheidend [Wie-2019, S. 402]:

- Kosten, die anfallen, wenn ein Schadensfall nicht erkannt wird,
- Kosten, die für die Reparatur des Schadenfalls entstehen,
- Kosten, die aufgewendet werden müssen für die Generierung, Erfassung und Analyse der Daten.

Im Jahr 2017 wurden 153 deutsche Maschinenbau-Unternehmen in einer Studie durchgeführt von Roland Berger, dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und der Deutschen Messe, zu Predictive Maintenance befragt. Hinsichtlich des Nutzens von Predictive Maintenance für ihre Kunden gaben 79% der befragten Unternehmen an, dass der **Vorteil von Predictive Maintenance** für ihre Kunden in

der Leistungssteigerung zu sehen ist. Wie in Abbildung 2-22 zu sehen ist, entsteht die Leistungssteigerung nach Meinung der Unternehmen bei Predictive Maintenance durch eine Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit (33%), durch eine Erhöhung der Produkt- bzw. Prozessqualität (18%), durch eine Erhöhung der Anlagenlebensdauer (11%), sowie durch eine Verbesserung der Planung von Servicezyklen (12%), als auch durch die Erhöhung der Betriebssicherheit und Nachhaltigkeit (5%). Nur 21% der Unternehmen gaben dagegen an, dass durch Predictive Maintenance Kosten gesenkt werden können. Dabei denken 15% der Unternehmen, dass durch Predictive Maintenance Reparatur- und Ersatzteilkosten minimiert werden können. Bei den Antworten war eine Mehrfachnennung möglich. [Fel-2017, S. 3,5,7]

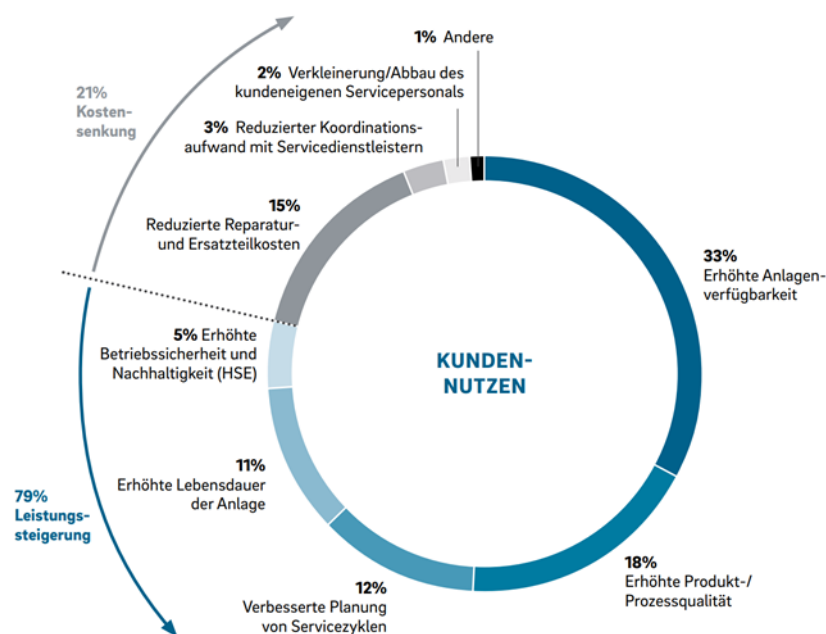


Abbildung 2-22: Nutzen von Predictive Maintenance für Kunden von deutschen Maschinenbau-Unternehmen [Fel-2017, S. 7]

Nach dem Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik führen Predictive Maintenance Maßnahmen idealerweise zu einer Maximierung der Verfügbarkeit und zu einer Bereitstellung an Informationen für zielgerichtete Instandhaltungsmaßnahmen bereits zu einem frühen Zeitpunkt [Fra-o.J.].

Nach Meinung der Unternehmen sind die technischen Voraussetzungen zur Realisierung von Predictive Maintenance größtenteils vorhanden. Um die Qualität von Predictive Maintenance zu verfeinern, müssen die Analysefähigkeiten und die Kompetenz in der Mustererkennung von Datensätze vergrößert und verbessert werden. Durch Realisierung dieser Ziele ist es auch möglich, die Prognosen und die damit entstehende Entscheidungsunterstützung von der Maschinen- auf Systemebene hinsichtlich einer vernetzten Produktion auszubauen. Der Ausbau der Analysefähigkeit und die

Vertiefung der Kompetenz in der Mustererkennung werden von den Unternehmen vor allem als **Herausforderung** im Bereich von Predictive Maintenance genannt. [Fel-2017, S. 10]

2.4.4 Instandhaltung in der Intralogistik und bei Regalbediengeräten

Im Kapitel 2.4.1 wurden bereits die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit definiert. Die dort beschriebene Verfügbarkeit wird auch technische Verfügbarkeit oder störungszeitbasierte Verfügbarkeit genannt, da die Verfügbarkeit, wie in Formel 2-2 gezeigt, berechnet wird, indem das Verhältnis von MTBF zur gesamten Einschaltzeit gebildet wird. Erhöht sich dabei die Störungszeit d.h. die MDT, reduziert sich die Verfügbarkeit. Diese Art der Verfügbarkeitsberechnung ist für moderne und insbesondere für Großanlagen oder Anlagen mit einem hohen Vernetzungsgrad nicht mehr angemessen. Ein Grund dafür ist, dass die Störungsstruktur, beispielsweise ob viele kurze Störungen oder nur wenig lange Störungen auftreten, nicht beachtet wird. Zudem werden Auftragsstrukturen und ihre Auswirkungen nicht bei der Verfügbarkeitsberechnung miteinbezogen. Des Weiteren werden bei der Berechnung der technischen Verfügbarkeit nur Ausfälle berücksichtigt, die aufgrund von technischen Defekten entstehen. Diese Ausfälle decken im Vergleich zu den Gesamtausfällen nur einen geringen Teil ab. Befindet sich etwa eine gelöste Abdeckfolie im Sichtbereich eines Sensors, der daraufhin den Vorgang abbricht, wird dieser Ausfall nicht in der technischen Verfügbarkeit berücksichtigt, da der Sensor keinen technischen Defekt aufweist. Daher wurde in der Logistik neben der störungszeitbasierten Verfügbarkeit, die **Leistungsverfügbarkeit** eingeführt. Sie beschreibt die tatsächliche Anlagennutzbarkeit und gibt an, in welchem Umfang ein zwischen Hersteller und Anwender vereinbarter Prozess unter vereinbarten Rahmenbedingungen die Prozessanforderungen erfüllt und in welchem Grad dieser Prozess termingerecht abläuft. Die Leistungsverfügbarkeit berechnet Puffer, Redundanzen und Leistungsreserven mit ein. Diese Systemeigenschaften beeinflussen stark wie sich Störungen einzelner Komponenten auf die Leistungsfähigkeit des Systems auswirken. [VDI-4486; Ebe-2014, S. 69]

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Zuverlässigkeit und die technische Verfügbarkeit von Regalbediengeräten bestimmt werden kann. Des Weiteren wird auf die Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit in der Intralogistik eingegangen.

Die **Zuverlässigkeit und technische Verfügbarkeit eines Regalbediengeräts** in einem Hochregallager kann durch den in Norm FEM-9.221 beschriebenen Leistungstest bestimmt werden. Ziel ist es, Aussagen über die Umschlagsleistung eines Regalbediengeräts treffen zu können. Eine hohe Umschlagsleistung wird u.a. durch eine hohe technische Verfügbarkeit erreicht, da somit eine hohe Summe an Ein- und/oder

Auslagerungen pro Zeiteinheit möglich ist. Die Ermittlung der Zuverlässigkeit und der technischen Verfügbarkeit durch einen Leistungstest ist dann notwendig, wenn eine zwischen Hersteller und Betreiber vertraglich vereinbarte Umschlagsleistung überprüft werden soll. Dies ist zum Beispiel nach der Inbetriebnahme des Regalbediengeräts erforderlich. Wird die Umschlagsleistung nach FEM-9.221 überprüft, müssen Ausfallzeiten und Störungen nach Verantwortungsbereichen unterschieden werden. Dadurch ist gewährleistet, dass der Betreiber die vereinbarte Leistung erhält, dem Hersteller jedoch keine Störungen und Ausfallzeiten zugeschrieben werden, für die er nicht verantwortlich sein kann. [FEM-9.221]

Laut FEM-9.221 kann die Ausfallzeit in folgende Zeiten untergliedert werden [FEM-9.221]:

- t_1 = Zeitspanne, beginnend mit dem Anhalten des Geräts und endend mit dem Beginn der Störungssuche durch das verantwortliche Personal,
- t_2 = Zeitspanne, die zur Ermittlung des Störungsgrundes nötig ist,
- t_3 = Zeitspanne, die zur Störungsbehebung nötig ist, bis das Systemelement wieder betriebsbereit ist.

Wird bei einem Regalbediengerät ein Leistungstest zur Bestimmung der Zuverlässigkeit und technischen Verfügbarkeit durchgeführt, müssen vom Betreiber die folgenden Punkte in einem Protokoll vermerkt werden [FEM-9.221]:

- Beginn und Ende des Betriebs mit Betriebspausen,
- Anzahl der korrekt ausgeführten Spiele η_r ,
- Anzahl der nicht korrekt ausgeführten Spiele η_f .

Zusätzlich müssen für jede Störung, die während des Leistungstests auftritt, folgende Daten festgehalten werden [FEM-9.221]:

- Datum / Uhrzeit, bei der die Störung aufgetreten ist (A) und Störungsart,
- Datum / Uhrzeit, bei der die Störungssuche durch das verantwortliche Personal begonnen wurde (B) und ermittelte Ursache der Störung,
- Datum / Uhrzeit, bei der die Behebung der Störung begonnen wurde (C) und die Maßnahmen, die zur Störungsbehebung getroffen wurden,
- Datum / Uhrzeit, bei der die Betriebsbereitschaft wiederhergestellt ist (D).

Aus diesen Daten können nachfolgend für jede Störung die oben beschriebenen Teilzeiten t_1 , t_2 , t_3 wie folgt ermittelt werden [FEM-9.221]:

$$t_1 = B - A \quad (2-4)$$

$$t_2 = C - B \quad (2-5)$$

$$t_3 = D - C \quad (2-6)$$

Die gesamte Ausfallzeit T_{Aus} des Regalbediengeräts während des Leistungstests ergibt sich aus der Formel [FEM-9.221]:

$$T_{Aus} = \sum_{i=1}^n (t_1 + t_2 + t_3)_i \quad (2-7)$$

Bei der Durchführung des Leistungstests ist darauf zu achten, dass die anzufahrenden Lagerpunkte gleichmäßig über das gesamte Lager verteilt sind. Des Weiteren sollen die Gerätebeanspruchungen hinsichtlich Häufigkeit und einzulagernden Lasten angemessen sein. Das bedeutet, Stressprogramme, wie sie Stoßzeiten oder die Füllung eines Lagers darstellen, sind bei der Durchführung eines Leistungstests zu vermeiden. Die einzulagernden Lasten müssen dem Lastkollektiv entsprechen, welches bei der Auslegung des Regalbediengeräts nach FEM-9.512 bestimmt wurde. [FEM-9.221]

Durch die im Leistungstest aufgenommenen Betriebsdaten können die Zuverlässigkeit und die technische Verfügbarkeit des Regalbediengeräts, wie folgt ermittelt werden.

Die Zuverlässigkeit η_n ergibt sich durch den Quotienten

$$\eta_n = \frac{n_r}{n_r + \eta_f} \quad (2-8)$$

mit n_r für die Anzahl der korrekt ausgeführten Spiele und η_f für die Anzahl der nicht korrekt ausgeführten Spiele [FEM-9.221].

Die technische Verfügbarkeit ist durch die Formel 2-2 gegeben [Ebe-2014, S. 69]. Für die Formel 2-2 wird die MTBF und die MDT benötigt. Diese werden aus den Betriebsdaten des Leistungstests, wie folgt bestimmt [FEM-9.221; Ebe-2014, S. 68]:

$$MTBF = \frac{T - T_{Aus}}{n_{Aus}} \quad (2-9)$$

$$MDT = \frac{T_{Aus}}{n_{Aus}} \quad (2-10)$$

mit T für die gesamte Einschaltzeit, n_{Aus} für die Gesamtanzahl an Störungen und T_{Aus} für die in Formel 2-7 ermittelte gesamte Ausfallzeit.

Soll die Verfügbarkeit einer Anlage mit mehreren Regalbediengeräten bestimmt werden, müssen andere Formeln für die Verfügbarkeitsberechnung angewandt werden. Diese sind ebenfalls in FEM-9.221 enthalten und sollen an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Es ist zu erwähnen, dass bei der Verfügbarkeitsbestimmung von Anlagen mit mehreren Regalbediengeräten die Komplexität der Rechnung steigt, da eine große Anzahl von Randbedingungen bekannt sein und berücksichtigt werden müssen. [FEM-9.221]

Nach DIN-13306 ist die technische Verfügbarkeit eines Objekts dann gegeben, wenn ein Objekt fähig ist, sich bei Erfordernis in einem Zustands zu befinden, in dem es eine geforderte Funktion ausführen kann [DIN-13306].

Bei der **Leistungsverfügbarkeit** ergibt sich die geforderte Funktion aus den Geschäftszielen des Anlagenbetreibers. Daher werden bei der Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit als erstes Geschäftsziele ausgewählt, die von der intralogistischen Anlage abhängig sind. Solche Geschäftsziele können die Auslastung von Werkern oder die Laufzeit von Gepäckstücken sein. Aus den Geschäftszielen werden im zweiten Schritt Prozesse abgeleitet, an denen die Verfügbarkeit ermittelt wird. Für jeden Prozess werden Rahmenbedingungen zum Beispiel die Instandhaltungsstrategie definiert. [VDI-4486]

Dementsprechend kann die Leistungsverfügbarkeit nur dann berechnet werden, wenn die Geschäftsprozesse formulierbar und Kenngrößen, die die Geschäftsprozesse beschreiben, ermittelbar sind. Außerdem kann die Leistungsverfügbarkeit nicht für einzelne Maschinen ermittelt werden, sondern es müssen Gesamtanlagen betrachtet werden, die Stückgut fördern. Die Leistungsverfügbarkeit der Prozesse kann auf Basis von Wartezeiten oder auf Basis von Laufzeiten berechnet werden. [VDI-4486]

Die Leistungsverfügbarkeit η_W auf Basis der Wartezeiten ist gegeben durch folgenden Quotienten

$$\eta_W = \frac{T_B - T_W}{T_B} \quad (2-11)$$

mit T_B für die Gesamtdauer des Beobachtungsintervalls und T_W für die aufsummierte Wartezeit [VDI-4486]. Diese Methodik wird bei Prozessen angewendet, bei denen durch Wartezeiten ein Rückgang an Verfügbarkeit festzustellen ist. Ein solcher Prozess ist zum Beispiel die Kommissionierung, bei der eine Anlage einen Kommissionierer mit Paletten in einer Taktzeit von 50s versorgt. Die Auslastung der Kommissionierer ist entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage. Ein Kommissionierer ist ausgelastet, wenn eine auftragsgerechte Ver- und Entsorgung von Paletten durch die Anlage ohne Unterbrechung möglich ist. Die Verfügbarkeit des Kommissionierers ist nicht gegeben, während er auf die nachfolgende Palette warten muss. Die Wartezeiten, bis er mit einer neuen Palette versorgt wird, werden während des Beobachtungszeitraums notiert und ergeben zusammengefasst T_W . Dabei beginnt die Wartezeit erst, wenn 50s nach der letzten Quittierung einer Palette vergangen sind und noch keine neue Palette vorhanden ist. [VDI-4486]

Die Leistungsverfügbarkeit η_L auf Basis der Laufzeit während eines Beobachtungsintervalls lässt sich bestimmen durch das Verhältnis von

$$\eta_L = \frac{N - n}{N} \quad (2-12)$$

wobei n für die Anzahl an nicht pünktlichen Ladeeinheiten und N für die planmäßige Anzahl an Ladeeinheiten steht [VDI-4486]. Diese Bestimmungsart der Leistungsverfügbarkeit wird bei Prozessen herangezogen, bei denen sich die fehlende Verfügbarkeit in den nicht pünktlichen Ladeeinheiten widerspiegelt. Ein Beispiel für einen solchen Prozess sind Gepäckstücke am Flughafen, die nach der Sicherheitsprüfung innerhalb einer definierten Laufzeit zum Flieger zu befördern sind. Kommt ein Gepäckstück erst nach Schließung des Fluges an, muss geprüft werden, ob es rechtzeitig der Förderstrecke übergeben wurde und die dem Gepäckstück zustehende Laufzeit ausnutzen konnte. Ist dies der Fall, geht das Gepäckstück als nicht pünktlich in die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit η_L ein. [VDI-4486]

Die Verfügbarkeit von intralogistischen Anlagen ist für Betreiber sehr wichtig. Kommt es zu einem Ausfall des Intralogistiksystems, kann der Produktionsprozess oder Teile des Produktionsprozesses zum Erliegen kommen. Nach Braun et al. waren im Jahr

2016 die korrektive und die vorausbestimmte Instandhaltung die dominierenden Instandhaltungsarten in der Intralogistik. Diese Instandhaltungsarten genügen laut Braun et. al. der Forderung einer erhöhten Verfügbarkeit nicht mehr. Des Weiteren wurden in der Intralogistik für nur wenige Anwendungsfälle Zustandsüberwachungssysteme eingesetzt. [Bra-2016, S. 1, 6]

Nach Große et. al. war im Jahr 2018 hinsichtlich der Instandhaltungsart von Regalbediengeräten eine zeitbasierte, d.h. die vorausbestimmte Instandhaltung, Stand der Technik. Hinsichtlich Predictive Maintenance sind in der Intralogistik nur wenige Prototypen bekannt. Vor allem erhöht sich bei Regalbediengeräten durch die zweckbedingte Bewegung des Regalbediengeräts die Komplexität der Messung und Auswertung. Im Kontext der Industrie 4.0 sollen Förderer in Zukunft fähig sein selbstständig zu erkennen, ob ihre Verschleißgrenze überschritten wurde und angemessene Instandhaltungsmaßnahmen fordern. [Gro-2018, S. 1, 4]

Ein erster Lösungsansatz in diese Richtung wurde im Jahr 2018 durch die SSI Schäfer GmbH in Zusammenarbeit mit der Schaeffler AG geschaffen. In einem Distributionszentrum wurden Antriebsmotoren von Paletten-Regalbediengeräten mit Condition Monitoring Systemen der Firma Schaeffler ausgestattet. Die Analysesoftware der Condition Monitoring Systeme ermittelt durch Schwingungsanalyse und Auswertung der Temperaturläufe frühzeitig Lagerschäden, Verschleiß, Unwuchten, Ausrichtungsfehler und nicht zuordenbare Anomalien. Über eine zentrale Informationsplattform kann auf die Daten der Condition Monitoring Systeme und die generierten Alarmmeldungen bei Alarmschellenüberschreitung zugegriffen werden. Durch die frühzeitige Erkennung von Motorschäden können die betreffenden Motoren rechtzeitig durch Instandhalter begutachtet werden, die nach ihrer Inspektion entscheiden, wie schnell eine Instandsetzung erfolgen muss. [Kri-2018, S. 36f.]

Auch die durchgeführte Fallstudie bei der Wander AG zeigt, dass bei der Instandhaltung von Regalbediengeräten die zustandsorientierte Instandhaltung bzw. Condition Monitoring angekommen ist. Für ein gangwechselndes Regalbediengerät wurde eine Zustandsüberwachung für die Schraubverbindung realisiert, die sich an der Halterung der Führungsrollen befinden und durch den Gangwechsel starken mechanischen Beanspruchungen unterliegt. Für die Zustandsüberwachung wurde ein Dehntrafo eingesetzt, dessen Messsignal sich verändert, wenn sich die Schraubverbindung löst. Des Weiteren werden die Wälzlager des Antriebskopfes durch einen kabelgebunden triaxialen Beschleunigungssensor zustandsüberwacht. [Kum-o. J.]

2.5 Ausfallursachen von Regalbediengeräten

Im folgenden Kapitel werden typische Ursachen beschrieben, die für Ausfälle und Verschleißerscheinungen von Regalbediengeräten verantwortlich und in der Literatur bekannt sind. Dabei wird jeweils die Ausfallursache und im Anschluss daran, wenn bekannt, die Detektionsmöglichkeit bzw. die Gegenmaßnahme zur Behebung der Ausfallursache aufgezeigt.

Die in den nächsten sechs Unterkapiteln dargestellten Erkenntnisse sind die Ergebnisse von Grundlagenforschung zur Zustandsüberwachung von Regalbediengeräten. Es wird deshalb nicht nur die Ausfallursache und die Gegenmaßnahme genannt, sondern auch gezeigt, wie bei der Forschung vorgegangen wurde, um die Ausfallursachen zu detektieren.

2.5.1 Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene

Nach Braun et. al. kann ein Führungsspiel quer zur Fahrtrichtung eines Regalbediengeräts sowohl zwischen der unteren Fahrschiene und den unteren Führungsrollen wie auch zwischen der oberen Führungsschiene und den oberen Führungsrollen entstehen. Die Häufigkeit, wie oft sich Schiene und Führungsrolle berühren, wirkt sich erheblich auf die Dynamik zwischen der Schiene und des Regalbediengeräts aus. Ein Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen orthogonal zur Bewegungsrichtung des Regalbediengeräts kann im schlimmsten Fall zu einer Entgleisung des Geräts führen. [Bra-2016, S. 46, 48]

Werden bei einem Regalbediengerät Führungsrollen aus Stahl eingesetzt, ist ein bestimmtes Spiel bis zu einem definierten Grenzwert notwendig, um einen problemlosen Betrieb zu gewährleisten. Der Grund dafür liegt u.a. in der Unregelmäßigkeit der Führungsrollen hinsichtlich ihrer Rundheit, der Rauheit der Schiene und der für die Schiene geltenden Toleranzen, hinsichtlich Form und Lage. Werden hingegen Führungsrollen mit einer Beschichtung aus dem Werkstoff Vulkollan eingesetzt, so dürfen diese beim Betrieb des Regalbediengeräts kein Spiel aufweisen. Durch die Beschichtung verfügen die Rollen über eine geringere Steifigkeit als Stahlrollen. Aufgrund der geringeren Steifigkeit können Unebenheiten, wie sie zum Beispiel durch die Toleranzen der Schiene entstehen, ausgeglichen werden. Ob ein Spiel der Führungsrollen quer zur Bewegungsrichtung vorliegt, wird laut Braun et. al. im Jahr 2016 durch Wartungspersonal in regelmäßigen Zeitintervallen überprüft. [Bra-2016, S. 46]

Ein Ansatz zur **Detektion dieses Schadens** ist die Häufigkeitsverteilung von Beschleunigungen senkrecht zur Fahrtrichtung zu ermitteln und zu analysieren. Dafür

wurden an einem Paar der unteren Führungsrollen eines Regalbediengeräts unterschiedliche Abstände zwischen Rolle und Fahrschiene eingestellt und Messdaten aufgenommen, während das Regalbediengerät eine festgesetzte Reihenfolge an Umsortierungen, Ein- und Auslagerungen für jeden Abstand wiederholend abarbeitete. Nach Braun et. al. sind zur Detektion dieses Schadens quer zur Fahrtrichtung Wechselstrom Beschleunigungssensoren und gegebenenfalls in Fahrtrichtung Gleichstrom Beschleunigungssensoren notwendig. Auch eine Drehzahl- und Drehrichtungserfassung, die zum Beispiel optisch, induktiv oder kapazitiv realisiert sein kann, kann nötig sein. [Bra-2016, S. 28, 32]

Nach den Messungen wurde der Fahrwerkskopf mit Spiel durch ein mechanisches Modell beschrieben und ein Simulationsmodell in Matlab/Simulink entwickelt, welches das fehlerfreie und fehlerbehaftete Verhalten des Systems berücksichtigt. Es konnte bei der Modellbildung gezeigt werden, dass eine Änderung des Spiels durch eine Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bewegung quer zur Bewegungsrichtung darstellbar ist. [Bra-2016, S. 46f.]

Die Wahrscheinlichkeitsdichte, die im Normalzustand des Regalbediengeräts ermittelt wird, stellt hierbei die Referenz-Wahrscheinlichkeitsdichte dar. Kommt es zu einem Führungsspiel quer zur Fahrtrichtung, ändert sich die Wahrscheinlichkeitsdichte der Beschleunigung, da weniger Kraft durch die Führungsrollen in den Antriebskopf übertragen werden kann. Wird diese Wahrscheinlichkeitsdichte mit der Referenz-Wahrscheinlichkeitsdichte verglichen, kann ein Spiel der Führungsrollen quer zur Bewegungsrichtung detektiert werden. In Abbildung 2-23 sind die Wahrscheinlichkeitsdichte der Beschleunigungsamplitude für den Normalzustand in blau und die Wahrscheinlichkeitsdichte der Beschleunigungsamplitude für den Schadensfall eines Spiels von 1,0 mm in rot eingezeichnet. Eine Differenz zwischen roter und blauer Linie ist zu erkennen. [Bra-2016, S. 48]

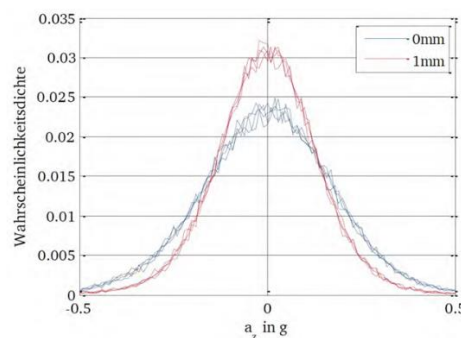


Abbildung 2-23: Wahrscheinlichkeitsdichten der Beschleunigungsamplituden senkrecht zur Fahrtrichtung bei einem Führungsspiel von 0 mm (blau) und einem Führungsspiel von 1 mm (rot) [Bra-2016, S. 48]

2.5.2 Spiel einer Teleskopgabel in Bewegungsrichtung

Ein weiterer von Braun et al. untersuchter Fehler eines Regalbediengeräts ist das Spiel einer doppeltiefen Teleskopgabel in Bewegungsrichtung [Bra-2016, S. 29].

Eine doppeltiefe Teleskopgabel verfügt über drei sich bewegende Stangen. Werden zwei der drei Stangen vollständig ausgefahren, wird von einfachtiefer Betriebsart gesprochen. Sind alle drei Stangen vollständig ausgefahren, kann die Teleskopgabel im doppeltiefen Betrieb eingesetzt werden. Zur Ausführung der Bewegung besitzt die erste und die zweite Stange Zahnstangen. Die erste Stange kann bewegt werden, indem Zahnräder mit der Zahnstange der ersten Stange kämmen. In der ersten Stange befindet sich zudem eine Kette, die zum Ausfahren der zweiten Stange benötigt wird. Die Zahnstange der zweiten Stange ist mit dieser Kette verzahnt. Die Kette wird direkt von kleineren Zahnrädern angetrieben. Durch die zwei getrennten Antriebe können beide Stangen unabhängig voneinander ausgefahren werden. Das bedeutet, dass die zweite Stange für den einfachtiefen Betrieb durch das Antreiben der Kette ausgefahren werden kann, ohne dass dafür die erste Stange vollständig ausgefahren werden muss. Die dritte Stange kann durch ein Kettensystem mitbewegt werden. Das Kettensystem besteht aus Flyerketten, die durch gefederte Kettenspanner gespannt werden. Durch die Kettenspanner ist die dritte Stange mit der ersten Stange verbunden. In der zweiten Stange werden die Flyerketten nur durch Umlenkrollen gelenkt. Aufgrund ihrer Konstruktion kann sich die Teleskopgabel lediglich in Längsrichtung bewegen. Ein Spiel in Bewegungsrichtung der Teleskopgabel des Regalbediengeräts kann durch die Verbindungselemente selbst entstehen. [Bra-2016, S. 34f.]

Ein Ansatz zur **Detektion dieses Schadens** ist das Ermitteln von Beschleunigungen an der Teleskopgabel und die Analyse der Beschleunigungen hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung und ihrer Impulshaltigkeit [Bra-2016, S. 29]. Dafür wurden Beschleunigungen der Teleskopgabel im Normalzustand und in folgenden hergestellten Fehlerzuständen aufgenommen [Bra-2016, S. 35]:

- Spiel bei Kettenspanner mit Feder. Das Spiel wird dabei durch eine lockere Flyerkette erzeugt,
- Spiel bei Kettenspanner ohne Feder. Bei diesem Fehlerzustand verfügt die Teleskopgabel bereits über ein Spiel. Um zu ermitteln, ob mehr Spiel entsteht, wenn die Feder des Kettenspanners fehlt, wurde die Feder des Kettenspanners ausgebaut.

Zur Messung der Beschleunigungen wurden ein Sensor außen an die dritte Stange und ein Sensor innen an die zweite Stange angebracht. Aufgrund des beschränkten

Platzes wurden zur Aufnahme der Beschleunigung kabellose akustische Oberflächenwellen Sensoren, SAW Sensoren, eingesetzt. [Bra-2016, S. 9, 25, 35]

Es konnte gezeigt werden, dass zur Detektion von Spiel in Bewegungsrichtung bei Teleskopgabeln die arithmetischen Mittelwerte, die für jeden gemessenen Zustand aus den Beschleunigungen errechnet werden können und die Höhe der Nullstellenanzahl im graphischen Verlauf der Beschleunigung als Kennzahlen herangezogen werden können [Bra-2016, S. 38].

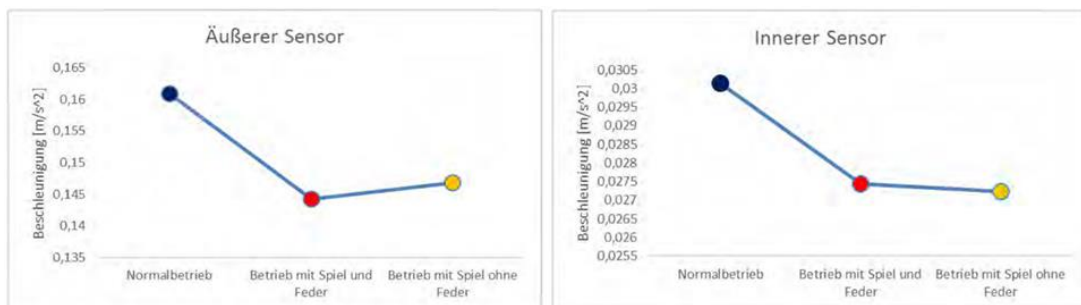


Abbildung 2-24: Links: arithmetische Mittelwerte der Beschleunigungen für jeden gemessenen Zustand des äußeren Sensors; rechts: arithmetische Mittelwerte der Beschleunigungen für jeden gemessenen Zustand des inneren Sensors [Bra-2016, S. 36f.]

Abbildung 2-24 zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Beschleunigungen für den Normalbetrieb, für den „Betrieb mit Spiel und Feder“ und für den „Betrieb mit Spiel ohne Feder“ für den äußeren und inneren Sensor. In beiden Fällen ist der Mittelwert der Beschleunigungen während des Normalbetriebs am höchsten. Zudem nehmen sowohl beim äußeren als auch beim inneren Sensor die Beschleunigungen im Testfall „Betrieb mit Spiel und Feder“, als auch im Testfall „Betrieb mit Spiel ohne Feder“ ab, im Vergleich zum Testfall „Normalbetrieb“. [Bra-2016, S. 36f.]

Werden bei dem äußeren Sensor die Beschleunigungsmittelwerte des Testfalls „Betrieb mit Spiel und Feder“, wie die Werte des Testfalls „Betrieb mit Spiel ohne Feder“ mit den Beschleunigungsmittelwerten des Normalbetriebs direkt verglichen, ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen den Werten „Betrieb mit Spiel und Feder“ und Normalbetrieb größer ist, als die Differenz zwischen „Betrieb mit Spiel ohne Feder“ und Normalbetrieb. Das bedeutet, dass durch das Entfernen der Feder weniger Spiel aufgetreten ist. Diese Aussage trifft für die Beschleunigungsmittelwerte des inneren Sensors nicht zu. Um eine valide Aussage treffen zu können, welcher der beiden Fehlerfälle vorliegt d.h. der Fehler „Betrieb mit Spiel ohne Feder“ oder der Fehler „Betrieb mit Spiel und Feder“, müssen nach Braun et. al. mehr Messungen durchgeführt oder die Messfrequenz erhöht werden. [Bra-2016, S. 37f.]

2.5.3 Steifigkeitsverlust des Masts

Laut Braun et.al. wird ein Steifigkeitsverlust des Masts als Schaden in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Die Konstruktion von Regalbediengeräten wird sich aufgrund des steigenden Wettbewerbsdrucks und der höheren Energiekosten ändern. Die Reduzierung der Wandstärke kann zu einer ökonomischeren Konstruktion führen. Durch die Verringerung der Wandstärke erhöht sich jedoch auch die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung an kritischen Stellen, da Sicherheitsreserven minimiert werden müssen. Die Verbindung zwischen Fahrwerk und Mast kann als kritische Stelle gesehen werden. Dort können durch Trägheitskräfte, die während des Beschleunigungsvorgangs des Regalbediengeräts wirken, Risse entstehen, da der Mast zum Schwingen angeregt wird. Diese können die Steifigkeit des Masts mindern. In Abbildung 2-25 ist ein solcher Riss beim Übergang vom Fahrwerk zum Mast schematisch dargestellt, der durch die Schwingung des Masts um die z-Achse entsteht. [Bra-2016, S. 55]

Ein Ansatz, um einen Steifigkeitsverlust des Masts zu detektieren, ist laut Braun et al. die Häufigkeitsverteilung der Mastbeschleunigungen zu ermitteln und zu analysieren. Für die Untersuchung von Braun et al. wurde deshalb das Systemverhalten modelliert. Das Modell unterlag der Annahme, dass bei einem geschlossenen Riss, der sich in Abbildung 2-25 dann ergibt, wenn der Mastkopf nach links schwingt, die Schwingungsamplitude geringer ist als bei einem geöffneten Riss (d.h. Mastkopf schwingt nach rechts). Die Schwingungsamplitude bei geschlossenem Riss ist kleiner, weil zur Absorption der Mastschwingung die gesamte Querschnittsfläche des Masts zur Verfügung steht. Eine Biegung des Masts nach links verursacht jedoch eine Öffnung des Risses, wodurch weniger Querschnittsfläche zur Verfügung steht, um die wirkenden Kräfte weiterzuleiten. Die Untersuchungen von Braun et al. haben gezeigt, dass eine vielversprechende Möglichkeit zur Detektion eines Steifigkeitsverlusts in der Erkenntnis zu sehen ist, dass bei zunehmender Risstiefe eine Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung eintritt. Aus Sicherheitsgründen konnte ein Festigkeitsverlust des Masts bei einem im Betrieb befindlichen Regalbediengerät nicht nachgestellt werden, weshalb die gewonnene Erkenntnis nicht weiter vertieft wurde. [Bra-2016, S. 29, 55f.]

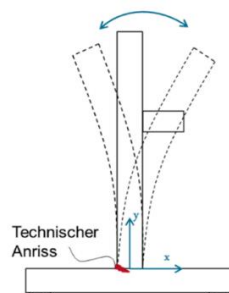


Abbildung 2-25: Schematische Darstellung eines Risses im Übergang vom Fahrwerk zum Mast [Bra-2016, S. 56]

2.5.4 Drehblockade der Führungsrollen

Nach Untersuchungen von Braun et. al. können Unregelmäßigkeiten im Laufverhalten eines Regalbediengeräts durch eine Drehblockade an den Führungsrollen entstehen. Die Führungsrollen werden in regelmäßigen Abständen durch das Instandhaltungspersonal überprüft. Der Schaden kann durch Setzen von Schweißpunkten an der Führungsrolle nachgestellt werden. Drehblockaden der Führungsrollen können **detektiert** werden, indem die Horizontalbeschleunigungen des Fahrwerkkopfs aufgenommen werden und darauf aufsetzend ein Beschleunigungsspektrum berechnet wird. Die ermittelten Frequenzbänder wurden in Bezug auf ihren Energiegehalt analysiert. Bei blockierten Führungsrollen wurde eine deutliche Änderung des Energiegehalts innerhalb der Frequenzbänder festgestellt. [Bra-2016, S. 33, 57f.]

2.5.5 Radformfehler der Antriebsrolle

Nach Braun et. al. können Unregelmäßigkeiten im Laufverhalten eines Regalbediengeräts auch durch Radformfehler der Antriebsrolle entstehen. Die Antriebsrollen werden ebenfalls in regelmäßigen Abständen durch Instandhaltungspersonal auf diesen Schaden hin überprüft. Der Schaden kann mit Hilfe von Antriebsrollen, die durch eine Schleifscheibe abgeplattet werden, nachgestellt werden. Rollt eine Antriebsrolle mit dem beschädigten Abschnitt auf der Schiene ab, entsteht eine Vertikalbeschleunigung in der Drehachse. Diese Beschleunigung ist wegen des wiederholten Abrollens der schadhafte Stelle während des Betriebs periodisch wiederkehrend. Das bedeutet, ein Radformfehler an der Antriebsrolle kann durch diese auftretende Vertikalbeschleunigung in der Drehachse detektiert werden. Allerdings kommt es zu einer Überlagerung der Vertikalbeschleunigung durch andere Anregungen, die zum Beispiel durch die Rauheit der Schiene entstehen. Vor allem kleine Radformfehler lassen sich somit nicht im Betrieb feststellen. [Bra-2016, S. 33, 57]

Nach Untersuchungen von Große et al. können Schäden bzw. Unwuchten an den Laufrädern eines Regalbediengeräts mittels Vibrationsmessung nachgewiesen werden. Unter Laborbedingungen wurde an zwei Laufrädern eines Regalbediengeräts je ein kapazitiver Beschleunigungssensor zur Vibrationsaufnahme angebracht und eines der beiden Laufräder mit einem Klebestreifen senkrecht zur Bewegungsrichtung des Regalbediengeräts beklebt. [Gro-2018, S. 1f., 4]

Beim Betrieb des Regalbediengeräts mit beklebtem Laufrad ergaben sich, wie Abbildung 2-26 zeigt, im Beschleunigungsspektrum beider Laufräder erhöhte Amplituden in einem Abstand von $t=184$ ms [Gro-2018, S. 2].

Diese experimentell bestimmte Zeit deckt sich mit der theoretisch berechneten Dauer einer Radumdrehung. Diese ist gegeben durch:

$$t = \frac{\pi \cdot d}{v} \quad (2-13)$$

mit t für die Dauer der Radumdrehung, mit d für den Raddurchmesser und mit v für die Fahrgeschwindigkeit des Regalbediengeräts. Mit dem im Versuch verwendeten Raddurchmesser d von 200 mm und einer Geschwindigkeit v des Regalbediengeräts von 3,4 m/s ergibt sich ein errechneter Wert von $t=184,7\text{ms}$. Dies ist ein Hinweis, dass die hohen Amplituden den Stoß, der durch das Klebeband einmal pro Radumdrehung verursacht wird, beschreiben. Zudem konnten bei Testfahrten ohne Klebeband am Lauf rad keine erhöhten Amplituden festgestellt werden. Auch bei Messungen im industriellen Umfeld konnte eine Übereinstimmung von Amplitudenabstand und der Dauer einer Radumdrehung gefunden werden. [Gro-2018, S. 2, 3]

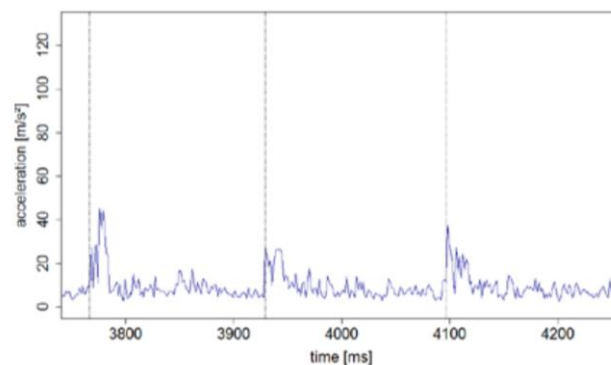


Abbildung 2-26: Beschleunigungsverlauf über drei Radumdrehungen des Sensors am Rad mit Klebestreifen [Gro-2018, S. 2]

2.5.6 Schäden der Fahrschiene

Die Untersuchungen von Große et al. haben auch ergeben, dass Schäden der Fahrschiene mittels Vibrationsmessung nachweisbar sind. Dafür wurde in einem Versuchsdurchlauf ein Klebeband an drei Stellen im willkürlichen Abstand auf der Fahrschiene befestigt. An den beiden Laufrädern des Regalbediengeräts waren je ein kapazitiver Beschleunigungssensor zur Vibrationsaufnahme angebracht. [Gro-2018, S. 1f., 4]

Überfuhr ein Rad das Klebeband, verursachte dies einen Peak in dem radzugehörigen Beschleunigungsspektrum. Durch den Vergleich der Beschleunigungsspektren beider Räder, konnte gezeigt werden, dass ein Stoß, der durch das Überfahren des Klebestreifens durch das eine Rad verursacht wird, auch in dem Spektrum des anderen Rades durch in einem Peak sichtbar ist. Somit konnte gezeigt werden, dass der Stoß

auch durch Beschleunigungssensoren aufgenommen werden kann, die nicht direkt an der Stoßquelle angebracht sind. [Gro-2018, S. 2f.]

2.5.7 Verschleiß der Lagerflansche von Laufradlagerungen

Im Betrieb wirken durchgehend hohe Drücke auf die Laufradlagerungen und somit auf die Lagerflansche. Durch fortschreitenden Betrieb kann es dadurch zu **Materialschäden an den Lagerflanschen** kommen. Defekte Lagerflansche können zu einem Ausfall des Regalbediengeräts führen. Durch die Materialschäden kommt es zu lauten Fahrgeräuschen des Regalbediengeräts. Um die auftretenden Materialschäden vorübergehend zu beheben, können diese durch Auftragsschweißen und darauffolgendes Ausdrehen der Lagerbohrung beseitigt werden. Eine bessere Alternative, um diesem Schaden entgegenzuwirken, ist eine verbesserte Auslegung des Lagers. Für die Lagerflansche können Werkstoffe mit höherfesten Eigenschaften verwendet werden. Um zu hohe Flächenpressungen und damit Verschleißerscheinungen und ein Ausbrechen der Lagerflanschen zu vermeiden, können die Wälzkörper breiter ausgelegt werden. Pendelrollenlager eignen sich dafür als Lagertyp. [o.V-2015, S. 40f.]

2.5.8 Weitere Ausfallursachen

Eine weitere Ausfallursache können **Kabelbrüche** der Spannungsversorgung des Regalbediengeräts bei der Verwendung von Energieführungsketten sein. Durch eine Umrüstung auf Stromschienen für die Spannungsversorgung kann dieser Schaden umgangen werden. [War-2015, S. 61 f.]

Auch **Hub- und Fahrmotoren** stellen mit fortschreitendem Alter ein hohes Ausfallrisiko dar. Das Ausfallrisiko kann durch einen Austausch der Antriebe minimiert werden. Anlagen, in denen noch Gleichstrommotoren in der Antriebstechnik eingesetzt sind, werden nach dem Stand der Technik durch frequenzgeregelt Asynchronmotoren ersetzt. Durch den Einsatz von frequenzgeregelten Asynchronmotoren und optimierter Sensorik zur Positionierung kann eine höhere Positionierungsgenauigkeit erreicht werden, da gleichmäßige Anfahrkurven technisch umsetzbar sind. Die Umrüstung auf neue Motoren ermöglicht auch eine schnellere Positionierung. Durch den Einsatz neuer Antriebstechnik ist nicht nur eine schnellere Positionierung möglich, sondern auch die Rückspeisung der Bremsenergie der Hub- und Fahrwerke. Dabei erfolgt der Bremsvorgang nicht mehr mechanisch, sondern elektrisch über Antriebsmotoren, die als Generator die überschüssige Bremsenergie über Rückspeisemodule in das Netz zurückführen. [Str-2015, S. 51f.; Bre-2016, S. 23; War-2016, S. 11; War-2015, S. 60f.]

Ein Ausfall eines Regalbediengeräts kann auch durch eine **veraltete Steuerung** verursacht werden. Als Gegenmaßnahme kann die veraltete Steuerung ausgetauscht

werden. Die Anlagensteuerung ist meist eine speicherprogrammierbare Steuerung, (SPS). Ein Beispiel für eine solche speicherprogrammierbare Steuerung stellt die Realtime-Soft SPS S7 der Siemens AG dar. Die SPS S7 löst in der Regel die Siemens S5 ab. Der Austausch der SPS ermöglicht die kontinuierliche Versorgung mit Ersatzteilen. Neben der beständigen Ersatzteilversorgung kann eine Modernisierung der Steuerung auch zu einer höheren Datensicherheit durch ein Redundant Array of Independent Disks System mit zwei Festplatten führen. Des Weiteren können dem Betreiber kontinuierliche Statusanzeigen des Regalbediengeräts, erprobte Diagnosefunktionen und eine bessere Visualisierung der Abläufe zur Verfügung gestellt werden. [War-2016, S. 10] Dadurch wird eine schnellere Lokalisierung von Störungen ermöglicht, die somit schneller beseitigt werden können. Ein Remote Zugriff auf die Steuerung via Virtual Private Network (VPN) Tunnel ermöglicht dem Anlagenhersteller eine Fernwartung mittels Diagnosen und schnellen Fehleranalysen. [War-2016, S. 10; Kas-2016, S. 40]

Veraltete Schaltschrankkomponenten stellen ebenfalls ein Ausfallrisiko für das Regalbediengerät dar. Zur Vermeidung eines solchen Ausfalls können die veralteten Schaltschrankkomponenten erneuert werden, indem der Schaltschrank ausgetauscht wird. Der Einsatz von Umrichtern, die dem Stand der Technik entsprechen, kann zudem den Verschleiß des Regalbediengeräts reduzieren und die Betriebssicherheit erhöhen, da eine optimale Fahrkurve des Regalbediengeräts durch die Umrichter möglich ist. [Unr-2016, S. 30 f.]

Auch eine **veraltete Bussystemtechnik** kann zu Ausfällen des Regalbediengeräts führen. Durch den Austausch des Bussystems auf den neusten Stand der Technik können Ausfälle reduziert werden. Dabei stellt das Busprotokoll Profinet die aktuellste Technologie dar. Es basiert auf Ethernet und kann auch große Datenmengen kontinuierlich und schnell übertragen werden. Das Vorhandensein von größeren Datenmengen führt zu einer Verbesserung des Diagnose Management. [Kau-2018, S. 33; Kas-2018, S. 67]

3 Fragebogen zur Ermittlung von Ausfallursachen und Predictive Maintenance Vorkommen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Fragebogenumfrage vorgestellt, die im Rahmen der Bachelorarbeit durchgeführt wurde, um Erkenntnisse hinsichtlich Ausfallursachen und Verbreitung von Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten zu gewinnen, die in der Literatur bisher nicht aufgeführt sind. Ziel des Fragebogens war das Identifizieren von Ausfallgründen und das Ermitteln von Komponenten, die aufgrund ihrer Kritikalität, d.h. wegen ihrer Ausfallhäufigkeit und Schwere Zustandsüberwacht werden sollten. Des Weiteren sollte festgestellt werden, welche Instandhaltungsstrategien dominierend eingesetzt werden bzw. in welchem Ausmaß Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten von Herstellern, Generalunternehmern und Betreibern bereits Anwendung findet. Im Fragebogen wurden sowohl Regalbediengeräte in vollautomatisierten Kleinteilelagern und in Hochregallagern berücksichtigt.

Die Fragebögen wurden im Januar 2020 an 18 Hersteller bzw. Generalunternehmer und Betreiber von Regalbediengeräten versandt. Der Rücklauf belief sich auf fünf Fragebögen. Vier Fragebögen wurden von Herstellern bzw. Generalunternehmern ausgefüllt, ein Fragebogen von einem Betreiber. Deshalb sind die im weiteren Verlauf vorgestellten Ergebnisse nicht signifikant und geben einen qualitativen Einblick. Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, werden im Folgenden zur Anonymisierung der Ergebnisse die vier Hersteller bzw. Generalunternehmer mit Unternehmen A, B, C, D bezeichnet. Bei dem Betreiber wird von Unternehmen E gesprochen. Die an der Umfrage teilgenommenen Generalunternehmer bieten sowohl die Errichtung von Neuanlagen als auch Service- und Wartungsverträge für Regalbediengeräte an.

Unternehmen	
Hersteller, Generalunternehmer	Betreiber
A	E
B	
C	
D	

Abbildung 3-1: Übersicht der teilgenommenen Unternehmen

3.1 Ergebnisse der Fragebogenauswertung

3.1.1 Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich Typ, Alter, Verfügbarkeit und Instandhaltungsstrategie der Regalbediengeräte

Zur besseren Einordnung der Antworten hinsichtlich der genannten Ausfallursachen wurde zuerst nachfolgenden Eckdaten gefragt:

- Typ des Regalbediengeräts, das von den Herstellern und Generalunternehmern am häufigsten vertrieben und/oder gewartet und von den Betreibern am häufigsten betrieben wird,
- Altersstruktur der Regalbediengeräte, die von Generalunternehmern gewartet und von Betreibern betrieben werden,
- Mean Time To Repair und Mean Time Between Failure des ältesten, von dem Generalunternehmer/Betreiber gewarteten/betriebenen Regalbediengeräts; Mean Time To Repair und Mean Time Between Failure des neuesten, von Herstellern und Generalunternehmern vertriebenen Regalbediengeräts,
- Dominierend eingesetzte Instandhaltungsart.

Zur Bestimmung des **Regalbediengerättyps** wurden die Unternehmen gebeten Rangziffern von 1 bis 5 zu vergeben. Eine 1 bedeutet, dass dieser Typ am häufigsten vertrieben/gewartet/betrieben wird. Eine 5 zeigt an, dass der Typ am wenigsten häufig vertrieben/gewartet/betrieben wird.

Tabelle 3-1: Antwortmöglichkeiten im Fragebogen bezüglich des Regalbediengerättyps

Typ Regalbediengerät	Rangziffer (1 – 5)
vollautomatisiertes RBG im Kleinteilelager	
vollautomatisiertes RBG im Hochregallager	
teilautomatisiertes RBG im Kleinteilelager	
teilautomatisiertes RBG im Hochregallager	
anderer Typ*	
*bitte geben Sie den Typ an:	

Tabelle 3-2 zeigt die Häufigkeit der Rangziffernennungen. Das vollautomatisierte Regalbediengerät im Kleinteilelager, wie auch das vollautomatisierte Regalbediengerät im Hochregallager werden von den Unternehmen am häufigsten vertrieben/gewartet/betrieben. Für das vollautomatisierte Regalbediengerät im Kleinteilelager wurde viermal die Rangziffer 1 (am häufigsten) und für das vollautomatisierte Regalbediengerät im Hochregallager dreimal die Rangziffer 1 (am häufigsten) vergeben. Das teilautomatisierte Regalbediengerät im Kleinteilelager und das teilautomatisierte Regalbediengerät im Hochregallager sind im Vergleich zu den vollautomatisierten Geräten

weniger verbreitet oder werden von den Unternehmen nicht vertrieben/gewartet/betrieben. Die Streuung in den Ergebnissen ist jedoch hoch. Werden die Antworten der Unternehmen einzeln betrachtet, kann festgestellt werden, dass für Unternehmen C, im Gegensatz zu den anderen Unternehmen, teilautomatisierten Geräte eine wichtigere Rolle spielen als vollautomatisierte.

Tabelle 3-2: Häufigkeit der Rangziffernennung des vertriebenen/gewarteten/betriebenen Typs

Typ Regalbediengerät	1 - am häufig.	2 – am zweithäufig.	3 - am dritthäufig.	4 - am vierthäufig.	5 - am wenig. häufig	nicht vertr./ gew./betrieb.
vollautomatisiertes RBG im Kleinteilelager	4	-	-	1	-	-
vollautomatisiertes RBG im Hochregallager	3	1	-	-	1	-
teilautomatisiertes RBG im Kleinteilelager	-	1	-	-	2	2
teilautomatisiertes RBG im Hochregallager	-	-	1	-	2	2
anderer Typ*	1	-	-	-	-	-

Wie in Kapitel 2 beschrieben, beeinflusst das Alter eines Systems die Verfügbarkeit. Deshalb wurde nach der **Altersstruktur** der gewarteten und betriebenen Regalbediengeräte und nach der Verfügbarkeit gefragt, die sich durch die MTTF und die MTBF berechnen lässt. Um einen Einblick zu erhalten, wie sich die Verfügbarkeit von Regalbediengeräten während ihres Lebenszyklus verändert, wurde bei den Herstellern und Generalunternehmern nach der **MTTF und MTBF des neusten Regalbediengeräts** gefragt, das sie vertreiben. Generalunternehmer und Betreiber sollten angeben wie hoch die **MTTF und MTBF des ältesten Regalbediengeräts** ist, das sie warten bzw. betreiben.

Bei der Auswertung der Altersstruktur der vollautomatisierten Regalbediengeräte in Kleinteilelagern wurden 2785 Geräte berücksichtigt. Die Basis bei der Auswertung der Altersstruktur bei vollautomatisierten Regalbediengeräten lag, wie Tabelle 3-3 zeigt, bei 2104 Geräten.

Tabelle 3-3: Gesamtanzahl der gewarteten und betriebenen Regalbediengeräte der teilgenommenen Unternehmen

	Anzahl Regalbediengeräte		
	vollautomatisches RBG im Kleinteilelager	vollautomatisiertes RBG im Hochregallager	Alle
Summe	2785	2104	4889

Wie Abbildung 3-2 zeigt, sind rund 65% aller vollautomatisierten Regalbediengeräte im Kleinteilelager jünger als 10 Jahre. Der Anteil von vollautomatisierten Regalbediengeräten im Hochregallager lag bei knapp 51%. Bei beiden Gerätegruppen sinkt der

prozentuale Anteil ab einem Alter von 10 Jahren. Im Bereich zwischen 10-15 Jahren ist mit jeweils ca. 24% der prozentuale Anteil von Geräten im Kleinteilelager vergleichbar mit dem Anteil von Geräten im Hochregallager. Demgegenüber befinden sich im Alter größer 15 Jahre mehr Regalbediengeräte, die im Hochregallager eingesetzt sind.

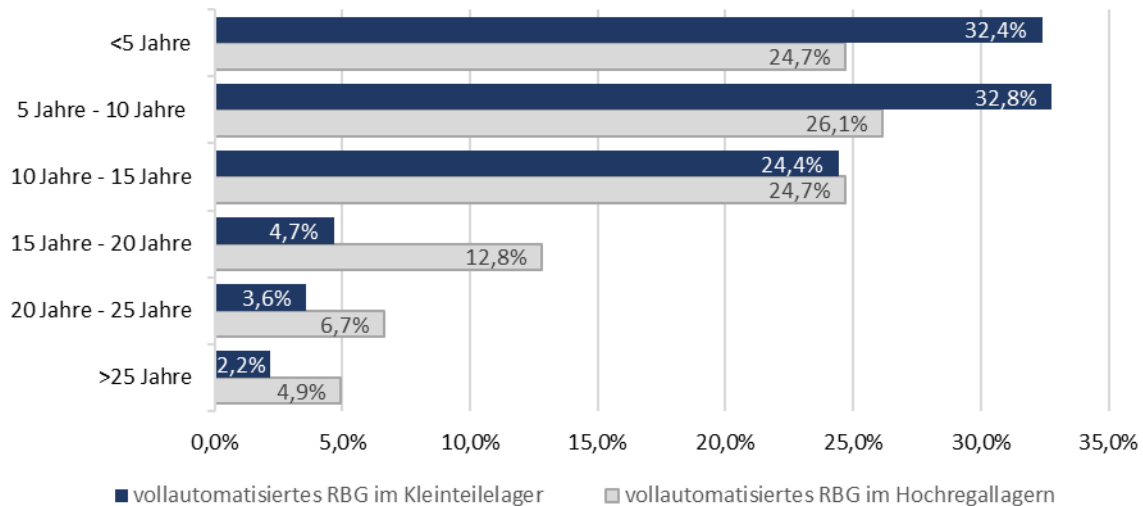


Abbildung 3-2: Altersstruktur der gewarteten und betriebenen Regalbediengeräte der teilgenommenen Unternehmen

Hinsichtlich der Verfügbarkeit wurde die Mean Time To Repair und die Mean Time Between Failure nur vom Betreiber angegeben. Die MTTR betrug beim ältesten betriebenen Regalbediengerät im Kleinteilelager wie auch im Hochregallager zwischen 30 und 60 Minuten. Die MTBF lag beim ältesten betriebenen Regalbediengerät im Kleinteilelager wie auch im Hochregallager bei ca. 3 bis 4 Monaten. Hersteller und Generalunternehmer gaben teilweise an, dass die gefragten Kennzahlen nicht bekannt oder betreibergestützt sind und somit keine Aussage gegeben werden kann.

In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die technische Verfügbarkeit und die Ausfallhäufigkeit von der durchgeführten **Instandhaltungsart** beeinflusst werden. Basierend auf dieser Erkenntnis wurden die Unternehmen gebeten Rangziffern von 1 bis 5 auf die Instandhaltungsarten zu vergeben (siehe Tabelle 3-4). Es sollte bewertet werden, welche Art der Instandhaltung von ihnen / ihren Kunden am häufigsten eingesetzt wird bzw. welche Instandhaltungsart sie Ihren Kunden am häufigsten empfehlen. Die Rangziffer 1 entsprach dem Ausdruck am häufigsten, die Rangziffer 4 am wenigsten häufig.

Tabelle 3-4: Aufgeführte Instandhaltungsarten im Fragebogen mit Rangziffernvergabe

Instandhaltungsart	Rangziffern (1 - 4)
vorausbestimmte Instandhaltung	
zustandsorientierte Instandhaltung	
sofortige korrektive Instandhaltung	
aufgeschobene korrektive Instandhaltung	

Die am häufigsten genannte Instandhaltungsart ist die vorausbestimmte Instandhaltung (siehe Tabelle 3-5). Sie wurde dreimal als am häufigsten benannt. Ihre sehr häufige Anwendung wird auch dadurch deutlich, dass alle fünf Unternehmen für die vorausbestimmte Instandhaltung entweder die Rangziffer 1 (am häufigsten) oder die Rangziffer 2 (am zweithäufigsten) vergaben. Rangziffer 3 und 4 wurden für diese Art der Instandhaltung nicht genannt.

Mit zweimaliger Nennung mit am häufigsten folgt die sofortige korrektive Instandhaltung. Wie Tabelle 3-6 zeigt, wird diese Art der Instandhaltung beim Betreiber am häufigsten eingesetzt. Werden die Antworten für jedes Unternehmen einzeln betrachtet, gab Unternehmen B als Generalunternehmer an, dass Geräte im Rahmen seiner Wartungsverträge ebenfalls am häufigsten mit der sofortigen korrektiven Instandhaltungsart gewartet werden.

Die zustandsorientierte Instandhaltung ist, wie Tabelle 3-5 zeigt, im Instandhaltungsverhalten der Unternehmen unterschiedlich stark ausgeprägt. Es konnte keine Tendenz festgestellt werden, da die gesamte Spannweite an Rangziffern vergeben wurde.

Ein eindeutiges Bild zeigt sich bei der aufgeschobenen korrektiven Instandhaltung. Die Unternehmen haben für diese Art der Instandhaltung einmal die Rangziffer 3 (am dritthäufigsten) und viermal die Rangziffer 4 (am wenigsten häufig) vergeben. Diese Instandhaltungsart wird am wenigsten häufig eingesetzt und empfohlen.

Wird für jede Instandhaltungsart der Mittelwert über die Rangziffer gebildet, zeigt Tabelle 3-6, dass Hersteller und Generalunternehmer die vorausbestimmte Instandhaltung am häufigsten empfehlen bzw. durchführen. Es folgen die zustandsorientierte Instandhaltung und die sofortige korrektive Instandhaltung. Am wenigsten häufig empfohlen bzw. durchgeführt wird die aufgeschobene korrektive Instandhaltung. Der Betreiber setzt dagegen die sofortige korrektive Instandhaltung am häufigsten ein, gefolgt von der vorausbestimmten Instandhaltung. Am wenigsten häufig verwendet er die zustandsorientierte Instandhaltung.

Tabelle 3-5: Häufigkeit der Rangziffernennung bei den unterschiedlichen Instandhaltungsarten

Instandhaltungsart	1 – am häufigsten	2 – am zweithäufigsten	3 – am dritthäufigsten	4 – am wenigsten häufig
vorausbestimmte Instandhaltung	3	2	-	-
zustandsorientierte Instandhaltung	1	2	1	1
sofortige korrektive Instandhaltung	2	-	3	-
aufgeschobene korrektive Instandhaltung	-	-	1	4

Tabelle 3-6: Mittelwert über die Rangziffern für jede Instandhaltungsart

Instandhaltungsart	Alle	Hersteller und GU	Betreiber
vorausbestimmte Instandhaltung	1,4	1,25	2
zustandsorientierte Instandhaltung	2,4	2	4
sofortige korrektive Instandhaltung	2,2	2,5	1
aufgeschobene korrektive Instandhaltung	3,8	4	3

3.1.2 Ausfallursachen, Gegenmaßnahmen und Detektion

Die Unternehmen wurden aufgefordert anzugeben, welche Ausfallursachen wie häufig im Jahr 2019 bei Regalbediengeräten im Hochregallager auftraten. Die in der Abbildung 3-3 beschriebenen Ausfallursachen waren hierbei bereits im Fragebogen vorgegedruckt. Weitere Ausfallursachen wurden von den Unternehmen nicht genannt. Mit gut 61% stellen Bedienfehler des Personals die bei weitem häufigste Ausfallursache dar. Es folgen mit jeweils 7,7% Ausfälle aufgrund von defekten Elektromotoren des Hubantriebs, Verschleiß von Tragmitteln sowie Kollisionen des Hubwagens mit dem Hochregal. Fünfhäufigste Ausfallursache stellen mit 6,1% verschlissene Laufräder dar. Je 3,1% der Ausfälle wurden durch Elektromotoren des Fahrtriebs bzw. Frequenzumrichter verursacht. Der Anteil an Ausfällen durch die Steuerung und verschlissene Schienen lag bei je 1,5%. Eine sehr gering auftretende Ausfallursache stellte der Festigkeitsnachlass des Masts dar, mit nicht einmal einem Prozent.

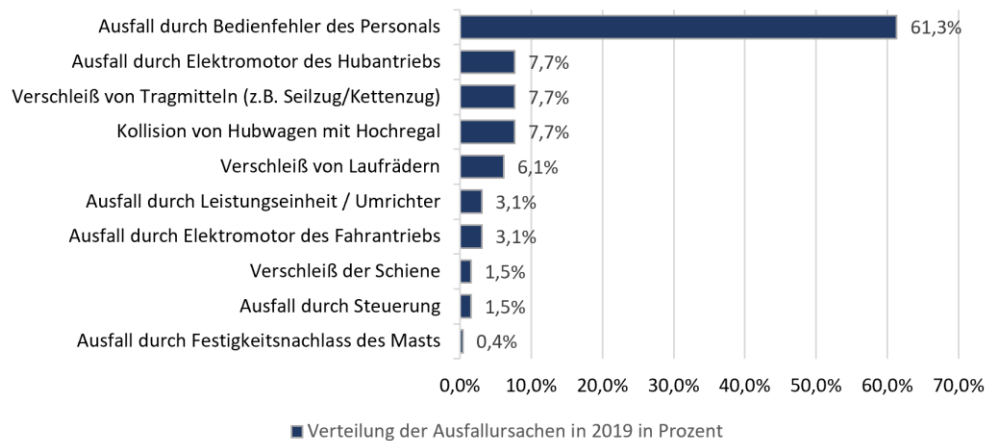


Abbildung 3-3: Aufgetretene Ausfallursachen im Jahr 2019 und ihre Verteilung in Prozent

Bezogen auf die jeweilige Ausfallursache sollten die Unternehmen angeben, ob diese in den letzten 30 Jahren zu- oder abgenommen hat oder gleichgeblieben ist und die Gründe hierfür nennen. Darüber hinaus sollten sie Gegenmaßnahmen zur Beseitigung des Schadens anführen und erklären, wie der Ausfall detektiert werden könnte.

Die Ausfallursache **Bedienfehler des Personals** hat laut Unternehmen A in den letzten 30 Jahren zugenommen. Grund dafür sei der vorherrschende Fachkräftemangel. Unternehmen D gab an, dass es aufgrund von Bedienfehlern des Personals zu Störungen der Steuerung oder des Umrichters kommen kann. Mit Hilfe der Störungsmeldungen kann rückwirkend als Ausfallursache ein Bedienfehlern des Personals erkannt werden. Der Schaden kann laut Unternehmen C mit Hilfe von Remote Support behoben werden. Außerdem nannte Unternehmen A als Gegenmaßnahmen zur Verhinderung von Ausfällen durch Bedienfehler Schulungsmaßnahmen für das Personal und die Absicherung der Bedienung durch Sicherheitsabfragen.

Die Ausfallhäufigkeit durch **Elektromotoren des Hubantriebs** bewerten die Unternehmen A, C und E als gleichbleibend im Verlauf der letzten 30 Jahre. Unternehmen A merkt allerdings an, dass die Motoren zu niedrig ausgelegt wären.

Die Ausfallhäufigkeit von **Elektromotoren des Fahrtriebs** schätzen die Unternehmen A und C ebenfalls gleichbleibend ein. Unternehmen E gab jedoch an, eine abnehmende Tendenz festzustellen, da es bei den Motoren zu einer Qualitätsverbesserung gekommen sei. Als Gründe für ein Motorversagen des Fahrtriebs nannten die Unternehmen den Verschleiß der Lagerung, defekte Lüfter, fehlerhafte Drehgeber und defekte Bremsen, die für den integrierten Gleichrichter am Motor angebaut sind. Ebenfalls bekannt sei laut Unternehmen D ein Versagen durch werksbedingte Bauteilfehler.

Sowohl bei fehlerhaften Elektromotoren des Fahrtriebs als auch bei defekten Elektromotoren des Hubantriebs reagieren die Unternehmen auf den Schaden durch einen Komplettaustausch des Motors oder durch Instandhaltungsmaßnahmen zur Beseitigung des Motordefekts. Motorausfälle können nach Unternehmen A, B und C durch die Auswertung von Motordaten, zum Beispiel durch Vergleich von Daten mit Alarmmeldung bei Abweichung, erkannt werden. Dafür können die Stromaufnahme gemessen oder die Temperatur- und Geräuschentwicklung überwacht werden. Nach Meinung der Unternehmen ist auch der Einsatz von Schwingungsanalyse zur Detektion von Motorschäden möglich.

Hinsichtlich der Seil- und Kettenzüge gaben die Unternehmen C und E an, diese präventiv zu tauschen. Deshalb sind laut Unternehmen E Ausfälle aufgrund von **verschlissenen Tragmitteln** im Vergleich der letzten 30 Jahren unverändert geblieben.

Unternehmen C erkennt durch die vorausschauende Instandhaltung eine abnehmende Tendenz dieser Ausfallursache. Bei Verschleiß der Tragmittel werden diese laut Unternehmen B und E komplett ausgetauscht. Nach Einschätzung des Unternehmens B können verschlissene Seil- und Kettenzüge durch visuelle Prüfung, wie auch durch den Einsatz eines Litzenprüfgeräts detektiert werden. Eine Überwachung der Längenausdehnung kann laut Unternehmen C auch helfen einen solchen Schaden zu erkennen.

Bei der Entwicklung der Ausfallhäufigkeit aufgrund der **Kollision des Hubwagens mit dem Hochregal** konnte im Vergleich der letzten 30 Jahren keine Tendenz festgestellt werden. Die Unternehmen schätzen die Entwicklung unterschiedlich ein. Einer Kollision kann laut Unternehmen A und C entgegengewirkt werden, indem Sensorik zur Positionierungsüberwachung des Hubwagens am Regalfach installiert wird.

Die Ausfallhäufigkeit durch **verschlissene Laufräder** hat nach Unternehmen A und E in den letzten 30 Jahren zugenommen. Als Gründe dafür nannte Unternehmen A, dass die Regalbediengeräte höhere Fahrgeschwindigkeiten erreichen, ihre Performance zugenommen habe und eine höhere Auslastung der Geräte bestehe. Zum anderen ist laut Unternehmen E die zunehmende Tendenz auf die Umrüstung von Stahl auf Polyurethan als Laufradwerkstoff zurückzuführen. Als Gegenmaßnahme zur Behebung des Schadens tauschen Unternehmen B, C und D die Laufräder aus. Zudem gab Unternehmen D an, bei defekten Laufrädern Materialanalysen zur Ursachenforschung durchzuführen. Eine Detektion von verschlissenen Laufrädern ist nach den Unternehmensmeinungen durch visuelle Inspektion der Laufräder, durch Schwingungsüberwachung, durch Radvermessung mittels Programm oder durch Überwachung der Fahrgeräusentwicklung möglich. Nach Unternehmen B sind stark eingelaufene Laufräder ein Zeichen für einen nötigen Austausch der Räder.

Die Häufigkeit von Regalbediengerätausfällen aufgrund des **Umrichters** ist laut den Unternehmen A, C und E im Vergleich der letzten 30 Jahren gleichgeblieben. Wobei Unternehmen E Materialverbesserungen hinsichtlich der Umrichterkomponenten festgestellt hat. Für Unternehmen A und E stellen Netzschwankungen einen Grund für Umrichterausfälle dar. Zudem nannte Unternehmen A Stromausfälle als einen weiteren Grund. Unternehmen B gab an, dass Umrichterausfälle durch veraltete Elektronik wie, zum Beispiel Kondensatoren und Gleichrichter, verursacht werden. Unternehmen C sieht in defekten Schaltschrankkomponenten und Unternehmen D in werksbedingten Bauteilfehlern Gründe für Umrichterausfälle. Während des Betriebs können laut Unternehmen B Tests zur Überprüfung der Funktion des Umrichters durchgeführt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Stromaufnahme und die Temperatur zu messen, um Schäden zu detektieren. Bei einem Ausfall wird nach Unternehmen B und D

der Umrichter ausgetauscht. Der Schadenseintritt kann laut Unternehmen B sowohl beim Frequenzumrichter als auch bei den Elektromotoren verzögert werden, indem die dynamischen Werte des Regalbediengeräts verringert werden.

Die Ausfallhäufigkeit durch den **Verschleiß der Schiene** ist laut Angaben von Unternehmen A und C gleichgeblieben. Nach Meinung des Unternehmens E ist die Tendenz zunehmend. Als Gegenmaßnahme schleifen Unternehmen C und E die Schiene. Zudem geben Unternehmen B und C an, die Schiene bei Verschleiß teilweise oder vollständig auszutauschen. Laut Unternehmen A kann der Verschleiß durch Materialverbesserung der Schiene reduziert und durch präventive Instandhaltungsmaßnahmen ermittelt werden. Unternehmen B gibt an, dass verschlissene Schienenteile durch visuelle Inspektion und die Überwachung der Fahrgeräusentwicklung ermittelt werden können. Ein Verschleiß der Schiene kann laut Unternehmen E auch entdeckt werden, wenn Laufbilder auf der Schiene durch Abrieb des Laufrads entstehen.

Hinsichtlich der Schadensentwicklung von **Ausfällen durch die Steuerung** ist ebenfalls keine klare Tendenz zu erkennen. Unternehmen A schätzt die Auftrittshäufigkeit im Vergleich zu den letzten 30 Jahren als abnehmend ein, da der Netzausbau und die Stromversorgung verbessert wurden. Für Unternehmen E ist diese Ausfallursache gleichbleibend. Es gibt an, dass das Material der Hardware-Steuerungskomponenten verbessert wurde. Sowohl Unternehmen A, D und E sehen in der Fehlbedienung durch das Personal einen Grund für Steuerungsausfälle bzw. Steuerungsstörungen. Unternehmen A und B geben an, dass Bauteilfehler, wie zum Beispiel defekte Datenlichtschranken, eine defekte Central Processing Unit (CPU) oder fehlerhafte Frequenzumrichter zu einem Ausfall bzw. einer Störung der Steuerung führen können. Auch fehlerhaft gesicherte Ladehilfsmittel oder herabhängende Folien bei gewickelten Paletten, wie auch fehlerhafte oder nicht spezifikationsgerechte Paletten können eine Störung der Steuerung verursachen. Unternehmen E nennt Netzschwankungen und Stromausfälle als häufige Ursachen für einen Steuerungsausfall. Ist die Steuerung veraltet, wird laut der Unternehmen die Steuerung auf neuere Technologien umgerüstet.

Bei der nur sehr sporadisch auftretenden Ausfallursache **Festigkeitsverlust des Masts** wurde von Unternehmen C angemerkt, dass eine Rissbildung im Mast vor allem bei Geräten mit einem Alter von größer 20 Jahren auftritt. Laut Unternehmen C können als Gegenmaßnahme auftretende Risse geschweißt werden. Zudem können zur Vermeidung eines Festigkeitsverlusts Schraubverbindungen kontrolliert werden. Unternehmen A gab an, dass durch Verbesserung des Mastmaterials einem Festigkeitsverlust entgegengewirkt werden kann. Sowohl Unternehmen A als auch C sehen in Dehnmessstreifen eine Möglichkeit, einen Festigkeitsverlust des Masts detektiert zu

können. Auch die Überwachung der Mastauslenkung kann laut Unternehmen C dazu beitragen eine verminderte Festigkeit zu ermitteln.

Die Unternehmen gaben außerdem Auskunft über Ursachen, die zu einem **Getriebeausfall** des Regalbediengeräts führen können. Ein Ausfall kann zum Beispiel durch den Verschleiß der Getriebelagerung, wie auch der Zahnräder verursacht werden. Getriebeschäden entstehen auch durch die Verwendung eines falschen oder veralteten Öls. Zu wenig Öl, zum Beispiel durch einen Ölverlust aufgrund einer Ölleckage, kann ebenfalls einen Getriebeschaden hervorrufen. Unternehmen E gab zudem an, dass Ausfälle aufgrund zu hoher Betriebstemperatur (Heißlaufen des Getriebes) eintreten.

Auch durch defekte **mechanische Übertragungsglieder** können Ausfälle entstehen. Nach Unternehmen A werden mechanische Übertragungsglieder durch Materialermüdung und mit zunehmender Betriebszeit fehlerhaft. Sie können laut Unternehmen D aber auch bereits bei Auslieferung über einen Werksfehler verfügen. Betroffene mechanische Übertragungsglieder sind den Unternehmen zufolge Zahnstangen, Kuppelungen, Riemen, Ketten, Wellen und Ritzel. Zudem ist den Unternehmen der Bruch von Lagerungen und Lagerausfall von Führungsrollen bekannt.

Kommt es zu einem Stillstand des Regalbediengeräts bedingt durch einen Ausfall gaben die Unternehmen an, keine **redundanten Systeme** in der Lagergasse einzusetzen. Um den Ausfall eines Regalbediengeräts jedoch im Lager kompensieren zu können, erfolgt eine chaotische Bestandslagerung. Fällt ein Gerät aus, kann die benötigte Ware aufgrund der Verteilung auf unterschiedliche Gassen durch andere Regalbediengeräte geholt werden. Der Zugriff auf Waren in der gesperrten Gasse kann auch durch Regalbediengeräte der benachbarten Gasse mit einem doppelttiefen Lastaufnahmemittel ermöglicht werden.

In manchen Fällen ist eine Instandhaltung der Regalbediengeräte nicht ausreichend, um einen fehlerfreien Betrieb zu gewährleisten. Das Regalbediengerät kann in solchen Fällen durch einen Retrofit modernisiert werden. Im Fragebogen wurden die Unternehmen deshalb gefragt, welche Befunde ein Regalbediengerät vorweisen muss und wie stark diese Befunde ausgeprägt sein müssen, damit ein Retrofit sinnvoll ist. Ein Retrofit der Steuerung würden die Unternehmen durchführen, wenn Steuerungskomponenten abgekündigt werden und kein Software Support mehr erfolgt. Auch wenn neue Bauteile zum Beispiel ein neuer Frequenzumrichter oder neue Motoren nicht mehr in die alte Steuerung eingebunden werden können, sollte laut der Unternehmen eine Steuerungsmodernisierung erfolgen. Unternehmen A gab an, dass alle 5-8 Jahre ein Technologiewechsel in der Steuerungstechnik erfolgt. Sowohl Unternehmen A, B, C, und D gaben an, dass bei Abkündigung von Ersatzteilen dringend ein Retrofit von

Regalbediengeräten erfolgen sollte, da der Ausfall eines Bauteils, dessen Ersatzteile abgekündigt werden, sehr lange Stillstandszeiten zur Folge haben kann. Ein Retrofit ist besonders dann notwendig, wenn der Wechsel auf Nachfolgermodelle nicht möglich ist. Besteht die Möglichkeit ein Nachfolgermodell einzusetzen, müssen diese laut Unternehmen B frühzeitig definiert werden, da möglicherweise ein Umbau für diesen Einsatz benötigt wird.

3.1.3 Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance Vorkommen

Hinsichtlich der **Zustandsüberwachung** von Komponenten des Regalbediengeräts gaben drei von fünf Unternehmen an, den Zustand von Komponenten bereits zu überprüfen (siehe Abbildung 3-4). Als überwachte Komponenten wurden die speicherprogrammierbare Steuerung und der Frequenzumrichter genannt. Ein Unternehmen führt des Weiteren tägliche automatisierte Funktionstests der Fahrtriebsbremsen durch.

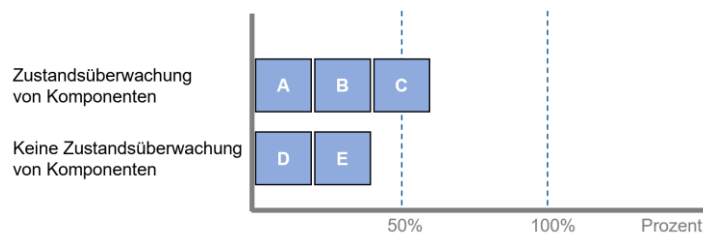


Abbildung 3-4: Verbreitung von realisierter Zustandsüberwachung von Komponenten der Unternehmen

Die Unternehmen nannten folgende in Tabelle 3-7 aufgeführte Komponenten, die zu-standsüberwacht werden sollten und gewichteten sie hinsichtlich ihrer Wichtigkeit. Rangziffer 1 bedeutet, dass die Zustandsüberwachung dieser Komponenten am wichtigsten ist. Rangziffer 4 ist am wenigsten wichtig. Da im Fragebogen diese Frage als eine offene Frage formuliert wurde, ist eine Mehrfachnennung und eine unterschiedliche Gewichtung der Komponenten möglich.

Tabelle 3-7: Übersicht über die Komponenten, die nach Unternehmensmeinung zustandsüberwacht werden sollten

Rangziffer	Genannte Komponenten für die Zustandsüberwachung
1 - am wichtigsten	Bussysteme
	Steuerung
	Sensorik für die Fachfeinpositionierung
2	Umrichter
	Getriebe
	Motoren
	Lauftrad
	Riemen, Ketten (z.B. Spannung, Dehnung)
3	Leistungseinheit / Frequenzumrichter (z.B. Kennlinienauswertung)
	Antriebsmotoren (z.B. Kennlinienauswertung)
	Kritische Schraubenverbindungen
4 - am wenigsten wichtig	Übertragungsglieder

Nach Einschätzung der Unternehmen stellen die Bussysteme und die Steuerung Komponenten dar, für die eine Zustandsüberwachung am wichtigsten sind. Eine Umsetzung von Zustandsüberwachung für Umrichter, Getriebe, Motor, Riemen und Ketten sowie für das Laufrad halten die Unternehmen ebenfalls für wichtig. Vor allem der Umrichter und die Antriebsmotoren wurden sowohl unter der Rangziffer 2 und Rangziffer 3 genannt als auch innerhalb ihrer Rangziffer mehrmals. Kritische Schraubenverbindungen wie auch mechanische Übertragungsglieder stellen eine weitere Komponentengruppe dar, für die die Unternehmen eine Zustandsüberwachung als sinnvoll erachten.

In einem zweiten Schritt wurden zwei Experten befragt. Sie sollten einen Ausfall, der durch die ermittelten Komponenten eintritt nach den folgenden Kategorien bewerten:

- Kostenfaktor für Betriebs-, Hilfsmittel und Material, der zur Ausfallbehebung aufgebracht werden muss,
- Kostenfaktor für das Personal, der zur Ausfallbehebung aufgebracht werden muss,
- Zeitfaktor, der zur Ausfallbehebung aufgebracht werden muss.

Die Bewertung erfolgte durch Rangziffernvergabe. Es konnten folgende Rangziffern vergeben werden:

- 4 : sehr hoch bzw. sehr lange,
- 3 : hoch bzw. lange,
- 2 : mittel,
- 1 : gering bzw. kurz.

Bei der Auswertung wurden für jede Komponente die Rangziffern der drei Kategorien summiert und das Ergebnis darauffolgend halbiert (zwei Experteneinschätzungen). Die drei Kategorien wurden gleichgewichtet. Tabelle 3-8 zeigt die daraus resultierende Reihenfolge der Komponenten. Demnach ist nach Meinung der Experten eine Zustandsüberwachung von Getrieben mit einem Rangziffernmittelwert von 9 am wichtigsten. Es folgen die Antriebsmotoren mit einem Rangziffernmittelwert von 8,5 und Riemen/Ketten sowie die Laufrädern mit jeweils 7,5.

Tabelle 3-8: Reihenfolge der Komponenten hinsichtlich der Wichtigkeit für die Zustandsüberwachung

Genannte Komponenten für die Zustandsüberwachung	Mittelwert der Rangziffer
Getriebe	9
Antriebsmotoren	8,5
Laufrad,	7,5
Riemen, Ketten	7,5
Frequenzumrichter	7
Bussysteme	6,5
Steuerung	6
Sensorik zur Fachfeinpostierung	5,5
Kritische Schraubenverbindungen/Übertragungsglieder	4

Zur Realisierung einer Zustandsüberwachung mittels Condition Monitoring Systemen bzw. zum Aufbau eines Predictive Maintenance Konzepts müssen die benötigten Sensoren mit Energie versorgt und Messdaten ausgetauscht werden. Bei der Frage, ob die Energieversorgung und der Datenaustausch mittels einer kabellosen Lösung, zum Beispiel durch Batterie für die Energieversorgung und Wireless Local Area Network (WLAN) für den Datenaustausch oder einer Lösung via Kabel realisiert werden sollte, gaben vier der fünf Unternehmen an, eine Lösung via Kabel zu bevorzugen.

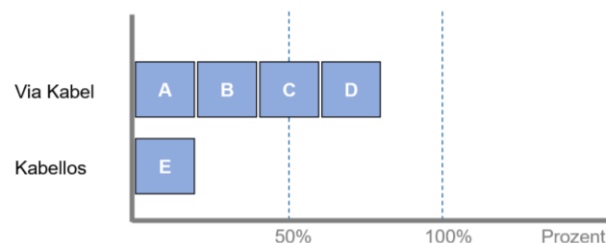


Abbildung 3-5: Bevorzugte Energie- und Datenübertragungslösung für Sensoren zur Zustandsüberwachung

Hinsichtlich der Wichtigkeit von Predictive Maintenance für das Unternehmen führte Unternehmen A an, dass Predictive Maintenance von Regalbediengeräten sehr wichtig für das Unternehmen sei. Drei von fünf Unternehmen halten Predictive Maintenance für wichtig. Für Unternehmen D ist Predictive Maintenance weniger wichtig.

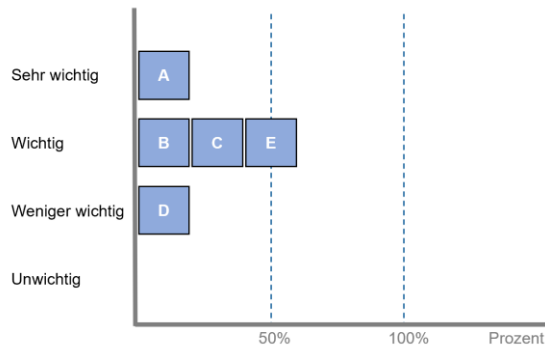


Abbildung 3-6: *Einschätzung der Wichtigkeit von Predictive Maintenance für Regalbediengeräte für das Unternehmen*

Dementsprechend sieht Unternehmen E als Betreiber in Predictive Maintenance für Regalbediengeräte eine Verbesserung für seinen Logistikprozess. Für Unternehmen A, B und C stellt Predictive Maintenance eine neue Geschäftschance dar. Nach Einschätzung von Unternehmen D ergeben sich durch Predictive Maintenance keine neuen Geschäftschancen.

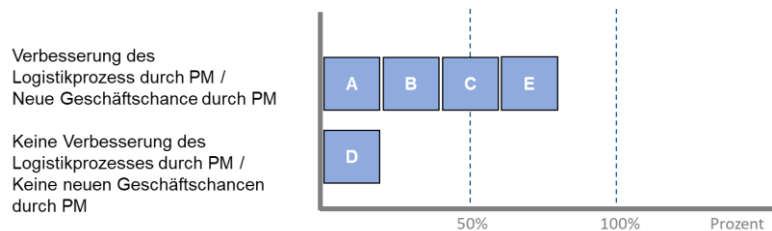


Abbildung 3-7: *Einschätzung der Frage, ob Predictive Maintenance den Logistikprozess verbessern bzw. ob durch Predictive Maintenance neue Geschäftschancen entstehen*

Bei drei Unternehmen existieren nach eigenen Angaben bereits Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte. Ob es sich dabei tatsächlich um Predictive Maintenance Lösungen handelt oder um Condition Monitoring Lösungen konnte anhand der Unternehmensangaben nicht ermittelt werden.

3.2 Diskussion der Fragebogenergebnisse

Die oben aufgeführten Ergebnisse sind aufgrund der Rücklaufanzahl von fünf Fragebögen nicht signifikant und geben daher nur einen Einblick.

Die Umfrage wurde durchgeführt, um zum einen Ausfallursachen und kritische Komponenten des Regalbediengeräts zu identifizieren. Zum anderen sollte untersucht werden, welche Instandhaltungsstrategie dominierend bei Regalbediengeräten eingesetzt wird bzw. in welchem Ausmaß Predictive Maintenance bereits bei Regalbediengeräten verbreitet ist.

Für die Ermittlung der Ausfallursachen wurden im Fragebogen bereits mögliche Ausfallursachen vorgegeben, die zuvor mittels Literaturrecherche identifiziert worden waren und in Abbildung 3-3 aufgeführt sind. Die Unternehmen wurden im Fragebogen gebeten, weitere ihnen bekannte Ausfallursachen zu nennen. Da keine Ergänzungen vorgenommen wurden, ist davon auszugehen, dass die in Abbildung 3-3 dargestellten Ausfallursachen die tatsächlich in der Praxis auftretenden Ausfallursachen abdecken.

Auffällig ist jedoch, dass das Getriebe von den Unternehmen als wichtig für die Zustandsüberwachung eingeschätzt wird, aber die Unternehmen bezogen auf 2019 keinen Ausfall eines Regalbediengeräts durch einen Getriebeschaden angaben. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Getriebe nicht aufgrund seiner Ausfallhäufigkeit zustandsüberwacht werden sollte, sondern deshalb, weil ein Austausch kostenintensiv und zeitkritisch ist. Dass ein Austausch des Getriebes teuer und kritisch für die Lagerverfügbarkeit ist, bestätigen die beiden Experten.

Abgesehen vom Getriebe korrespondieren die von den Unternehmen in Tabelle 3-7 für eine Zustandsüberwachung genannten Komponenten mit den Bauteilen, die bei Versagen zu den in der Literatur beschriebenen Ausfallursachen führen. Deshalb erscheint es sinnvoll, den Zustand der genannten Komponenten zu überwachen.

Hinsichtlich der Auftrittshäufigkeit konnte festgestellt werden, dass die Unternehmen neben dem Ausfall durch Bedienfehler des Personals, nur in Ausfällen durch verschlissene Laufräder bzw. Schienen eine steigende Tendenz im Vergleich zu den letzten 30 Jahren erkennen. Dies kann ein Indiz dafür sein, dass ein verstärkter Handlungsbedarf zur Vermeidung dieser Ausfälle nötig ist. Wie die Unternehmen angaben, kann die Vermeidung von Ausfällen durch Bedienfehler nur durch Schulung der Mitarbeiter und durch Absicherung der Bedienung mittels Sicherheitsabfragen realisiert werden. Bei Ausfällen durch verschlissene Schienen und Laufräder, könnte zur Ausfallvermeidung

Zustandsüberwachung eingesetzt werden, da der Abnutzungsvorrat wie in Kapitel 2.5.5 und 2.5.6 gezeigt, durch Schwingungsanalyse messbar ist.

Die vorausbestimmte Instandhaltungsart ist bei Betrachtung aller Unternehmensantworten im Mittel die dominierende Instandhaltungsart, wie Tabelle 3-6 zeigt. Darauf folgt die korrektive Instandhaltung. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Aussagen im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2.4.4. Ebenfalls ist in den Angaben der Unternehmen zu erkennen, dass die zustandsorientierte Instandhaltung vor allem bei den Herstellern und Generalunternehmern an Bedeutung gewinnt. Für den Betreiber hingegen ist die zustandsorientierte Instandhaltung im Moment die am wenigsten häufig eingesetzte Instandhaltungsart. Dies könnte an einem Mangel an adäquaten Zustandsüberwachungssystemen und/oder an den hohen Investitionskosten für solche Systeme liegen. Möglicherweise könnte auch eine Nachrüstung der Regalbediengeräte auf Zustandsüberwachung aufgrund des Alters der Geräte nicht wirtschaftlich sein.

Bei einem Großteil der Ausfälle gaben die Unternehmen an, die für den Ausfall verantwortlichen Bauteile komplett auszutauschen. So werden Elektromotoren des Hub- und Fahrantriebs, Tragmittel, Laufräder, Schienen bzw. Schienenteile und Umrichter bei Ausfall ausgetauscht. Aus diesem Verhalten könnte geschlossen werden, dass der Einsatz von zukünftiger Zustandsüberwachung nicht das Ziel verfolgen wird, die Lebensdauer der Komponenten, z.B. Motor oder Umrichter, zu verlängern, sondern die Instandhaltungsmaßnahmen, d.h. den Austausch dieser Komponenten, hinsichtlich Zeitpunkt, Personal- und Ersatzteile besser planen zu können.

Bezüglich Predictive Maintenance sieht Unternehmen E eine Verbesserung für seinen Logistikprozess. Für den Betreiber könnte die Reduzierung von Ausfällen und die gezielte Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen ein Grund dafür sein. Die Unternehmen A, B, und C gaben an, in Predictive Maintenance neue Geschäftschancen für ihr Unternehmen zu sehen. Neue Geschäftschancen für die genannten Hersteller bzw. Generalunternehmer könnten durch die Entwicklung und den Vertrieb von Predictive Maintenance Lösungen entstehen. Zudem könnte auch das Serviceangebot im Bereich des Wartungs- und Instandhaltungsportfolios durch Predictive Maintenance wachsen.

4 Bewertung der Übertragbarkeit von Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen

Unternehmen anderer Branchen haben die Vorteile die Predictive Maintenance Lösungen für ihre Kunden bieten bereits erkannt. Sie möchten ihren Kunden nicht nur Condition Monitoring Systeme anbieten, die den aktuellen Zustand der Anlage bewerten, sondern Lösungen, die Restlebensdaueraussagen ermöglichen und kommende Anlagenausfälle prognostizieren. So bietet beispielsweise die Firma SEW EURODRIVE GmbH & Co KG das Produkt DriveRadar an, das aus Daten, die im Betrieb von SEW-Antriebssystemen aufgenommen werden, den Anlagenzustand ermittelt und mittels maschinellem Lernen und digitalem Zwilling Schadensprognosen abgibt. Die Firma Schaeffler AG baut ihr etabliertes Condition Monitoring ebenfalls hin zu Predictive Maintenance für Wälzlager aus. So werden beispielsweise durch Condition Monitoring Systeme gewonnene Daten in eine Cloud geschickt, auf die ein Berechnungstool zugreifen kann, dass die Restlaufzeit des Lagers ermittelt. Die Predictive Maintenance Lösungen vieler Unternehmen befinden sich allerdings noch in der Entwicklungs- bzw. Pilotphase. Auch die oben genannte Lösung der Schaeffler AG wird in ersten Pilotanwendungen erprobt. Ein ähnliches Bild zeigt die Befragung von 153 deutschen Maschinenbau-Unternehmen im Jahr 2017, durchgeführt von Roland Berger, dem VDMA und der Deutschen Messe. Nach der Studie befassen sich 81% der teilgenommenen Unternehmen intensiv mit Predictive Maintenance, jedoch werden konkrete Predictive Maintenance Lösungen nur von wenigen Firmen angeboten. Demnach verfügten 11% der Firmen über ein vollständiges Angebot, 30% über ein Basisangebot, 40% der Unternehmen befanden sich in der Entwicklung und Pilotierung und 19% betrieben keine Entwicklung von Predictive Maintenance Lösungen. [Fel-2017, S. 6; SEW-o.J.; Sch-o. J.]

Bei der Recherche zu Predictive Maintenance Lösungen konnte zudem festgestellt werden, dass sich in der deutschen Sprache für Predictive Maintenance das Wort vorausschauende Instandhaltung etabliert hat. Es wird auf den Internetauftritten der Unternehmen kaum von voraussagender Instandhaltung gesprochen, wie Norm DIN-13306 Predictive Maintenance bezeichnet. Die Begriffe Condition Monitoring und Predictive Maintenance werden des Weiteren oft vermischt. So wird beispielsweise bei der Vorstellung eines Referenzprojektes geschrieben, dass durch den Einsatz der beworbenen Lösung feste Wartungstermine von Predictive Maintenance abgelöst werden können. Bei der beworbenen Lösung wurden Hydraulikprüfstände mit mehreren unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, die im Hydrauliköl den Wassergehalt, die Temperatur und Partikel ermitteln. Eine Software analysiert die Daten und meldet eine Qualitätsabweichung. So kann nach Aussagen des Unternehmens beispielsweise ein

Filterwechsel nicht mehr in definierten Zeitintervallen erfolgen, sondern erst, wenn es das Bauteil erfordert. Diese Lösung stellt nach den Definitionen aus Kapitel 2.4.3 keine voraussagende Instandhaltung dar, sondern eine zustandsbasierte Instandhaltung mittels Condition Monitoring System, da der aktuelle Zustand bewertet wird, jedoch keine Prognosen über den zukünftigen Zustand erfolgen. [Bos-o. J.; DIN-13306]

Aus diesen Gründen konnte keine fertig entwickelte Predictive Maintenance Lösung aus anderen Branchen ermittelt werden, um sie auf ihre Anwendbarkeit auf Regalbediengeräte zu überprüfen.

Nach Gombé et al. müssen für die Durchführbarkeit und Implementierung von Predictive Maintenance für industrielle Systeme in der Praxis mehrere Schritte abgearbeitet werden. Als erstes müssen die kritischen Komponenten des Systems identifiziert und in einem zweiten Schritt die physikalischen Parameter definiert werden, die den Zustand des Systems repräsentativ wiedergeben. Darauffolgend müssen passende Sensoren ausgewählt werden, die die physikalischen Parameter aufnehmen können. Im letzten Schritt erfolgt die Ermittlung von Besonderheiten in den aufgenommenen Daten und die Erstellung von Modellen. [Gom-2019, S. 1619]

Werden diese Schritte auf die Durchführbarkeit und Implementierung von Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten bezogen, sind bereits heute für einige Komponenten des Regalbediengeräts mindestens die ersten zwei Schritte erfüllt. Die Fragebogenumfrage hat gezeigt, dass bei den Herstellern, Generalunternehmern und Betreibern die kritischen Komponenten, die zu einem Ausfall des Regalbediengeräts führen, bekannt sind. So ging zum Beispiel aus der Befragung der zwei Experten hervor, dass das Getriebe und die Antriebsmotoren vor allem aufgrund der hohen direkten Instandhaltungskosten und der Zeitkritikalität bei einem Ausfall zustandsüberwacht werden sollten. Eine Predictive Maintenance Lösung wäre aus diesen Gründen für diese Komponenten auch denkbar, da durch Predictive Maintenance nicht nur die Bewertung des aktuellen Zustands möglich ist, sondern auch Prognosen über den zukünftigen Zustand. Hinsichtlich der physikalischen Größen ist bekannt, dass Schäden bei Elektromotoren, wie beispielsweise Unwuchten, Ausrichtungsfehler oder Lager-schäden wie auch Getriebefehler, durch die physikalischen Größen Temperatur und Schwingung detektierbar sind. Auch der dritte von Gombé et al. genannte Schritt, wird bei den Komponenten Getriebe und Elektromotoren erfüllt. Für Getriebe und Elektromotoren sind auf dem Markt einige Sensoren bzw. Condition Monitoring Systeme erhältlich. Beispielsweise bietet die Siemens AG mit ihrem Produktportfolio SIPLUS CMS Condition Monitoring Systeme für mechanische Komponenten wie zum Beispiel Motoren und Getrieben an. Aber auch mit dem FAG SmartCheck der Schaeffler Technologies AG & Co. KG können beispielsweise von Getrieben und Motoren Schwingung und

Temperatur erfasst werden. Jedoch muss die Anwendbarkeit der auf dem Markt befindenden Sensoren auf Getriebe und Antriebsmotoren des Regalbediengeräts geprüft werden. Die im Kapitel 2.4.4 beschriebene Projektkooperation zwischen der Schaeffler AG und der SSI Schäfer GmbH zeigt, dass die Prüfung der Anwendbarkeit der Sensoren bei Regalbediengeräten bereits begonnen hat. Der letzte Schritt, die Modellbildung auf Grundlage der Daten, ist für die kritischen Komponenten des Regalbediengeräts noch nicht erfolgt. [Sie-2013; Sie-2016; Sie-2018; Sch-2019b; Kri-2018, S. 36]

Um den Einsatz von Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten zu realisieren, sollten Hersteller und Generalunternehmer abwägen, ob die oben genannten Entwicklungsschritte für die einzelnen kritischen Komponenten wie Getriebe oder Elektromotor von ihnen selbst gemacht werden sollten oder ob eine Kooperation mit den Herstellern der kritischen Komponenten bzw. der Condition Monitoring Systeme eingegangen werden sollte, wie es im Projekt der Schaeffler AG und der SSI Schäfer GmbH erfolgt ist.

So sieht es auch Stefan Godina, Head of Realization CSS bei der SSI Schäfer GmbH. In der Fachzeitschrift antriebstechnik gab er an, dass SSI Schäfer als Spezialist für Intralogistik nicht das Ziel verfolge für die einzelnen Komponenten des Regalbediengeräts Predictive Maintenance Lösungen zu entwickeln, sondern geeignete Lösungen, die der Markt anbietet in das SSI Schäfer Hardware- und Softwareportfolio einzubinden. Der Intralogistikanbieter möchte sich vor allem auf die Entwicklung von Predictive Maintenance Lösungen konzentrieren, die sich auf das Analysieren und Bewerten von Ausfallszenarien der angebotenen Produktpalette beziehen, um ein verbessertes Instandhaltungskonzept und geringere Ausfallzeiten zu realisieren. [Kri-2018, S. 37]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Ziel der Bachelorarbeit war es Ausfallursachen von Regalbediengeräten zu identifizieren und Methoden zu ermitteln, um jene Verschleiß- und Fehlerfälle detektieren zu können, die zu einem Ausfall führen. Des Weiteren sollten kritische Komponenten des Regalbediengeräts festgestellt werden. Um dieses Ziel zu erreichen wurde zum einen eine ausführliche Literaturrecherche zum anderen eine Fragebogenumfrage mit Herstellern, Generalunternehmern und Betreibern von Regalbediengeräten durchgeführt. Die Umfrage sollte Informationen aufdecken, die noch nicht in der Literatur bekannt sind. Um die Ausfallursachen, Methoden der Detektion und die kritischen Komponenten besser einordnen und bewerten zu können, wurde zu Beginn der Bachelorarbeit das Regalbediengerät beschrieben. Es wurde auf den Verwendungszweck, die Arbeitsweise, die Betriebsart und den technischen Aufbau des Regalbediengeräts eingegangen. Es folgte eine Darstellung der unterschiedlichen Ausprägungsformen der RegalbediengerätKomponenten. Neben den Unternehmensantworten aus dem Fragebogen wurden hinsichtlich Ausfallursachen, ihrer Detektionsmöglichkeiten und kritischen RegalbediengerätKomponenten Informationen aus Forschungsberichten und Fachzeitschriften zusammengetragen. Die in der Bachelorarbeit zu findenden Erkenntnisse decken somit sowohl Ergebnisse aus der Grundlagenforschung als auch Erfahrungen aus der Praxis ab. Als Ausfallursachen konnten u.a. folgende Gründe identifiziert werden:

- Ausfall durch Bedienfehler des Personals,
- Ausfall durch defekte Elektromotoren des Fahr- und Hubantriebs,
- Ausfall durch den Verschleiß von Tragmitteln (Seil-/Kettenzug),
- Ausfall durch die Kollision von Hubwagen mit dem Hochregallager,
- Ausfall durch verschlissene und/oder fehlerhafte Laufräder und Schiene,
- Ausfall durch ein Spiel oder eine Drehblockade der Führungsrollen,
- Ausfall durch defekte Frequenzumrichter,
- Ausfall durch veraltete Steuerung,
- Ausfall durch einen Festigkeitsnachlass des Masts.

Die ermittelten Methoden zur Detektion solcher Verschleiß- und Fehlerfälle reichen von der Prüfung auf Fehler und Verschleiß durch den Menschen bis zur Prüfung durch Sensoren. Hinsichtlich der Prüfung mittels Sensoren haben die Literaturrecherche als auch die Befragung der Unternehmen gezeigt, dass ein sehr großes Potenzial in der Vibrationsanalyse zusehen ist, um Ausfallquellen von Regalbediengeräten zu

ermitteln. So können laut Ergebnissen aus der Grundlagenforschung verschlissene und/ oder fehlerhafte Laufräder und Schienen, ein Spiel oder eine Drehblockade der Führungsrollen und ein Festigkeitsnachlass des Masts durch Schwingungsanalyse ermittelt werden. Auch ein Projekt aus der Praxis zeigt, dass zum Beispiel bei Elektromotoren neben der Auswertung von Temperaturverläufen ein Motordefekt durch Schwingungsaufnahme detektierbar ist. Nach Meinung der Unternehmen können ebenfalls Ausfallquellen durch die Aufnahme von Betriebsdaten, zum Beispiel Betriebsdaten des Motors oder Frequenzumrichters, ermittelt werden. Auch die Überwachung der Fahrgeräusche kann helfen, Schäden am Regalbediengerät zu detektieren. So können laut Unternehmen Fehler an den Laufrädern, Schienen und Elektromotoren des Hub- und Fahrtriebs erkannt werden.

Die kritischen Komponenten ergeben sich implizit aus den oben genannten Ausfallursachen. Kritische Komponenten sind somit zum Beispiel Elektromotoren, Tragmittel oder Laufräder. Zudem wurden im Fragebogen die Unternehmen gefragt, welche Komponenten zustandsüberwacht werden sollten. Die dort ermittelten Komponenten wurden in einem zweiten Schritt zwei Experten vorgelegt, die diese hinsichtlich dem aufzuwendenden Kosten- und Zeitfaktor bei einem Ausfall bewerteten. Aufgrund der hohen anfallenden direkten Instandhaltungskosten für Material und Personal, wie auch wegen der langen Zeit, die zur Ausfallbehebung aufgewendet werden muss, können u.a. die folgenden Komponenten für die Zustandsüberwachung bei Regalbediengeräten als wichtig angesehen werden:

- Getriebe,
- Antriebsmotoren,
- Laufrad,
- Riemen/Ketten,
- Frequenzumrichter.

Ein weiteres Ziel der Bachelorarbeit war es zu prüfen, inwieweit Predictive Maintenance bei Regalbediengeräten verbreitet ist und ob Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen auf das Regalbediengerät übertragbar sind. Auch hierfür wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt und weitere Informationen durch die Fragebogenumfrage eingeholt. Um den Begriff Predictive Maintenance definieren und abgrenzen zu können, wurden in einem ersten Schritt die wichtigsten Begrifflichkeiten, Ziele und Arten der Instandhaltung definiert. Dabei wurde neben der korrektiven Instandhaltung auch die vorausbestimmte und die zustandsorientierte Instandhaltungsart beschrieben und die Vor- und Nachteile aufgezeigt. Darauf aufbauend konnte der

Begriff Predictive Maintenance definiert werden. Bei der Bearbeitung dieses Punkts der Bachelorarbeit wurde auch aufgezeigt, dass sich Instandhaltung, Ausfälle und die Anlagenzuverlässigkeit und -verfügbarkeit gegenseitig beeinflussen. Durch die Literaturrecherche konnte gezeigt werden, dass Regalbediengeräte heute überwiegend vorausbestimmt instandgesetzt werden, dass aber auch ein paar Zustandsüberwachungssysteme für eine zustandsbasierte Instandhaltung realisiert sind. Auch bei den in der Umfrage teilgenommenen Unternehmen ist die vorausbestimmte Instandhaltung die dominierende Instandhaltungsart. Die Fragebogenumfrage ergab zudem, dass für die Mehrheit der teilgenommenen Unternehmen Predictive Maintenance wichtig bis sehr wichtig für ihr Unternehmen ist und sie entweder eine Verbesserung in ihrem Logistikprozess oder neue Geschäftschancen in Predictive Maintenance sehen. Zudem existieren, nach eigenen Angaben, in ihren Unternehmen bereits Predictive Maintenance Lösungen. Ob es sich dabei um Predictive Maintenance Lösungen oder Condition Monitoring Systeme handelt, konnte durch die Angaben der Unternehmen nicht geprüft werden. Hinsichtlich der Übertragbarkeit von Predictive Maintenance Lösungen aus anderen Branchen auf das Regalbediengerät konnte ermittelt werden, dass andere Branchen ebenfalls, wie die an der Fragebogenumfrage teilgenommenen Unternehmen, die Wichtigkeit von Predictive Maintenance erkannt haben. Es ist ein Trend zu sehen, dass die anderen Branchen die zustandsorientierte Instandhaltung hin zu Predictive Maintenance ausbauen möchten. Viele Unternehmen befinden sich hierfür gerade in der Entwicklungs- und Pilotphase. Bei den Internetauftritten vieler Hersteller konnte festgestellt werden, dass sich in der deutschen Sprache für Predictive Maintenance die vorausschauende Instandhaltung etabliert hat. DIN-13306 übersetzt im Gegensatz dazu Predictive Maintenance aber mit voraussagender Instandhaltung. Es konnte auch erkannt werden, dass die Begriffe Condition Monitoring und Predictive Maintenance oft vermischt werden. Auch deshalb konnte keine konkrete Predictive Maintenance Lösung ermittelt werden, um sie auf Regalbediengeräte zu übertragen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass für einige Komponenten des Regalbediengeräts die Entwicklungsschritte, die für eine Implementierung von Predictive Maintenance durchgeführt werden müssen, teilweise gegeben sind. Wie in Kapitel 4 dargestellt, müssen für die Durchführung von Predictive Maintenance zuerst die kritischen Komponenten ermittelt werden. In einem weiteren Schritt müssen physikalische Größen definiert werden, die den Zustand repräsentativ wiedergeben. Darauf aufbauend müssen Sensoren gefunden werden, die diese physikalischen Größen aufnehmen, um dann in einem letzten Schritt mit den gewonnenen Daten, Modelle für Predictive Maintenance Voraussagen erstellen zu können. Die Fragebogenumfrage hat gezeigt, dass beim Regalbediengerät den Herstellern, Betreibern und Generalunternehmern die kritischen Komponenten bereits bekannt sind. Des Weiteren ist bereits für einige Komponenten des Regalbediengeräts, zum Beispiel für das Getriebe und die Motoren bekannt, dass Schwingungen und Temperatur solche physikalischen Größen sind, die

den Zustand dieser Komponenten beschreiben. Für diese Komponenten sind zudem bereits einige Sensoren bzw. Condition Monitoring Systeme am Markt vorhanden, die diese beschriebenen physikalischen Größen messen können. Damit für diese Komponenten Predictive Maintenance Lösungen realisiert werden können, muss in Zukunft zum einen geprüft werden, ob die am Markt angebotenen Sensoren und Condition Monitoring Systeme am Regalbediengerät einsetzbar sind. Ist dies der Fall, müssen mit den damit gewonnenen Daten entsprechende Modelle generiert werden.

Hersteller und Generalunternehmer, die ihr Angebots- und Serviceportfolio durch Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte erweitern wollen, sollten darüber nachdenken, ob für die Realisierung dieses Vorhabens eine Kooperation zwischen ihnen und den Anbietern von kritischen Komponenten des Regalbediengeräts bzw. von Condition Monitoring Systemen sinnvoll ist. Ein Zusammenschluss beider Know-hows könnte eine schnellere Entwicklung und vor allem eine auf den Anwendungszweck passgenaue Predictive Maintenance Lösung ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [Arn-2019] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Verlag, Berlin, 2019.
- [Aus-2016] Austerjost, M.; Hegmanns, T.; Kuhn, A.: Beitrag einer nutzungsabhängigen Instandhaltung zur Planung von Leistungsverfügbarkeit. WGTl – Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V., 2016.
- [Bos-o. J.] Bosch Rexroth AG: Bosch Rexroth: Zustandbasierende Wartung bei Hydraulik-Prüfständen – mit dem Nexeed Industrial Application System. <https://www.bosch-connected-industry.com/connected-manufacturing/nexeed-production-performance-manager/referenzen/bosch-rexroth/>, Aufruf am 15.04.2020.
- [Bra-2016] Braun, M.; Bolender, S.; Koch, M.; Friedmann, A.: Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen – Abschlussbericht. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme; Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 2016.
- [Bre-2016] Breuer, L.: Leistung rauf - Kosten runter – Mit modernisierten Regalbediengeräten effektiv Strom sparen. In: Modernisierungsfibel 2016 Retrofit & Co. (2016), S. 23.
- [DIN-13306] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung. DIN EN - Norm Nr. 13306, 2018.
- [DIN-15350] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Regalbediengeräte; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnungen. DIN- Norm Nr. 15350, 1992.
- [DIN-31051] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen der Instandhaltung. DIN - Norm Nr. 31051, 2019.
- [Ebe-2014] Eberlin, S.; Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme – Eine Einführung in die Praxis. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

- [Eng-2018] Enge-Rosenblatt, O.: Predictive Maintenance - Nutzen Sie Ihre Maschinendaten – ...mit intelligenter Datenanalyse & selbstlernenden Systemen. Vortrag. SPS IPC Drives 2018, Nürnberg, 29.11.2018.
- [Fel-2017] Feldmann, S.; Rauen, H.; Lässig, R.; Synek, P.-M.; Herweg, O.: Predictive Maintenance – Service der Zukunft - und wo er wirklich steht. Roland Berger GmbH, 2017.
- [FEM-9.101] Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik: Leitfaden / Terminologie - Regalbediengerät - Definition. FEM-Richtlinie Nr. 9.101, 2016.
- [FEM-9.221] Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit. FEM-Richtlinie Nr. 9.221, 1981.
- [FEM-9.851] Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM-Richtlinie Nr. 9.851, 2003.
- [Fra-o.J.] Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM: Optimierung der Anlageneffektivität durch Machine Learning – Condition Monitoring und Predictive Maintenance. <https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/sys/maschinenmonitoring-und-regelung/predictive-maintenance-instandhaltung-machinelearning.html>, Aufruf am 13.03.2020.
- [Fro-2019] Frochte, J.: Maschinelles Lernen – Grundlagen und Algorithmen in Python. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2019.
- [Gom-2019] Gombé, B. O.; Mérou, G. G.; Breschi, K.; Guyennet, H.; Friedt, J.-M.; Felea, V.; Medjaher, K.: A SAW wireless sensor network platform for industrial predictive maintenance. In: Journal of Intelligent Manufacturing, Jg. 30 (2019) Nr. 4, S. 1617–1628.
- [Gro-2018] Große, K.; Sartorius, J.; Fittinghoff, M.: Predictive Maintenance at Automatic Storage Retrieval Machines (ASRS) with Vibration Sensors. WGTL – Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V., 2018.
- [Gün-2017] Günthner, W.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.;

- Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Springer Verlag, Berlin, 2017, S. 97–124.
- [Hod-2018] Hodapp, W.: Die Bedeutung einer zustandsorientierten Instandhaltung – Einsatz und Nutzen in der Investitionsgüterindustrie. In: Reichel, J.; Müller, G.; Haeffs, J. (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung. Springer Vieweg, Berlin, 2018, S. 135–152.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [Kas-2016] Kasper, C.: Jetzt läuft es wie von selbst – Kombiniertes Lager- und Sägezentrums auf dem neuesten Stand. In: Modernisierungsfibel 2016 Retrofit & Co. (2016), S. 40–41.
- [Kas-2018] Kasper, C.: Überschaubarer Aufwand, große Wirkung – Punktueller AKL-Retrofit im Siemens-Lieferzentrum Nürnberg. In: Modernisierungsfibel 2018 Retrofit & Co. (2018), S. 66–67.
- [Kau-2017] Kaulfuhs-Berger, J.: Retrofit sichert Leistungsfähigkeit – Zehn Prozent mehr Effizienz für mehr Liefersicherheit. In: Modernisierungsfibel 2017 Retrofit & Co. (2017), S. 20–23.
- [Kau-2018] Kaulfuhs-Berger, J.: „Lieferfähigkeit ist marktbestimmend“ – Wettbewerbsvorteile durch ausgeklügeltes Retrofit-Projekt gesichert. In: Modernisierungsfibel 2018 Retrofit & Co. (2018), S. 32–35.
- [Kri-2018] Krismeyer, J.: Verfügbarkeit erhöhen – Maintenance-4.0-Lösung für die Lagerlogistik - ein Selbsttest bei Schaeffler. In: antriebstechnik, Jg. 57 (2018) Nr. 3, S. 36–38.
- [Kum-o. J.] Kummer, M.: Smart Maintenance von Logistiksystemen – Aufbau und Implementierung einer "Predictive Maintenance"-Lösung am Regalbediengerät. <https://www.predictivemaintenance.ch/medien>, Aufruf am 16.04.2020.
- [Lau-1999] Lauber, R.; Göhner, P.: Prozessautomatisierung 1 – Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Beuth Verlag, Berlin Heidelberg, 1999.

- [Lei-2014] Leidinger, B.: Wertorientierte Instandhaltung – Kosten senken, Verfügbarkeit erhalten. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014.
- [Mar-2016] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [Müh-2018] Mühnickel, H.; Kurz, C. M.; Jussen, P.; Emonts-Holley, R.: Smart Maintenance – Instandhaltung im Kontext der Industrie 4.0. In: Reichel, J.; Müller, G.; Haeffs, J. (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung. Springer Vieweg, Berlin, 2018, S. 349–360.
- [o.V-2015] o.V.: Ausfälle im Voraus vermeiden – Fristgerechter Porzellan-Ver sand auf lange Sicht gewährleistet. In: Modernisierungsfibel 2015 Retrofit & Co. (2015), S. 40–42.
- [Ose-2008] Oser, J.: C 2.2.7 Kleinteilelager. In: Arnold, D., et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 660–668.
- [Pah-2007] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [Paw-2016] Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik – Vorgehensweisen, Methoden, Tools. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016.
- [Ryl-2010] Ryll, F.; Freund, C.: Grundlagen der Instandhaltung. In: Schenk, M. (Hrsg.): Instandhaltung technischer Systeme. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010, S. 23–102.
- [Sch-2019a] Schmidt, T.; Hahn-Woernle, P.; Heptner, F.: Lagersysteme für Stückgut. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik. Springer Vieweg, Berlin, 2019, S. 73–112.
- [Sch-2019b] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Schaeffler SmartCheck – Hohe Prozesssicherheit durch dezentrale Maschinenüberwachung. https://www.schaeffler.de/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_214_de_de.pdf, Aufruf am 10.04.2020.
- [Sch-o. J.] Schaeffler AG: Vorausschauende Instandhaltung – Den optimalen Wartungszeitpunkt vorhersagen.

- https://www.schaeffler.com/content.schaeffler.com/de/news_media/stories/digitalization_stories/predictive_maintenance/predictive_maintenance.jsp, Aufruf am 15.04.2020.
- [SEW-o.J.] SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG: DriveRadar - Zustandsbasierte Wartungsprognose für Anlagen und Systeme – Heute schon wissen, was morgen passiert. <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/24846929.pdf>, Aufruf am 18.04.2020.
- [Sie-2013] Siemens AG: Siemens Flender Condition Monitoring – Diagnostik und Online-Überwachungstechnik für höchste Antriebsverfügbarkeit. <https://www.flender.com/medias/1-Brosch-re-Flender-CM-DE.pdf?context=bWFzdGVyf-GRvY3VtZW50c3w5MTU3MDZ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmf-GRvY3VtZW50cy9oNDUvaDhhLzg3OTgzNDkzOTM5NTAucGRmfG-FIMGMyNjQ5N2ZmN2RIN2VIYzc0NmM2Yzk4YTE-zNWY0ZDkxMGI1OTQ0YTczMjY4NjlyMWNjMmEyMDBjNDMwMzM>, Aufruf am 10.04.2020.
- [Sie-2016] Siemens AG: Systemkomponenten Condition Monitoring System – Condition Monitoring Systems SIPLUS CMS zur permanenten Zustandsüberwachung von Motoren. https://mall.industry.siemens.com/collaterals/files/84/PDF/DEU_511098.PDF, Aufruf am 10.04.2020.
- [Sie-2018] Siemens AG: Fitmacher für Ihre Produktion – Effizientes Condition Monitoring zur Früherkennung mechanischer Maschinenschäden. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:023c190e-a493-4dd6-96d7-1d38c4d54919/3-66511-dffa-b10248-02brsiplu-scms-de-72_original.pdf, Aufruf am 10.04.2020.
- [Str-2015] Straßenburg-Volkman, C.: Alles auf dem neuesten Stand – Verfügbarkeit und Ersatzteilversorgung weiter gesichert. In: Modernisierungsfibel 2015 Retrofit & Co. (2015), S. 50–52.
- [Unr-2016] Unruh, V.: Frischer Schwung in der Intralogistik – Minimiertes Ausfallrisiko der Lagertechnik und langfristig gesicherte Ersatzteilversorgung. In: Modernisierungsfibel 2016 Retrofit & Co. (2016), S. 28–31.
- [VDI-4486] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Zuverlässigkeit in der Intralogistik Leistungsverfügbarkeit. VDI-Richtlinie Nr. 4486, 2012.

- [War-2015] Warmbold, J.: Alles klar im Blechlager – Spültechnikhersteller bereinigt Ausfallerscheinungen. In: Modernisierungsfibel 2015 Retrofit & Co. (2015), S. 60–63.
- [War-2016] Warmbold, J.; Koch, H.: Steuerung und Antriebstechnik im Fokus – Was Betreiber von Blechlager über ein erfolgreiches Retrofit wissen sollten - ein White Paper. In: Modernisierungsfibel 2016 Retrofit & Co. (2016), S. 10–11.
- [Wie-2019] Wierse, A.; Beigl, M.: Praktische Anwendungen der Smart Data Analytics. In: Informatik Spektrum, Jg. 42 (2019) Nr. 6, S. 401–408.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Satellitenlagers mit Regalbediengerät [FEM-9.101]	8
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der hubzeit- und fahrzeitkritischen Fächer als auch der Synchrongerade [FEM-9.101]	9
Abbildung 2-3: Aufbau und Komponenten eines Regalbediengeräts [DIN-15350; FEM-9.101; Ose-2008, S. 664]	11
Abbildung 2-4: Links: Anordnung der Führungsrollen an der Führungsschiene; rechts: Anordnung der Laufrolle, der Führungsrolle und der Gegendruckrolle an der Fahrschiene [Ose-2008, S. 664]	13
Abbildung 2-5: Reibkraftschlüssige Verbindung von zwei Bauteilen bei einachsiger Zugbelastung durch die Kraft F_L [Pah-2007, S. 586]	14
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des senkrechten Stegantriebs [Sch-2019a, S. 100]	15
Abbildung 2-7: Formschlüssige Verbindung von zwei Bauteilen bei einachsiger Zugbelastung durch die Kraft F_L [Pah-2007, S. 586]	15
Abbildung 2-8: Mitfahrender Zugmittel-Antrieb / Omega Antrieb [Ose-2008, S. 664]	16
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung eines teleskopierbaren Riemenförderers [Ose-2008, S. 667]	20
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Ziehtechnik [Ose-2008, S. 666]	20
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Greif- und Klammertechnik [Ose-2008, S. 666]	21
Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Teleskopierunterfahrtechnik [Ose-2008, S. 667]	21
Abbildung 2-13: Kritikalitätsmatrix eines Ausfalls bzw. eines Fehlers [DIN-13306]	23
Abbildung 2-14: Darstellung der Ausfallrate über die Betriebszeit [Lau-1999, S. 331; Paw-2016, S. 70; Ryl-2010, S. 48; Ebe-2014, S. 12]	24
Abbildung 2-15: Verlauf der Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ [Ebe-2014, S. 30]	26
Abbildung 2-16: Abhängigkeiten der Instandhaltungsziele [Paw-2016, S. 56]	29
Abbildung 2-17: Erste Untergliederungsebene der Instandhaltungsarten [DIN-13306]	30
Abbildung 2-18: Nutzung des Abnutzungsvorrats abhängig von der gewählten Instandhaltungsart [DIN-31051; Bra-2016, S. 7; Ryl-2010, S. 29f.]	31

Abbildung 2-19: Übersicht über Instandhaltungsarten [DIN-13306]	33
Abbildung 2-20: Schematische Darstellung einer Grenzwertüberwachung [Paw-2016, S. 169]	36
Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der Funktionsweise von überwachtem Lernen [Eng-2018, S. 7]	40
Abbildung 2-22: Nutzen von Predictive Maintenance für Kunden von deutschen Maschinenbau-Unternehmen [Fel-2017, S. 7]	41
Abbildung 2-23: Wahrscheinlichkeitsdichten der Beschleunigungsamplituden senkrecht zur Fahrriichtung bei einem Führungsspiel von 0 mm (blau) und einem Führungsspiel von 1 mm (rot) [Bra-2016, S. 48]	49
Abbildung 2-24: Links: arithmetische Mittelwerte der Beschleunigungen für jeden gemessenen Zustand des äußeren Sensors; rechts: arithmetische Mittelwerte der Beschleunigungen für jeden gemessenen Zustand des inneren Sensors [Bra-2016, S. 36f.]	51
Abbildung 2-25: Schematische Darstellung eines Risses im Übergang vom Fahrwerk zum Mast [Bra-2016, S. 56]	52
Abbildung 2-26: Beschleunigungsverlauf über drei Radumdrehungen des Sensors am Rad mit Klebestreifen [Gro-2018, S. 2]	54
Abbildung 3-1: Übersicht der teilgenommenen Unternehmen	57
Abbildung 3-2: Altersstruktur der gewarteten und betriebenen Regalbediengeräte der teilgenommenen Unternehmen	60
Abbildung 3-3: Aufgetretene Ausfallursachen im Jahr 2019 und ihre Verteilung in Prozent	62
Abbildung 3-4: Verbreitung von realisierter Zustandsüberwachung von Komponenten der Unternehmen	68
Abbildung 3-5: Bevorzugte Energie- und Datenübertragungslösung für Sensoren zur Zustandsüberwachung	70
Abbildung 3-6: Einschätzung der Wichtigkeit von Predictive Maintenance für Regalbediengeräte für das Unternehmen	71
Abbildung 3-7: Einschätzung der Frage, ob Predictive Maintenance den Logistikprozess verbessern bzw. ob durch Predictive Maintenance neue Geschäftschancen entstehen	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vor- und Nachteile der korrektiven Instandhaltung nach [Lei-2014, S. 20; Ryl-2010, S. 28; Aus-2016, S. 1; Bra-2016, S. 23]	32
Tabelle 2-2:	Vor- und Nachteile der vorausbestimmten Instandhaltung nach [Müh-2018, S. 354; DIN-13306; Bra-2016, S. 6, 23; Ryl-2010, S. 29f.]	34
Tabelle 2-3:	Vor- und Nachteile der zustandsbasierten Instandhaltung nach [Ryl-2010, S. 30f.; Müh-2018, S. 354; Bra-2016, S. 7f., 23; Aus-2016, S. 2]	37
Tabelle 3-1:	Antwortmöglichkeiten im Fragebogen bezüglich des Regalbediengerättyps	58
Tabelle 3-2:	Häufigkeit der Rangziffernennung des vertriebenen/gewarteten/betriebenen Typs	59
Tabelle 3-3:	Gesamtanzahl der gewarteten und betriebenen Regalbediengeräte der teilgenommenen Unternehmen	59
Tabelle 3-4:	Aufgeführte Instandhaltungsarten im Fragebogen mit Rangziffernvergabe	61
Tabelle 3-5:	Häufigkeit der Rangziffernennung bei den unterschiedlichen Instandhaltungsarten	62
Tabelle 3-6:	Mittelwert über die Rangziffern für jede Instandhaltungsart	62
Tabelle 3-7:	Übersicht über die Komponenten, die nach Unternehmensmeinung zustandsüberwacht werden sollten	68
Tabelle 3-8:	Reihenfolge der Komponenten hinsichtlich der Wichtigkeit für die Zustandsüberwachung	70

5. Welche Instandhaltungsstrategie empfehlen Sie Ihrem Kunden? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten empfohlen, 4 = am wenigsten häufig empfohlen).

Instandhaltungsstrategie	Rangziffern
vorausbestimmte Instandhaltung*	
zustandsorientierte Instandhaltung**	
sofortige korrektive Instandhaltung***	
aufgeschobene korrektive Instandhaltung****	

*Instandhaltung, die in festgelegten Zeitabständen oder nach einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten erfolgt. Der tatsächliche Zustand des Instandhaltungsobjekts wird nicht berücksichtigt.
 **Instandhaltung, die auf Grund der Beurteilung des physikalischen Zustands des Instandhaltungsobjekts und Zustandsanalyse erfolgt.
 ***Instandhaltung, die unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt.
 ****Instandhaltung, die nicht unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt, sondern nach vorgeschriebenen Instandhaltungsregeln.

6. Welche Befunde müssen bei einem Regalbediengerät vorliegen, damit Sie Ihrem Kunden ein Retrofit empfehlen und nicht nur eine Instandhaltung? Wie stark müssen diese Befunde ausgeprägt sein? Zum Beispiel: Befund: Nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards, Ausprägung: Verstoß gegen die aktuell geltende Norm.

Befunde	Ausprägung
Veraltete Steuerungsbauteile	
Veraltete Elektronik	
nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards	<i>bitte ausfüllen</i>
mechanischer Verschleiß hoch beanspruchter Bauteile (z.B. Lauffäder, Schienen)	
Abkündigung von Ersatzteilen	
<i>bitte nennen Sie weitere Befunde</i>	

Ausfallursachen									
Ausfallursache	Häufigkeit = Anzahl der Ausfälle innerhalb des letzten Jahres, z.B. Verschleiß Laufrad; 5 Fälle in 2019.		Entwicklung der Schadensursache im Vergleich während der letzten 30 Jahre, bitte ankreuzen.				Grund für die Tendenz, z.B. Verschleiß Laufrad Tendenz sinkend auf Grund von Materialverbesserung.		
	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	Tendenz zunehmend		Tendenz gleichbleibend			Tendenz abnehmend	
			AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL
Verschleiß Laufrad									
Verschleiß Schiene									
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)									
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb									
Ausfall Elektromotor von Hubtrieb									
Ausfall Leistungseinheit /Umrichter									
Ausfall Steuerung									
Kollision Hubwagen mit Hochregal									
Ausfall durch Festigkeitsachlass Mast									
Ausfall Bedienfehler durch Personal									
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>									

7. Welche Ausfallursachen von Regalbediengeräten sind Ihnen innerhalb des letzten Jahres 2019 gemeldet worden/bekannt? Wenn möglich, bitte nennen Sie wie häufig diese Ausfälle innerhalb von 2019 aufgetreten sind und ob dieser Schaden im Vergleich zu den letzten 30 Jahren zunehmend, gleichbleibend oder abnehmend ist.

Ausfallursache	Durchgeführte Gegenmaßnahme zur Behebung des Schadens, z.B. Verschleiß Laufrad: Austausch des Laufrads.		Methode der Detektion, z.B. Verschleiß Laufrad: Vibrationsüberwachung des Laufrads mittels Schwingungssensoren.	
	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern
Verschleiß Laufrad				
Verschleiß Schiene				
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)				
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb				
Ausfall Elektromotor von Hubtrieb				
Ausfall Leistungseinheit /Umrichter				
Ausfall Steuerung				
Kollision Hubwagen mit Hochregal				
Ausfall durch Festigkeitsachlass Mast				
Ausfall Bedienfehler durch Personal				
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>				

8. Welche Gegenmaßnahmen zur Behebung der Ausfallursachen gibt es? Welche Möglichkeiten gibt es die Ausfallursachen frühzeitig zu detektieren?

9. Bitte nennen Sie die Gründe für den Ausfall der Steuerung eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern hinsichtlich der Häufigkeit (1 = häufigster Grund, 3 = seltenster Grund).

	Gründe	Rangziffer
AKL		
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern		

10. Eine Antriebseinheit besteht aus Leistungseinheit, Motor, Getriebe und Übertragungsgliedern. Bitte nennen Sie Gründe für einen Ausfall der Fahrtriebseinheit eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten auftretender Ausfallgrund), Beispiel: Motor; Ausfall Lager; Leistungseinheit; Ausfall auf Grund von Netzschwankungen.

Komponenten einer Fahrtriebseinheit	Ausfallgründe der Komponente	Rangziffer
Leistungseinheit		
Motor		
Getriebe		
Übertragungsglieder		

Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance

11. Werden bei den Regalbediengeräten, die Sie herstellen, Komponenten zustandsüberwacht, wenn ja welche?

ja	nein	welche?

12. Welche Komponenten sollten zustandsüberwacht werden? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = Zustandsüberwachung dieser Komponente ist am wichtigsten).

Komponente	Rangziffer

13. Zur Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance wird Messensorik benötigt. Diese muss mit Energie versorgt werden und Daten austauschen. Würden Sie eine verkabelte Lösung zur Energie- und Datenübertragung oder eine kabellose Lösung (z.B. via Batterie und WLAN) bevorzugen? Bitte kreuzen Sie an.

Kabellos, Messensorik sollte über eigenes Strom- und Datenübertragungsmodul verfügen	Strom- und Datenversorgung via Kabel
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

14. Wie wichtig ist Predictive Maintenance in Bezug auf Regalbediengeräte für Ihr Unternehmen? Bitte kreuzen Sie an.

sehr wichtig	wichtig	weniger wichtig	unwichtig
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

15. Sehen Sie in Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte neue Geschäftschancen für Ihr Unternehmen? Bitte kreuzen Sie an.

ja	nein
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

16. Gibt es in Ihrem Produkt-/Service Portfolio bereits Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte, zur Vorhersagung von Schadensentwicklungen? Bitte kreuzen Sie an. Wenn ja, welche?

ja	nein	welche?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

Kommentar und Anregungen

Möchten Sie uns noch etwas mitteilen? Hier finden Sie Platz für Anregungen, Wünsche, Kommentare oder Kritik.

<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>

Anhang B Fragebogen Generalunternehmer

Fragebogen über Ausfallsursachen und voraussagende Instandhaltung von Regalbediengeräten

Fragebogen für Generalunternehmer von Regalbediengeräten

Sehr geehrte Damen und Herren, vielen Dank, dass Sie sich kurz Zeit nehmen zur Beantwortung dieses Fragebogens. In meiner Bachelorarbeit untersuche ich die Potenziale für den Einsatz von voraussagender Instandhaltung bei Regalbediengeräten. **Ziel** des Fragebogens ist das **Identifizieren von Ausfallgründen von Regalbediengeräten** und das **Ermitteln von häufig ausfallenden Komponenten**, die deshalb zustandsüberwacht werden sollen. Bei dem Fragebogen werden sowohl **vollautomatisierte Kleinteilelager (AKL)**, als auch **vollautomatisierte Regalbediengeräte (RBG) in Hochregallagern** berücksichtigt.

Typisierung, Zuverlässigkeit, Retrofit

1. Welchen Typ von Regalbediengeräten warten Sie wie häufig? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten, 5 = am wenigsten häufig).

Typ Regalbediengerät	Rangziffer
teilautomatisiertes Kleinteilelager	
vollautomatisiertes Kleinteilelager	
teilautomatisiertes RBG in Hochregallagern	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	
anderer Typ*	

*bitte geben Sie den Typ an:

2. Bitte geben Sie an wie viele Regalbediengeräte sich in welchem Alter befinden. Zum Beispiel: 2 Regalbediengeräte sind zwischen 5 Jahren und 10 Jahren alt.

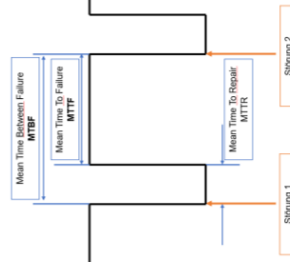
Typ Regalbediengerät	<5 Jahre	5 Jahre - 10 Jahre	10 Jahre - 15 Jahre	15 Jahre - 20 Jahre	20 Jahre - 25 Jahre	>25 Jahre
AKL						
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern						

3. Wie hoch ist die Mean Time To Repair des ältesten Regalbediengeräts, das Sie warten?

Typ Regalbediengerät	MTTR
AKL	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	

4. Wie hoch ist die Mean Time Between Failure des ältesten Regalbediengeräts, das Sie warten?

Typ Regalbediengerät	MTBF
AKL	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	



Unter Mean Time To Repair (bzw. Mean Time To Recover) wird die durchschnittliche Zeit verstanden, die zur Reparatur nach einem Ausfall benötigt wird. Die Mean Time To Repair wird berechnet durch:

$$MTTR = \frac{\text{Summe der einzelnen Ausfallzeiten}}{\text{Anzahl der Störungen}}$$

Die Mean Time Between Failure beschreibt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Ausfällen. Sie wird berechnet durch:

$$MTBF = \frac{\text{Gesamte Einschaltzeit} - \text{Summe der einzelnen Ausfallzeiten}}{\text{Anzahl der Störungen}}$$

5. Wenn es zu einem Ausfall eines Regelbediengeräts kommt, gibt es redundante Systeme, die einen Weiterbetrieb ermöglichen? Wenn ja, geben Sie diese bitte an.

_____ *bitte ausfüllen*

_____ *bitte ausfüllen*

_____ *bitte ausfüllen*

6. Welche Instandhaltungsstrategie wird von Ihnen / Ihren Kunden wie häufig eingesetzt? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten, 4 = am wenigsten häufig).

Instandhaltungsstrategie	Rangziffern
vorausbestimmte Instandhaltung*	
Zustandsorientierte Instandhaltung**	
soborlige korrektive Instandhaltung***	
aufgeschobene korrektive Instandhaltung****	

*Instandhaltung, die in festgelegten Zeitabständen oder nach einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten erfolgt. Der tatsächliche Zustand des Instandhaltungsobjekts wird nicht berücksichtigt.

**Instandhaltung, die auf Grund der Beurteilung des physikalischen Zustands des Instandhaltungsobjekts und Zustandsanalyse erfolgt.

***Instandhaltung, die unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt.

****Instandhaltung, die nicht unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt, sondern nach vorgeschriebenen Instandhaltungsregeln.

7. Welche Befunde müssen bei einem Regelbediengerät vorliegen, damit Sie Ihrem Kunden ein Retrofit empfehlen und nicht nur eine Instandhaltung? Wie stark müssen diese Befunde ausgeprägt sein? Zum Beispiel: Befund: Nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards, Ausprägung: Verstoß gegen die aktuell geltende Norm.

Befunde	Ausprägung
Veraltete Steuerungsbauteile	
Veraltete Elektronik	
nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards	<i>bitte ausfüllen</i>
mechanischer Verschleiß hoch beanspruchter Bauteile (z.B. Laufräder, Schienen)	
Abkündigung von Ersatzteilen	
<i>bitte nennen Sie weitere Befunde</i>	

Ausfallursachen				
Ausfallursache	Häufigkeit = Anzahl der Ausfälle innerhalb des letzten Jahres, z.B. Verschleiß Laufrad: 5 Fälle in 2019.	Entwicklung der Schadensursache im Vergleich während der letzten 30 Jahre, bitte ankreuzen.		Grund für die Tendenz, z.B. Verschleiß Laufrad Tendenz sinkend auf Grund von Materialverbesserung.
		Tendenz zunehmend	Tendenz gleichbleibend	
Verschleiß Laufrad	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern
Verschleiß Schiene				
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)				
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb				
Ausfall Elektromotor von Hubtrieb				
Ausfall Leistungseinheit/Umrichter				
Ausfall Steuerung				
Kollision Hubwagen mit Hochregal				
Ausfall durch Festigkeitsnachlass Mast				
Ausfall Bedienfehler durch Personal				
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>				

8. Welche Ausfallursachen von Regelbediengeräten sind innerhalb des letzten Jahres 2019 aufgetreten? Bitte nennen Sie wie häufig diese Ausfälle innerhalb von 2019 aufgetreten sind und ob dieser Schaden im Vergleich zu den letzten 30 Jahren zunehmend, gleichbleibend oder abnehmend ist.

Ausfallursache	Durchgeführte Gegenmaßnahme zur Behebung des Schadens, z.B. Verschleiß Laufrad: Austausch des Lauftrads.	Methode der Detektion, z.B. Verschleiß Laufrad: Vibrationsüberwachung des Lauftrads mittels Schwingungssensoren.	
		vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL
Verschleiß Laufrad	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL
Verschleiß Schiene			
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)			
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb			
Ausfall Elektromotor von Hubtrieb			
Ausfall Leistungseinheit/Umrichter			
Ausfall Steuerung			
Kollision Hubwagen mit Hochregal			
Ausfall durch Festigkeitsnachlass Mast			
Ausfall Bedienfehler durch Personal			
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>			

9. Welche Gegenmaßnahmen zur Behebung der Ausfallursachen gibt es? Welche Möglichkeiten gibt es die Ausfallursachen frühzeitig zu detektieren?

10. Bitte nennen Sie die Gründe für den Ausfall der Steuerung eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern hinsichtlich der Häufigkeit (1 = häufigster Grund, 3 = seltenster Grund).

	Gründe	Rangziffer
AKL		
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern		

11. Eine Antriebseinheit besteht aus Leistungseinheit, Motor, Getriebe und Übertragungsgliedern. Bitte nennen Sie Gründe für einen Ausfall der Fahrtriebseinheit eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten auftretender Ausfallgrund). Beispiel: Motor; Ausfall Lager; Leistungseinheit; Ausfall auf Grund von Netzschwankungen.

Komponenten einer Fahrtriebseinheit	Ausfallgründe der Komponente	Rangziffer
Leistungseinheit		
Motor		
Getriebe		
Übertragungsglieder		

Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance

12. Werden bei den Regalbediengeräten, die Sie warten, Komponenten zustandsüberwacht, wenn ja welche?

ja	nein	welche?

13. Welche Komponenten sollten zustandsüberwacht werden? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = Zustandsüberwachung dieser Komponente ist am wichtigsten).

Komponente	Rangziffer

14. Zur Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance wird Messensornik benötigt. Diese muss mit Energie versorgt werden und Daten austauschen. Würden Sie eine verkabelte Lösung zur Energie- und Datenübertragung oder eine kabellose Lösung (z.B. via Batterie und WLAN) bevorzugen? Bitte kreuzen Sie an.

kabellos, Messensornik sollte über eigenes Strom- und Datenübertragungsmodul verfügen via Kabel	Strom- und Datenversorgung via Kabel
---	--------------------------------------

15. Wie wichtig ist Predictive Maintenance in Bezug auf Regalbediengeräte für Ihr Unternehmen? Bitte kreuzen Sie an.

sehr wichtig	wichtig	weniger wichtig	unwichtig
--------------	---------	-----------------	-----------

16. Sehen Sie in Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte neue Geschäftschancen für Ihr Unternehmen? Bitte kreuzen Sie an.

ja	nein
----	------

17. Gibt es in Ihrem Produkt/Service Portfolio bereits Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte, zur Vorhersagung von Schadensentwicklungen? Bitte kreuzen Sie an. Wenn ja, welche?

ja	nein	welche?

Kommentar und Anregungen

Möchten Sie uns noch etwas mitteilen? Hier finden Sie Platz für Anregungen, Wünsche, Kommentare oder Kritik.

Anhang C Fragebogen Betreiber

Fragebogen über Ausfallsursachen und voraussagende Instandhaltung von Regalbediengeräten

Fragebogen für Betreiber von Regalbediengeräten

Sehr geehrte Damen und Herren, vielen Dank, dass Sie sich Zeit nehmen zur Beantwortung dieses Fragebogens. In meiner Bachelorarbeit untersuche ich die Potenziale für den Einsatz von voraussagender Instandhaltung bei Regalbediengeräten. **Ziel** des Fragebogens ist das **Identifizieren von Ausfallgründen von Regalbediengeräten** und das **Ermitteln von häufig ausfallenden Komponenten**, die deshalb zustandsüberwacht werden sollen. Bei dem Fragebogen werden sowohl **vollautomatisierte Kleinteilelager (AKL)**, als auch **vollautomatisierte Regalbediengeräte (RBG) in Hochregallagern** berücksichtigt.

Typisierung, Zuverlässigkeit, Retrofit

1. Welchen Typ von Regalbediengeräten betreiben Sie wie häufig? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten, 5 = am wenigsten häufig).

Typ Regalbediengerät	Rangziffer
teilautomatisiertes Kleinteilelager	
vollautomatisiertes Kleinteilelager	
teilautomatisiertes RBG in Hochregallagern	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	
anderen Typ*	
*bitte geben Sie den Typ an:	

2. Bitte geben Sie an wie viele Regalbediengeräte sich in welchem Alter befinden. Zum Beispiel: 2 Regalbediengeräte sind zwischen 5 Jahren und 10 Jahren alt.

Typ Regalbediengerät	<5 Jahre	5 Jahre - 10 Jahre	10 Jahre - 15 Jahre	15 Jahre - 20 Jahre	20 Jahre - 25 Jahre	>25 Jahre
AKL						
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern						

3. Wie hoch ist die Mean Time To Repair des ältesten Regalbediengeräts, das Sie betreiben?

Typ Regalbediengerät	MTTR
AKL	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	

Unter Mean Time To Repair (bzw. Mean Time To Recover) wird die durchschnittliche Zeit verstanden, die zur Reparatur nach einem Ausfall benötigt wird. Die Mean Time To Repair wird berechnet durch:

$$MTTR = \frac{\text{Summe der einzelnen Ausfallzeiten}}{\text{Anzahl der Störungen}}$$

4. Wie hoch ist die Mean Time Between Failure des ältesten Regalbediengeräts, das Sie betreiben?

Typ Regalbediengerät	MTBF
AKL	
vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	

Die Mean Time Between Failure beschreibt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Ausfällen. Sie wird berechnet durch:

$$MTBF = \frac{\text{Gesamte Einschaltzeit} - \text{Summe der einzelnen Ausfallzeiten}}{\text{Anzahl der Störungen}}$$



5. Wenn es zu einem Ausfall eines Regelbediengeräts kommt, gibt es redundante Systeme, die einen Weiterbetrieb ermöglichen? Wenn ja, geben Sie diese bitte an.

6. Welche Instandhaltungsstrategie wird von Ihnen wie häufig eingesetzt? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten, 4 = am wenigsten häufig)

Instandhaltungsstrategie vorausbestimmte Instandhaltung*	Rangziffern
zustandsorientierte Instandhaltung**	
sofortige korrektive Instandhaltung***	
aufgeschobene korrektive Instandhaltung****	

*Instandhaltung, die in festgelegten Zeitabständen oder nach einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten erfolgt. Der tatsächliche Zustand des Instandhaltungsobjekts wird nicht berücksichtigt.
 **Instandhaltung, die auf Grund der Beurteilung des physikalischen Zustands des Instandhaltungsobjekts und Zustandsanalyse erfolgt.
 ***Instandhaltung, die unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt.
 ****Instandhaltung, die nicht unmittelbar nach einer Fehlererkennung/Ausfall des Instandhaltungsobjekts erfolgt, sondern nach vorgeschrieben Instandhaltungsregeln.

7. Welche Befunde müssen bei einem Regelbediengerät vorliegen, damit Sie ein Retrofit durchführen und nicht nur eine Instandhaltung? Wie stark müssen diese Befunde ausgeprägt sein? Zum Beispiel: Befund: Nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards, Ausprägung: Verstoß gegen die aktuell geltende Norm.

Befunde	Ausprägung
Veraltete Steuerungsbauteile	
Veraltete Elektronik	
nicht mehr aktuelle Sicherheitsstandards	_____
mechanischer Verschleiß hoch beanspruchter Bauteile (z.B. Laufräder, Schienen)	_____
Abkündigung von Ersatzteilen	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
Bitte nennen Sie weitere Befunde	_____
_____	_____
_____	_____

Ausfallursachen										
Ausfallursache	Häufigkeit = Anzahl der Ausfälle innerhalb des letzten Jahres, z.B. Verschleiß Laufrad: 5 Fälle in 2019.		Entwicklung der Schadensursache im Vergleich während der letzten 30 Jahre, bitte ankreuzen.				Grund für die Tendenz, z.B. Verschleiß Laufrad Tendenz sinkend auf Grund von Materialverbesserung.			
	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern
Verschleiß Laufrad										
Verschleiß Schiene										
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)										
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb										
Ausfall Elektromotor von Hubantrieb										
Ausfall Leistungseinheit /Umrichter										
Ausfall Steuerung										
Kollision Hubwagen mit Hochregal										
Ausfall durch Festigkeitsnachlass Mast										
Ausfall Bedienthier durch Personal										
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>										

Ausfallursache	Durchgeführte Gegenmaßnahme zur Behebung des Schadens, z.B. Verschleiß Laufrad: Austausch des Laufrads.		Methode der Detektion, z.B. Verschleiß Laufrad: Vibrationsüberwachung des Laufrads mittels Schwingungssensoren.	
	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern	AKL	vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern
Verschleiß Laufrad				
Verschleiß Schiene				
Verschleiß Tragmittel (Seilzug/Kettenzug)				
Ausfall Elektromotor von Fahrtrieb				
Ausfall Elektromotor von Hubantrieb				
Ausfall Leistungseinheit /Umrichter				
Ausfall Steuerung				
Kollision Hubwagen mit Hochregal				
Ausfall durch Festigkeitsnachlass Mast				
Ausfall Bedienthier durch Personal				
<i>bitte nennen Sie weitere Ausfallursachen</i>				

8. Welche Ausfallursachen von Regalbediengeräten sind innerhalb des letzten Jahres 2019 aufgetreten? Bitte nennen Sie wie häufig diese Ausfälle innerhalb von 2019 aufgetreten sind und ob dieser Schaden im Vergleich zu den letzten 30 Jahren zunehmend, gleichbleibend oder abnehmend ist.

9. Welche Gegenmaßnahmen zur Behebung der Ausfallursachen gibt es? Welche Möglichkeiten gibt es die Ausfallursachen frühzeitig zu detektieren?

10. Bitte nennen Sie die Gründe für den Ausfall der Steuerung eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern hinsichtlich der Häufigkeit (1 = häufigster Grund, 3 = seltenster Grund).

Gründe	Rangziffer

Gründe	Rangziffer

vollautomatisiertes RBG in Hochregallagern

11. Eine Antriebseinheit besteht aus Leistungseinheit, Motor, Getriebe und Übertragungsgliedern. Bitte nennen Sie Gründe für einen Ausfall der Fahrtriebseinheit eines Regalbediengeräts. Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = am häufigsten auftretender Ausfallgrund). Beispiel: Motor; Ausfall Lager; Leistungseinheit; Ausfall auf Grund von Netzschwankungen.

Komponenten einer Fahrtriebseinheit	Ausfallgründe der Komponente	Rangziffer
Leistungseinheit		
Motor		
Getriebe		
Übertragungsglieder		

Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance

12. Werden bei den Regalbediengeräten, die Sie betreiben, Komponenten zustandsüberwacht, wenn ja welche?

ja	nein	welche?

13. Welche Komponenten sollten zustandsüberwacht werden? Vergeben Sie bitte Rangziffern (1 = Zustandsüberwachung dieser Komponente ist am wichtigsten).

Komponente	Rangziffer

14. Zur Zustandsüberwachung und Predictive Maintenance wird Messensornik benötigt. Diese muss mit Energie versorgt werden und Daten austauschen. Würden Sie eine verkabelte Lösung zur Energie- und Datenübertragung oder eine kabellose Lösung (z.B. via Batterie und WLAN) bevorzugen? Bitte kreuzen Sie an.

Kabellos, Messensornik sollte über eigenes Strom- und Datenübertragungsmodul / kabellos via Kabel	Strom- und Datenversorgung via Kabel
---	--------------------------------------

15. Wie wichtig ist Predictive Maintenance in Bezug auf Regalbediengeräte für Ihr Unternehmen? Bitte kreuzen Sie an.

sehr wichtig	wichtig	weniger wichtig	unwichtig
--------------	---------	-----------------	-----------

16. Sehen Sie in Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte eine Verbesserung für Ihren Logistikprozess? Bitte kreuzen Sie an.

ja	nein
----	------

17. Gibt es in Ihrem Unternehmen bereits Predictive Maintenance Lösungen für Regalbediengeräte, zur Vorhersagung von Schadensentwicklungen? Bitte kreuzen Sie an.

ja	nein
----	------

Kommentar und Anregungen

Möchten Sie uns noch etwas mitteilen? Hier finden Sie Platz für Anregungen, Wünsche, Kommentare oder Kritik.

