

Methode zur Analyse der Dringlichkeit von Modernisierungen in der Intralogistik

Method to analyze the urgency of Retrofits in intralogistics

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Bachelor of Science
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: Marten Dybus

Eingereicht am: 09.01.2021 in Garching

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis	VII
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation und Problem	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Intralogistik	7
2.1 Regalbediengeräte	7
2.1.1 Einordnung und Verwendung	7
2.1.2 Technischer Aufbau	9
2.1.3 Funktion und Arbeitsweise	12
2.2 Instandhaltung	14
2.2.1 Technische Verfügbarkeit	14
2.2.2 Gesamtverfügbarkeit	15
2.2.3 Instandhaltungsarten	17
2.3 Ungeplante Ausfälle	19
2.3.1 Ausfallarten und -ursachen	19
2.3.2 Ausfallwahrscheinlichkeiten	22
2.3.3 Ausfallkosten	24
2.3.4 Ersatzteilmanagement	27
2.4 Modernisierung	30
2.4.1 Definition und Arten	30
2.4.2 Einflussfaktoren	30
3 Wirtschaftlichkeitsanalysen	33
3.1 Klassifizierung von Bewertungsmethoden	33
3.2 Vorstellung von Bewertungsmethoden	37
3.2.1 Nutzwertanalyse	37
3.2.2 Kosten-Nutzen-Analyse	40

3.2.3	Kostenwirksamkeitsanalyse	43
3.2.4	Zusammenfassung und Fazit	45
4	Methodik zur Datenerhebung	47
4.1	Wahl der Methodik	47
4.1.1	Ziel der Datenerhebung	47
4.1.2	Auswahl der Herangehensweise	47
4.1.3	Auswahl des Teilnehmerkreises	49
4.2	Aufbau der Expertengespräche	50
4.2.1	Erstellung des Leitfadens	50
4.2.2	Kategorisierung und Einordnung	51
4.2.3	Aktueller Entscheidungsprozess	52
4.2.4	Instandhaltung	53
4.2.5	Folgen ungeplanter Ausfälle	54
4.2.6	Entscheidungsfaktoren	56
5	Auswertung der Daten	57
5.1	Kategorisierung und Überblick	57
5.2	Aktuelles Vorgehen	59
5.3	Einflussfaktoren auf die Entscheidung	62
5.4	Folgen ungeplanter Ausfälle	64
6	Methode zur Dringlichkeitsbewertung	71
6.1	Aufbau der Methode	71
6.2	Anwendung der Methode	82
6.3	Analyse der Ersatzteilsituation	95
6.3.1	Aufbau der Methode zur Ersatzteilanalyse	95
6.3.2	Anwendung der Methode zur Ersatzteilanalyse	99
6.4	Sensitivitätsanalyse	102
6.4.1	Verschiedene Kostenprognosen	102
6.4.2	Verschiedene Zeitpunkte	105
6.5	Bewertung der Anwendbarkeit	108
7	Zusammenfassung und Fazit	113
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Ausblick	115
	Literaturverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	127

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AKL	Automatisches Kleinteilelager
AP	Auslagerpunkt
bzw.	beziehungsweise
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	Doppelspiel
EP	Einlagerpunkt
ES	Einzelspiel
FEM	Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik
GF	Geschäftsführer
ges.	gesamt
HRL	Hochregallager
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse
KWA	Kostenwirksamkeitsanalyse
LAM	Lastaufnahmemittel
LE	Ladeeinheit
max.	maximal
NWA	Nutzwertanalyse
PK	Personalkosten
RBG	Regalbediengerät

RF	Retrofit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	[min]	Ausfallzeit
A	[-]	Ausfallwirkung
A_m	[-]	Alternative m
c_{nm}	[€]	Kosten für Einzelkosten n der Alternative m
C_m	[€]	Kosten der Alternative m
$C_{m,fix}$	[€]	Fixkosten der Alternative m
$C_{m,t}$	[€]	Kosten der Alternative m im Jahr t
$C_{m,t,a}$	[€]	Kosten der Alternative m im Jahr t für Ausfallzeit a
$C_{m,t,a,k}$	[€]	Einzelkosten k der Alternative m im Jahr t für Ausfallzeit a
$C_{m,var}$	[€]	Variable Kosten der Alternative m
e_{nm}	[-]	Zielerfüllungsgrad von Teilziel n der Alternative m
g_n	[%]	Gewichtungsfaktor für Teilziel n
k	[-]	Einzelne Kosten bei ungeplanten Ausfällen
k_{ges}	[-]	Verfügbarkeitsfaktor für Ersatzteile
k_n	[-]	Kriterium n der Ersatzteilverfügbarkeit
KW_m	[-]	Kostenwirksamkeit der Alternative m
$MTBF$	[h]	Mean Time Between Failure

$MTTR$	[h]	Mean Time To Repair
n_{nm}	[-]	Teilnutzwert von Teilziel n der Alternative m
N_m	[-]	Nutzwert der Alternative m
p	[%]	Zinssatz
q	[-]	Diskontierungsfaktor
R	[-]	Risiko
T_A	[h]	Ausschaltzeit
T_E	[h]	Einschaltzeit
t	[Jahre]	Zeit
$V_{KNA,m}$	[-]	Kosten-Nutzen-Verhältnis von Alternative m
w_{nm}	[-]	Zielertrag von Teilziel n der Alternative m
W	[%]	Ausfallwahrscheinlichkeit
W_{BW}	[€]	Barwert
Z_n	[-]	Teilziel n
Z_t	[€]	Zahlungsstrom zum Zeitpunkt t
Z_0	[€]	Zahlungsstrom zum Zeitpunkt 0
$\Delta_{KNA,m}$	[€]	Kosten-Nutzen-Differenz von Alternative m
η	[%]	Verfügbarkeit

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Problem

Industrie und Wirtschaft zeichnen sich in der heutigen Zeit durch einen hohen Grad an Globalisierung aus. Als Folge stetig wachsender globaler Konkurrenz ist der Wettbewerbs- und Kostendruck auf die Unternehmen groß. Weltweit agierende Konzerne sind davon gleichermaßen betroffen wie mittelständische Unternehmen. Diese können selbst international tätig sein oder als Zulieferer für exportierende Großunternehmen fungieren, wodurch der globale Kosten- und Innovationsdruck spürbar ist. [Sch-2003, S. 1261]

Folglich wachsen branchenübergreifend die Anforderungen an Lieferketten nach höherer Flexibilität und Komplexität bei gleichbleibender Leistung und Zuverlässigkeit [Fel-2010, S. 29; Leh-2016, S. 20]. Dabei sind Unternehmen stark abhängig von einem funktionierenden Materialfluss, welcher als Verkettung aller Vorgänge bei Gewinn, Bearbeitung und Verteilung von Gütern innerhalb fester Grenzen aufgefasst werden kann [Hom-2018, S. 2].

Regalbediengeräten (RBG), welche in Hochregallagern (HRL) und automatischen Kleinteilelagern (AKL) eingesetzt werden, kommen in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle zu [FEM-9.851; Fis-2004, S. 72ff.]. Als kritische Komponente in intralogistischen Anlagen hat der Ausfall eines RBG unmittelbaren Einfluss auf die Gesamt- und Leistungsverfügbarkeit des Systems [VDI-3581; VDI-4486]. Bei Ausfällen können unterschiedlich hohe Ausfallkosten entstehen, welche sich negativ auf die wirtschaftliche Situation der Unternehmen auswirken [Paw-2016, S. 70ff.].

Um die Funktion von Regalbediengeräten und damit einen funktionierenden Materialfluss über einen möglichst langen Zeitraum sicherzustellen, werden verschiedene Arten der Instandhaltung durchgeführt. Neben vorbeugenden Maßnahmen wie Inspektionen und Wartungen fallen darunter auch korrektive Handlungen [DIN-31051]. Trotz Instandhaltung erhöhen sich mit Alterung der Anlage die Ausfallwahrscheinlichkeit und gleichbedeutend die daraus resultierenden Kosten [Hod-2018, S. 142f.]. So ist mit der Zeit neben Instandhaltung die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen eine Möglichkeit, auf Ausfälle zu reagieren [VDI-4403]. Eine Modernisierungsmaßnahme, bei der nicht das gesamte Lager, sondern nur einzelne technisch kritische Komponenten ausgetauscht werden, wird Retrofit genannt [Kas-2020, S. 20].

Die Entscheidung über Retrofit-Maßnahmen und deren Zeitpunkt ist komplex. Im Rahmen eines unternehmensinternen Investitionsprogramms stehen solche Modernisierungsentscheidungen bei begrenzten Investitionsmitteln im Wettbewerb mit anderen Projekten [Bar-1998, S. 2f.; Sch-2004, S. 25f.]. Oft werden Investitionsprojekte in der Praxis nach rein monetären Maßstäben wie Kostenvergleichen oder Amortisationsverfahren entschieden, bei denen nicht-monetäre Aspekte wie Imageverluste oder Risiken nur eine untergeordnete Rolle spielen [Har-2019, S. 84].

Um Investitionen unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse vergleichbar zu machen, können Nutzen und Kosten in Form von Wirtschaftlichkeitsanalysen abgewogen werden [Arn-2019, S. 301f.]. Ein Hauptaspekt bei der Entscheidung über Retrofit-Maßnahmen ist die Sicherstellung der Verfügbarkeit zur Vermeidung von Ausfallkosten. Neben bezifferbaren Ausfallkosten wie Preise ausgefallener Bauteile können auch schwer messbare Einflüsse wie spontane Notfalllieferungen entstehen [Bie-2008, S. 27ff.; Paw-2016, S. 68ff.]. Zur Gewährleistung hoher Verfügbarkeit und langer Nutzung von intralogistischen Anlagen müssen Ersatzteile jederzeit verfügbar sein. Retrofit-Maßnahmen können auch die Ersatzteilverfügbarkeit langfristig erhöhen [VDI-4403].

Weitere positive Auswirkungen erfolgreicher Modernisierungen sind Leistungssteigerungen aufgrund effektiverer Arbeitsabläufe oder eine höhere Energieeffizienz durch den Einsatz besserer Technik. Auch die Entlastung von Mitarbeitern oder Anpassung an Normen und Richtlinien kann unter die Auswirkungen fallen. [VDI-4403; DIN-9241-220]

Die hohe Unsicherheit bei der Erfassung von Ausfallkosten sowie die Schwierigkeit Nutzenaspekte zu quantifizieren erschweren eine objektive Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Modernisierungsmaßnahmen. Die unter Annahmen und Subjektivität erfassten Einflussgrößen stehen in der Regel hohen Investitionskosten für die Modernisierung gegenüber [Kas-2020, S. 20]. Daher ist zu vermuten, dass sich Betreiber intralogistischer Anlagen tendenziell zu spät für die Durchführung von Retrofit-Maßnahmen entscheiden.

Intralogistische Anlagen laufen in der Regel mehrere Jahrzehnte lang bis sie modernisiert werden. Aufgrund der seltenen Durchführung von Retrofit-Maßnahmen ist anzunehmen, dass Betreibern Erfahrungs- und Vergleichswerte zur Entscheidungsfindung fehlen. Anbieter von Retrofit-Maßnahmen hingegen führen Modernisierungen regelmäßig im operativen Geschäft durch. Folglich sind solche Unternehmen als Experten für die Bewertung und Planung von Retrofit-Projekten anzusehen [Pér-2020, S. 38]. Gleichzeitig haben die Betreiber intralogistischer Anlagen bessere Kenntnis über den

Zustand des eigenen Lagers [Pér-2020, S. 37]. Um mögliche Wissensunterschiede beider Gruppen auszugleichen und die Entscheidungsfindung über Retrofit-Maßnahmen zu vereinfachen, ist es notwendig, die Bewertung der Dringlichkeit von Modernisierungen systematisch und strukturiert vorzunehmen.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem, die Dringlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen im Kontext von Regalbediengeräten zu bewerten. Das Hauptziel ist die Erarbeitung einer Methode, welche Betreibern intralogistischer Anlagen bei der Bewertung der Dringlichkeit von Retrofit-Maßnahmen in Bezug auf Regalbediengeräten hilft. Die erarbeitete Bewertungsmethode soll sowohl messbare als auch qualitative Einflussgrößen gleichermaßen berücksichtigen und als Bewertungstool unterstützend auf die Entscheidung einwirken. Eine Schwierigkeit liegt in der Individualität der Situationen verschiedener Unternehmen. Ziel ist es, dass die Methode einen universell für alle Betreiber anwendbaren Rahmen bietet, welcher flexibel auf die unterschiedlichen Gegebenheiten der Firmen anpassbar ist.

Aufgrund der hohen Komplexität einer solchen Entscheidung bringt die Ausarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbewertung zahlreiche Forschungsfragen mit sich. So befasst sich die Arbeit mit der Beantwortung der folgenden Punkte:

- Welche Bewertungsmethoden werden generell bei Modernisierungsentscheidungen genutzt?
- Welche Faktoren haben Einfluss auf die Entscheidung von Retrofit-Maßnahmen von Regalbediengeräten?
- Welche Kosten entstehen bei ungeplanten Ausfällen intralogistischer Anlagen?

Zwar lassen sich in der Fachliteratur die Vorstellung unterschiedlicher Bewertungsmethoden und theoretische Ausarbeitungen zu Modernisierungsgründen und Ausfallkosten finden, es fehlt allerdings häufig der Praxisbezug. Die Arbeit verfolgt das Ziel, durch den Einsatz von Recherche und eigener Datenerhebung die einzelnen Unterpunkte im Kontext miteinander zu verbinden und zu beantworten.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zum Erreichen der vorgestellten Ziele und Beantwortung der Fragen gliedert sich die Arbeit in fünf verschiedene Blöcke auf, welche sieben Hauptkapitel umfassen. Diese unterteilen sich in weitere Unterkapitel. Die folgende Grafik zeigt die Vorgehensweise der Arbeit.

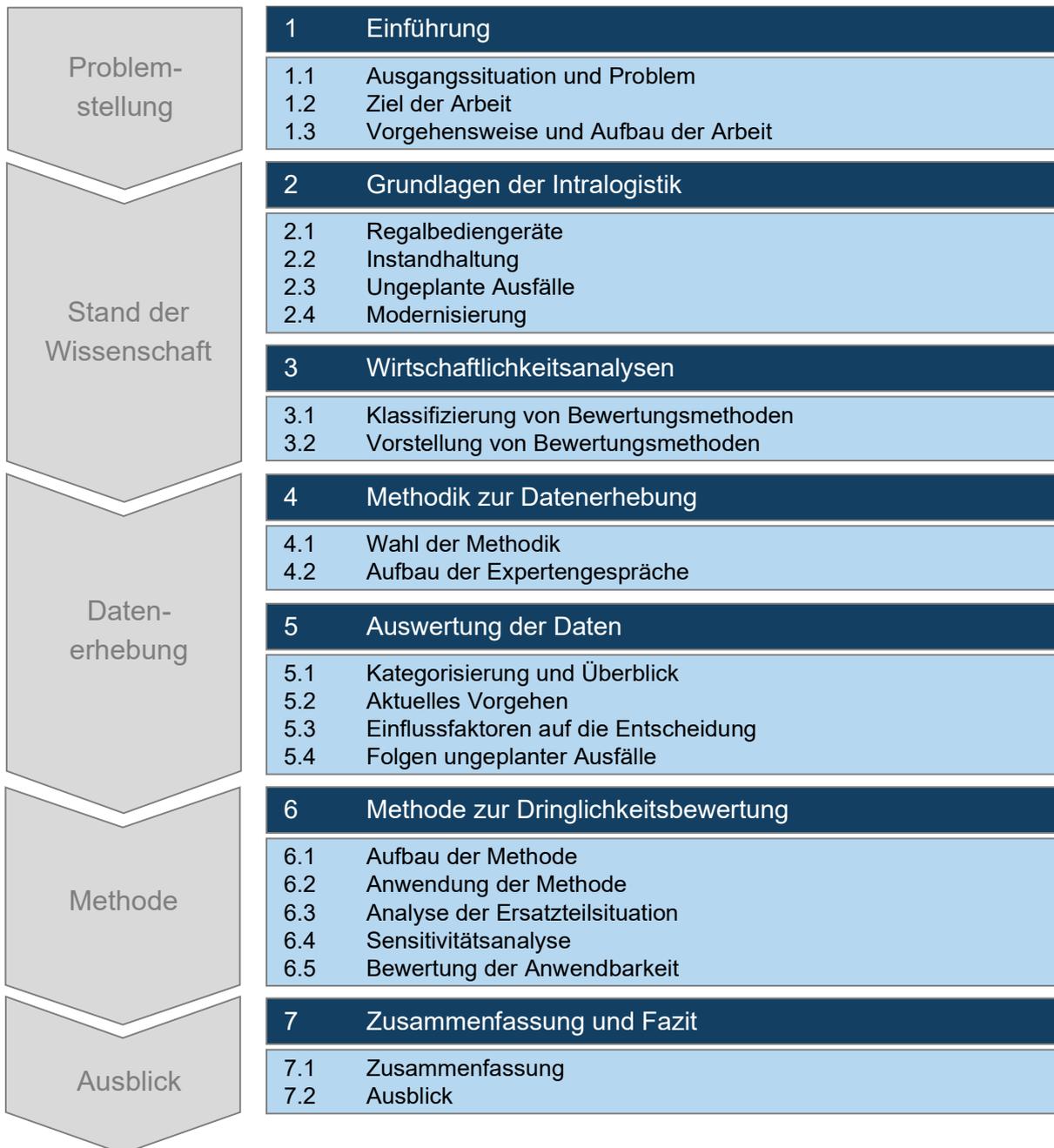


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 1 die Ausgangssituation sowie die damit verbundene Problemstellung vorgestellt. Im Unterkapitel 1.2 finden sich die konkreten Fragen, mit welchen sich die Arbeit befasst.

Die Grundlage zum Verständnis der Arbeit stellt der aktuelle Stand der Wissenschaft dar. Dieser wird in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben. Unterteilt in verschiedene Unterkapitel wird zunächst in Kapitel 2 der Stand der Literatur in Bezug auf Intralogistik, Regalbediengeräte und Modernisierungsmaßnahmen behandelt. Kapitel 3 umfasst die Vorstellung von wirtschaftlichen Bewertungsmethoden. Nach einer allgemeinen Einordnung in Kapitel 3.1 erfolgt im Unterkapitel 3.2 die Erläuterung wichtiger Methoden mit abschließender Bewertung in Bezug auf deren Anwendbarkeit.

Der folgende Themenblock bestehend aus den Kapiteln 4 und 5 befasst sich mit der eigenen Datenerhebung. In Kapitel 4 wird die angewandte Methodik zur Datenerhebung vorgestellt. Dabei wird zunächst in Kapitel 4.1 begründet, welches Vorgehen eine für diese Arbeit geeignete Forschungsmethode darstellt. Im zweiten Teil des Kapitels 4 wird der Leitfaden sowie der in den Gesprächen verwendete Fragebogen schrittweise erklärt. Nach dem Vorstellen des Fragenkatalogs erfolgt in Kapitel 5 die Auswertung der Interviews gegliedert nach thematischen Schwerpunkten. Dieser Abschnitt beinhaltet die quantitative Visualisierung der Auswertung genau wie qualitative Erkenntnisse aus den individuellen Gesprächen.

In Kapitel 6 werden die Erkenntnisse aus den Experteninterviews mit den vorgestellten Bewertungsmethoden von Handlungsalternativen in Verbindung gebracht. Dabei beinhaltet Kapitel 6.1 die Erklärung der Vorgehensweise einer Methode zur Dringlichkeitsbewertung von Retrofit-Maßnahmen mit anschließender Beispielrechnung in Kapitel 6.2. Die folgenden Unterkapitel 6.3 bis 6.5 umfassen die Bewertung der Ersatzteilanalyse, das Vorstellen von Sensitivitätsanalysen und eine abschließende Bewertung der Methode.

Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeit unter Rückbezug zu den eingangs gestellten Zielfragen zusammengefasst. Zudem werden in Kapitel 7.2 Ansatzpunkte für den weiteren Verlauf der Forschung aufgezeigt.

2 Grundlagen der Intralogistik

Das folgende Kapitel ist in vier Bereiche gegliedert. In Kapitel 2.1 werden Verwendung, technischer Aufbau und die Funktion von Regalbediengeräten beschrieben. Kapitel 2.2 skizziert Aufgaben und Arten der Instandhaltung. Im Rahmen von Kapitel 2.3 wird auf die Folgen ungeplanter Ausfälle mit dem Fokus auf entstehende Ausfallkosten eingegangen. Kapitel 2.4 behandelt Gründe und Vorgehen bei Modernisierungsmaßnahmen von Regalbediengeräten.

2.1 Regalbediengeräte

2.1.1 Einordnung und Verwendung

Nach dem Ansatz von *Hompel et al.* kann der Begriff **Logistik** in drei verschiedene Weisen aufgefasst werden: technisch, wirtschaftlich und informatisch. Die technische Definition von Logistik beschreibt „den Materialfluss als eine Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb fester Bereiche und damit als physische Funktion logistischer Prozesse“ [Hom-2018, S. 2]. DIN-Richtlinie 30781 definiert Logistik als Planung, Steuerung und Überwachung aller Vorgänge innerhalb einer Transportkette [DIN-30781]. Der innerbetriebliche Materialfluss wird als **Intralogistik** bezeichnet. Intralogistik beinhaltet Organisation, Durchführung und Optimierung des im Unternehmen stattfindenden Materialflusses in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen durch den Einsatz technischer Systeme und Dienstleistungen [Hom-2011, S. 141f.].

In der Intralogistik lässt sich zwischen zwei verschiedenen Transportarten der Förderung differenzieren. **Stetigförderer** sind Fördereinrichtungen, bei denen das Fördergut stetig auf fest vorgeschriebenem Förderweg von Aufgabe- zu Abgabestelle transportiert wird. Transportmittel, welche sich durch einen nicht durchgängigen intervallartigen Ablauf der Förderung auszeichnen, werden als **Unstetigförderer** bezeichnet. Die Gruppe der flurgebundenen Unstetigförderer umfasst Flurfördermittel, welche schieneengebunden oder schienenfrei zum Einsatz kommen. Regalbediengeräte zählen zu den schieneengebundenen Flurfördermitteln. [Mar-2016, S. 221; Hom-2018, S. 161f.; Muc-2018, S. 175; DIN-15201]

Ein **Regalbediengerät** (RBG) ist ein Förder- und Hebezeug, welches beim Ein- und Auslagern sowie Kommissionieren von Ladeeinheiten (LE) in der Intralogistik eingesetzt wird [FEM-9.101]. Es kann sowohl zur manuellen als auch zur automatischen

Bedienung von Regalfächern einer Regalanlage gebraucht werden [Hom-2018, S. 198]. Der Fokus liegt in der Folge auf automatisierten Regalbediengeräten.

Regalbediengeräte kommen bei der Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten in **Hochregallagern** (HRL), Kanallagern und **automatischen Kleinteillagern** (AKL) zum Einsatz [FEM-9.101]. Der Transport von Ladeeinheiten findet abhängig von der Lagerart zumeist durch die Verwendung genormter Ladungsträger wie Europaletten, Chemieplatten, Gitterboxen, Schachteln oder Behältern statt [Hom-2018, S. 200; DIN-445; DIN-15147]. Dabei werden je nach Anwendung verschiedene Ausführungen von RBG eingesetzt. In Hochregallagern, welche sich unter anderem zur Lagerung großer und schwerer Ladeeinheiten eignen, werden Paletten-RBG genutzt. In automatisierten Kleinteilelagern hingegen kommen Behälter-Regalbediengeräte zum Einsatz, welche im Vergleich leichter und dynamischer sind. Als weiteren Anwendungsbereich von RBG ist das Umsetzen von Satelliten in Satellitenlagern zu nennen. In einem solchen Lager werden mehrere LE hintereinander in einem Regalfach gelagert. Das RBG dient hierbei lediglich dem Transport des Satelliten zum Regalfach bzw. zum Ein- oder Auslagerpunkt. [FEM-9.101; Kir-2019, S. 57; Fis-2004, S. 136]

Zur Veranschaulichung des Aufbaus ist in Abbildung 2-1 ein Ausschnitt aus einem Hochregallager gezeigt.

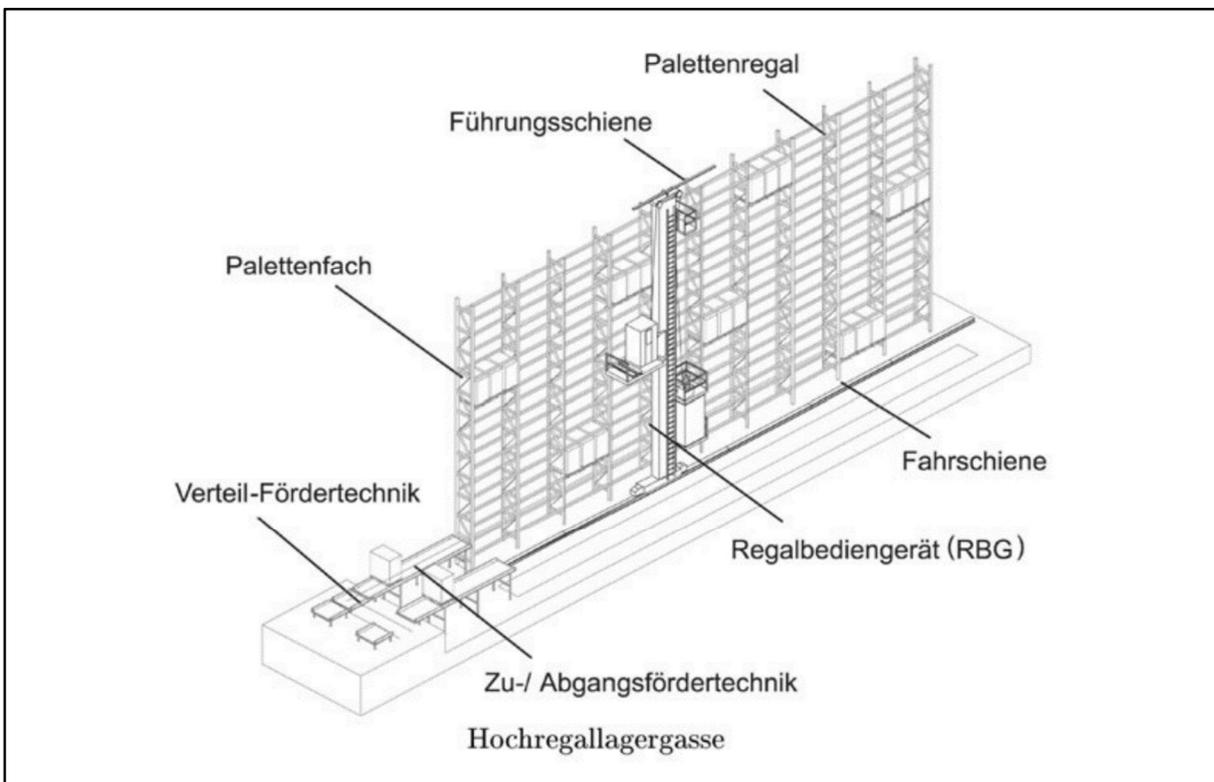


Abbildung 2-1: Aufbau eines Hochregallagers [Hom-2011, S. 126]

Gezeigt ist die seitliche Ansicht einer Regalgasse. Als **Gasse** oder Regalgasse bezeichnet man die Lücke zwischen zwei aus einzelnen Fächern bestehenden Palettenregalen [Sch-2019b, S. 93]. Im Rahmen von Fahr- und Führungsschiene wird der Bewegungsspielraum des Regalbediengeräts festgesetzt. Der Bereich vor den Regalgassen wird Lagervorzone genannt und dient als Umsetz- und Abstellbereich für ein- und auszulagernde LE. Die Ein- und Auslagerungen geschehen immer an fest vorgeschriebenen Orten, die als Einlagerpunkt (EP) und Auslagerpunkt (AP) bezeichnet werden. Durch den Einsatz verschiedener Fördertechniken wird der Transport von LE in der Vorzone ermöglicht. [Hom-2011, S. 126, 175; VDI-4480]

Normalerweise wird die Systemlast einer Gasse von genau einem RBG getragen. Wenn die Belastung einer Gasse geringer ist als die Kapazität eines RBG, wird ein Regalbediengerät auch für mehrere Gassen innerhalb des Lagers eingesetzt. Um einen zumeist in der Lagervorzone stattfindenden Gassenwechsel zu ermöglichen, können kurvengängige Regalbediengeräte oder Umsetzer zum Einsatz kommen. Durch die Installation von kurvenförmigen Schienenverläufen und Weichen wird es kurvengängigen Regalbediengeräten ermöglicht, zwischen verschiedenen Regalgassen zu wechseln. Umsetzer hingegen sind zumeist automatisierte Konstruktionen. Diese nehmen das gesamte aus der Gasse herausfahrende RBG auf und befördern es parallel zur Regalfront in eine andere. [Arn-2019, S. 194ff.; Hom-2018, S. 204ff.; VDI-3561b]

Regalbediengeräte können manuell oder automatisch betrieben werden und kommen bei Kommissionierungen zum Einsatz. Bei einer Kommissionierung nach dem Prinzip „Person zur Ware“ wird eine Bedienperson auf dem RBG zum entsprechenden Regalfach gefahren und entnimmt manuell die gefragten Güter. Alternativ finden Kommissionierungen nach dem Prinzip „Ware zur Person“ statt. Bei diesem Prinzip findet zunächst eine Auslagerung der gesamten LE statt. Nach Entnahme der zu kommissionierenden Güter werden die verbleibenden Güter wieder eingelagert. [FEM-9.101]

2.1.2 Technischer Aufbau

Ein Regalbediengerät setzt sich nach Richtlinie FEM 9.101 aus den Hauptkomponenten Tragwerk, Fahrtrieb und Hubwerk zusammen. Zudem zählt das Lastaufnahmemittel (LAM) zu den Standardbauteilen eines jeden RBG. Exemplarisch zeigt Abbildung 2-2 den Aufbau eines Regalbediengeräts. [FEM-9.101]

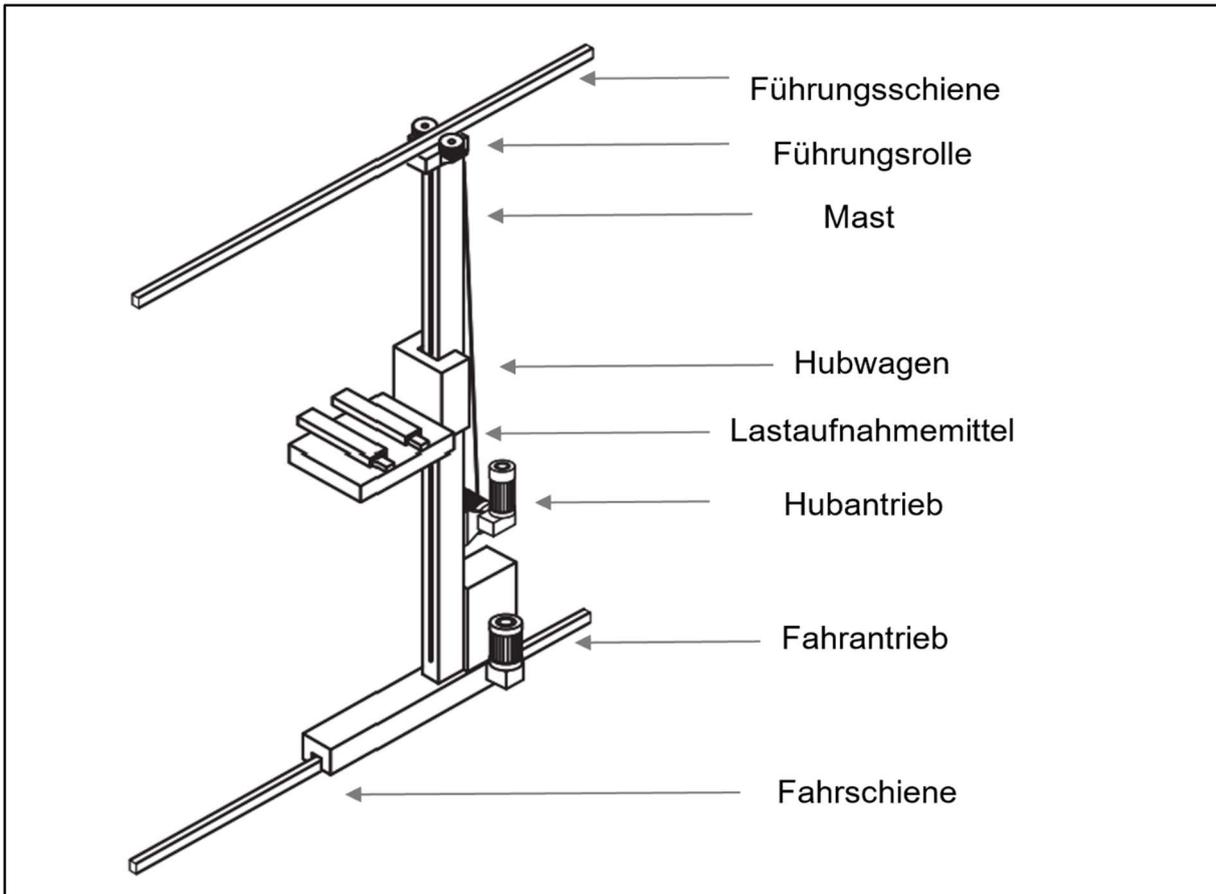


Abbildung 2-2: Technischer Aufbau eines Regalbediengeräts

Das **Tragwerk** umfasst sämtliche Bauteile mit tragender Funktion. Dazu zählen Mast, Fahrwerk und Hubwagen. [FEM-9.101]

Der **Mast** ist das Verbindungselement von Fahrwerk und Hubwagen und ermöglicht die Bewegung des RBG in Y-Richtung entlang des Regals in die Höhe. Zwecks Stabilität besitzt der Mast oben eine Führung. Regalbediengeräte werden in Ein- oder Zweimast-Bauweise aus Materialien wie Stahl, Aluminium oder Verbundwerkstoffe gebaut. Abbildung 2-3 stellt exemplarisch einen Einmaster und ein Zweimast-Gerät gegenüber. Zweimaster können im Vergleich zu Einmast-Geräten die Biegebelastung durch beidseitige Aufhängung des Hubwagens verringern. Ein RBG mit nur einem Mast hingegen hat einen geringeren Materialeinsatz. [FEM-9.101; Sch-2019b, S. 97]

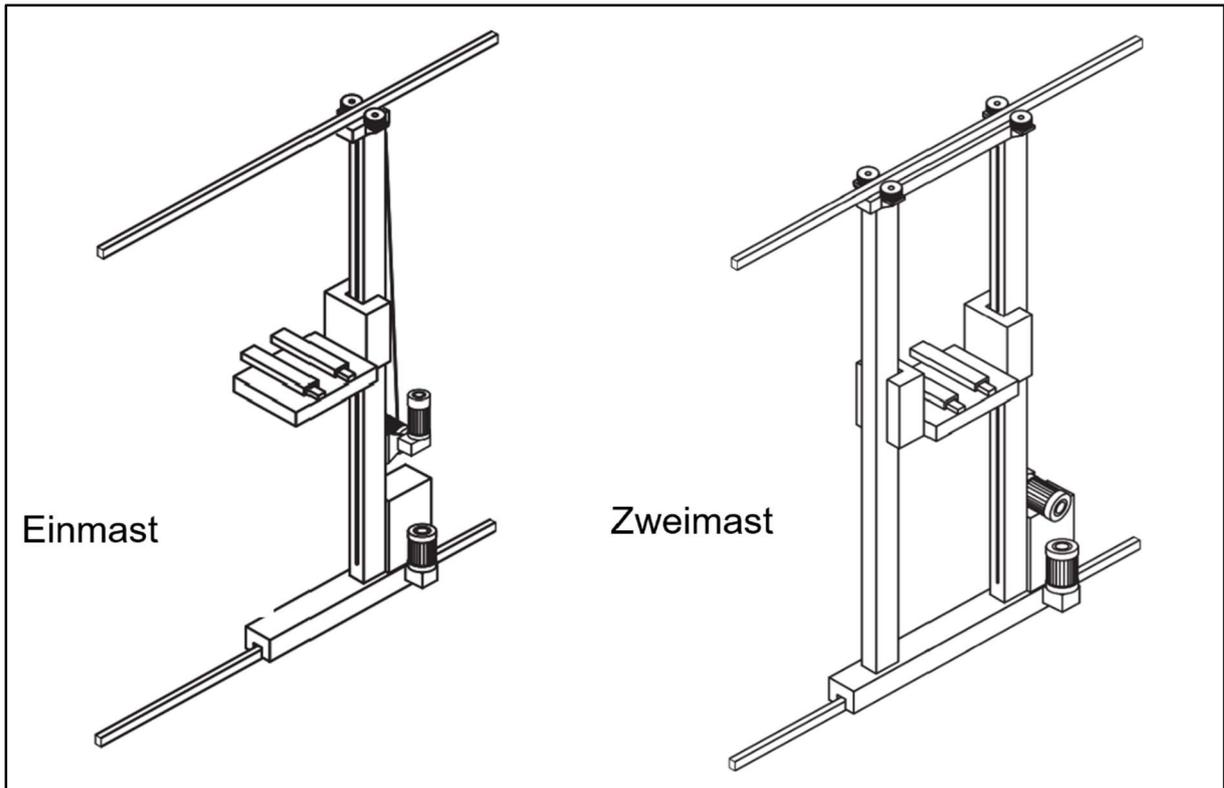


Abbildung 2-3: Ein- und Zweimast-RBG [Hom-2018, S. 199ff.]

Getragen wird der Mast vom **Fahrwerk**, einem Rahmen, welcher das Verbindungs-glied zwischen Mast und Schiene darstellt. Durch seinen Aufbau bestehend aus den Einzelkomponenten Laufrollen, Gegendruckrollen und Horizontalführungsrollen über-trägt das Fahrwerk die Kraft des Mastes auf die am Boden befindlichen Fahrschienen. Die von oben aufliegenden Laufrollen sind teilweise angetrieben. Gegendruckrollen greifen von unten ein und wirken dem Abheben der Laufrollen bei Beschleunigungs-prozessen entgegen. Die Ausrichtung des Fahrwerks geschieht über die horizontal ausgerichteten **Führungsrollen**. Durch das Zusammenspiel der einzelnen Kompo-nenten und der an der Gassendecke angebrachten **Führungsschiene** wird eine Be-wegung in X-Richtung entlang parallel zur Gasse ermöglicht. [Sch-2019b, S. 95, 98; FEM-9.101]

Der Antrieb des Fahrwerks erfolgt durch den **Fahrtrieb**, der das Beschleunigen und Verfahren der Konstruktion realisiert. Dieser kann sowohl von oben als auch von unten auf das RBG wirken. Davon abhängig muss die Konstruktion verschiedene Kräftewir-kungen aushalten können. Eine Antriebseinheit setzt sich aus den Einzelteilen Lei-stungseinheit, Motor, Getriebe und einzelnen Übertragungsgliedern zusammen. Man differenziert außerdem zwischen formschlüssigen und kraft- oder reibungsschlüssigen Antriebssystemen sowie zwischen stationären und mitfahrenden Fahrtrieben. [Sch-2019b, S. 98f.; FEM-9.101].

Wie das Fahrwerk und der Fahrtrieb in X-Richtung, ermöglicht der **Hubtrieb** die vertikale Bewegung des **Hubwagens** parallel zum Mast in Y-Richtung. Als Hubwagen versteht man einen am Mast befestigten beweglichen Rahmen, auf welchem das Lastaufnahmemittel aufliegt. [FEM-9.101]

Lastaufnahmemittel (LAM) werden zur beidseitigen Ein- und Auslagerung von LE genutzt. Dabei bewegen sie sich in Z-Richtung. Lastaufnahmemittel variieren in der Anzahl an LE, die aufgenommen werden können. Man unterscheidet zwischen einfach breiten (tiefen) LAM mit der Möglichkeit, eine LE zu bewegen und mehrfach breiten (tiefen) LAM, die mehrere LE transportieren können. Durch das parallele Bewegen mehrerer Ladeeinheiten zur gleichen Zeit kann die Anzahl an Lagerplätze erhöht werden. Auf der anderen Seite sind dafür breitere Gassen nötig, deren Einsatz den Volumennutzungsgrad verringern. Am häufigsten kommen LAM zum Einsatz, die ein bis zwei Ladeeinheiten bewegen können. Darüber hinaus werden Lastaufnahmemittel abhängig von ihrer Funktionsweise in ziehend und aushebend eingeteilt. Häufig verwendete Arten sind Teleskopgabeln, Schub- oder Rollenböden, Tragketten, Greifer oder seitlich an die Ladeeinheit gepresste umlaufende Bänder. [Sch-2019b, S. 101f.; Arn-2019, S. 194]

2.1.3 Funktion und Arbeitsweise

Regalbediengeräte gelten als zweidimensionale Transportmittel. Nach FEM 9.101 besitzen sie jedoch drei Bewegungsrichtungen. RBG können sich in X-Richtung parallel zur Gasse und in Y-Richtung parallel zum Mast bewegen. Außerdem kann das Lastaufnahmemittel in Z-Richtung in das Regal hineinbewegt werden. [FEM-9.101]

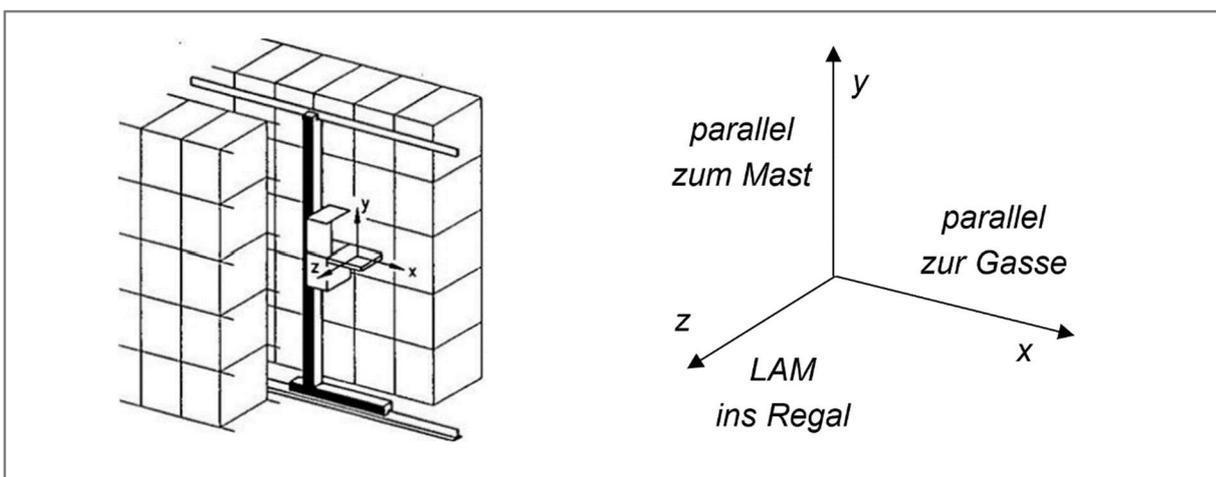


Abbildung 2-4: Bewegungsrichtungen eines Regalbediengeräts [FEM-9.101]

Die wiederkehrenden Bewegungsabläufe von Regalbediengeräten werden als Arbeitsspiele bezeichnet. Diese können in Einzel- und Doppelspiel differenziert werden. Einzelspiele zeichnen sich durch eine Trennung von Ein- und Auslagerungsfahrten aus, Doppelspiele kombinieren Ein- und Auslagerungsfahrten zu einem Arbeitsspiel. Zur Darstellung der Arbeitsspiele von Regalbediengeräten dienen Synchrongeraden oder Isochronen als Richtungsorientierung. Unter der Prämisse, dass sich das Regalbediengerät zu Beginn mit maximaler Fahr- und Hubgeschwindigkeit bewegt, zeigt die Synchrongerade den Fahrweg des Transportmittels an. [Arn-2019, S. 201ff.; VDI-3561a]

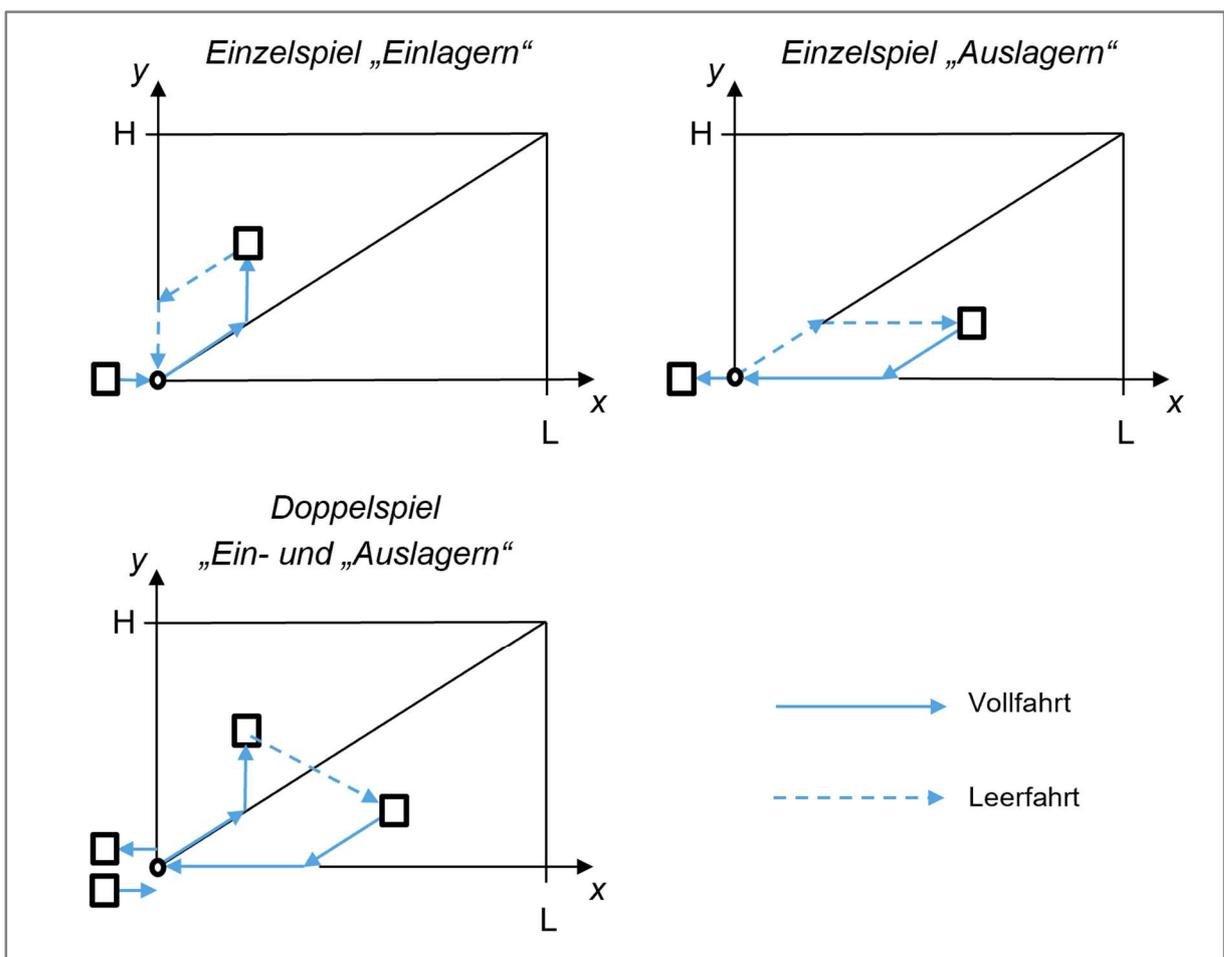


Abbildung 2-5: Veranschaulichung der Arbeitsspiele von Regalbediengeräten

Die Graphen visualisieren den Weg eines RBG entlang der Regalgasse in X- und Y-Richtung. Als Voll- bzw. Leerfahrt sind die Wege zu verstehen, bei denen ein RBG eine Ladeeinheiten transportiert bzw. kein Objekt befördert. Alle Fächer unterhalb der Synchrongeraden werden als fahrzeitkritisch und alle oberhalb als hubzeitkritisch bezeichnet. [FEM-9.101; Arn-2019, S. 204]

Eine exakte Leistungsbemessung eines Regalbediengeräts ist vielschichtig. Oft wird die Anzahl an Arbeitsspielen pro Stunde als eine wichtige Kenngröße zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Regalbediengeräten herangezogen. Beeinflusst wird der Parameter durch die Regalmaße (Höhe und Länge), Lagekoordinaten der Ein- und Auslagerungsbereitstellplätze, Maximalgeschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Bremswerte und Schalt-, Kontroll-, und Positionierzeiten. [VDI-3561a; Hom-2018, S. 204].

Eine umfassendere Leistungsbemessung kann durch die Betrachtung des Gesamtsystems ermittelt werden [Hom-2018, S. 204]. Diese wird in der Regel durch die Größen Speicherkapazität und Durchsatz ausgedrückt und steht mit der Leistung von Regalbediengeräten in direktem Zusammenhang. Nach VDI 3978 ist die Speicherkapazität das Aufnahmevermögen eines Puffers oder Speichers ausgedrückt in Stückanzahl [VDI-3978]. Der Durchsatz, gemessen in Transporteinheit pro Stunde, beschreibt den mittleren Stückgutstrom in das Lager hinein oder aus dem Lager heraus und hängt unter anderem von der Spielzeit pro Stunde der einzelnen RBG ab. [VDI-4480; FEM-9.851]

2.2 Instandhaltung

2.2.1 Technische Verfügbarkeit

Nach Richtlinie VDI 3581 ist die **Verfügbarkeit** „eines Elementes oder eines Teilsystems in einer Transport- oder Lageranlage die Wahrscheinlichkeit, die betrachteten Einheiten zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebszeit in einem ordnungsgemäß funktionierenden Zustand anzutreffen“ [VDI-3581]. Diese Definition ist ausschließlich mit Blick auf technische Komponenten zu verstehen. VDI Richtlinie 3423 definiert die technische Verfügbarkeit als zeitlichen Anteil der Belegzeit, in welchem die Komponente ohne technische Mängel für die Produktion verfügbar ist [VDI-3423].

Der Bemessung der Verfügbarkeit kommt in zwei verschiedenen Szenarien eine leicht unterschiedliche Bedeutung zu. Es wird zwischen der Verfügbarkeit zu Zeiten der Planungsphase und der Verfügbarkeit im Rahmen der tatsächlichen Inbetriebnahme des Systems unterschieden. Diese verschiedenen Ansätze der Verfügbarkeit η lassen sich durch die folgenden mathematischen Ausdrücke verdeutlichen. [VDI-3649; VDI-3581]

$$(I) \quad \eta = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2-1)$$

In Formel (I) wird die theoretische Verfügbarkeit beschrieben, welche meist in der Planungsphase zum Einsatz kommt. Die Mean Time Between Failure (**MTBF**) steht für die mittlere störungsfreie Zeit zwischen zwei Fehlern, während die Mean Time To Repair (**MTTR**) die mittlere Reparaturzeit ausdrückt. [VDI-3581; VDI-3649]

Richtlinie DIN 13306 definiert den Begriff Störung als Zustand, bei dem ein Objekt eine geforderte Funktion aus irgendeinem Grund nicht erfüllen kann. Ein Objekt ist ein Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Funktionseinheit, Betriebsmittel oder System, welches alleinstehend betrachtet werden kann. Oft wird eine Störung mit dem Begriff Ausfall gleichgesetzt. [DIN-13306]

Die folgende Gleichung (II) eignet sich zur Berechnung der Verfügbarkeit bei dem Fall, dass die Anlage bereits in Betrieb ist [VDI-3581].

$$(II) \quad \eta = \frac{T_E - T_A}{T_E} \quad (2-2)$$

Die Formel beschreibt das Verhältnis der Differenz von Einschaltzeit T_E und Ausschaltzeit T_A zur Einschaltzeit T_E . Nach VDI 3580 und VDI 3581 ist die Einschaltzeit definiert als die Zeit, in der die Maschine eingeschaltet ist, wobei es keine Rolle spielt, ob eine Funktion ausgeübt wird. Die Ausschaltzeit beschreibt die Zeit innerhalb der Einschaltzeit, in welcher die Betriebsbereitschaft eines bestimmten Elements fehlt. [VDI-3581; VDI-3580]

2.2.2 Gesamtverfügbarkeit

Die technischen Einzelverfügbarkeiten der Komponenten bestimmen die Gesamtverfügbarkeit des Systems, in welchem sie sich befinden. Einen entscheidenden Anteil an der Gesamtverfügbarkeit des Systems hat die Anordnung der Fördermaschinen und die daraus folgende Systemstruktur. Es wird zwischen einem seriellen und einem parallelen Aufbau einzelner Systemelemente unterschieden. [VDI-3581; Fis-2004, S. 73]

Eine serielle Folge zeichnet sich durch eine Anordnung in Reihe aus, bei der es keine Ausweichmöglichkeit für die transportierten Objekte gibt [VDI-3581]. *Fischer* zufolge spricht man bei einer parallelen Anordnung der Teilelemente eines Systems von einer **Redundanz**. Der Transport geschieht über mehrere Wege innerhalb des Systems parallel, was den Ausfall einzelner Komponenten kompensierbar macht. Redundante Teile müssen dafür die exakt gleiche Funktion ausüben [Fis-2004, S. 73f.]. Nach DIN-Richtlinie 13306 beschreibt die Redundanz die Situation, dass mehr als ein Mittel vorhanden ist, um eine geforderte Funktion zu erfüllen, falls in einem Objekt erforderlich

[DIN-13306]. Folgend sind die beiden Strukturarten in Abbildung 2-6 vereinfacht visualisiert.

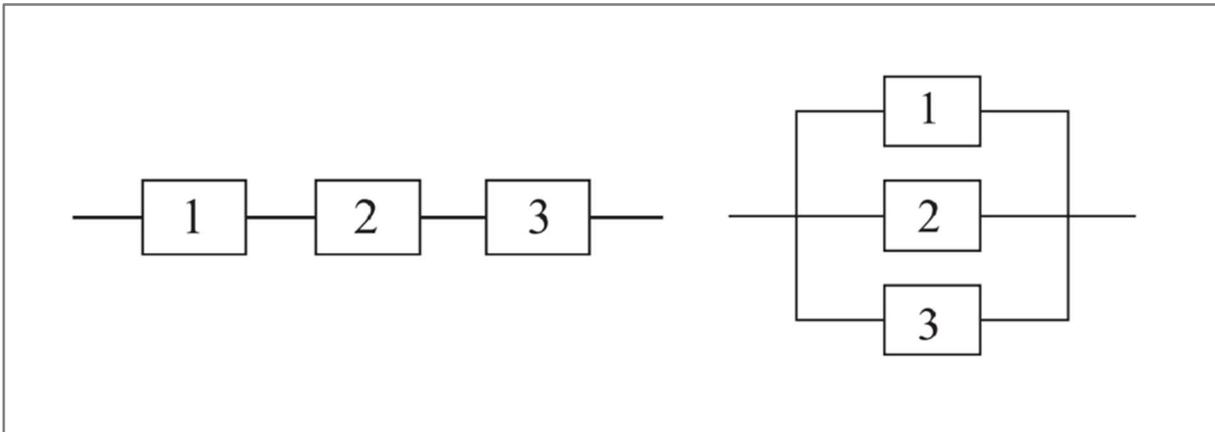


Abbildung 2-6: Serielle und parallele Anlagenstruktur [VDI-3581]

Die Gesamtverfügbarkeit ist im Fall einer seriellen Struktur das Produkt aller Einzelverfügbarkeiten, während die Gesamtverfügbarkeit bei einer parallelen Anordnung mit zunehmender Anzahl an Elementen zunimmt [VDI-3581; Fis-2004, S. 73; Gud-2010, S. 513].

- **Seriell:**

$$\eta_z = \eta_{z_1} \cdot \eta_{z_2} \cdot \eta_{z_3} \cdot \dots \cdot \eta_{z_n} = \prod_{i=1}^n \eta_{z_i} \quad (2-3)$$

- **Parallel:**

$$\eta_z = 1 - (1 - \eta_{z_1}) \cdot (1 - \eta_{z_2}) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_{z_n}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \eta_{z_i}) \quad (2-4)$$

Durch die Optimierung der Lagerfläche, bei welcher beispielsweise zwei Einzelgassen durch eine doppeltiefe Gasse ersetzt werden, reduziert sich auch die Anzahl der Regalbediengeräte. Je weniger RBG allerdings zum Einsatz kommen, desto geringer ist die Möglichkeit, Ausfälle zu kompensieren. Bei nur einem einzigen eingesetzten Regalbediengerät und dem Verzicht auf Redundanzen wäre der Ausfall des Geräts gleichbedeutend mit dem Ausfall des gesamten Hochregallagers. Je nach Anlagenstruktur ist der Zusammenhang von Gesamtverfügbarkeit und Anzahl der Systemelemente also gegenläufig. Abbildung 2-7 zeigt diese Abhängigkeit exemplarisch auf. [Fis-2004, S. 182; Arn-2019, S. 325]

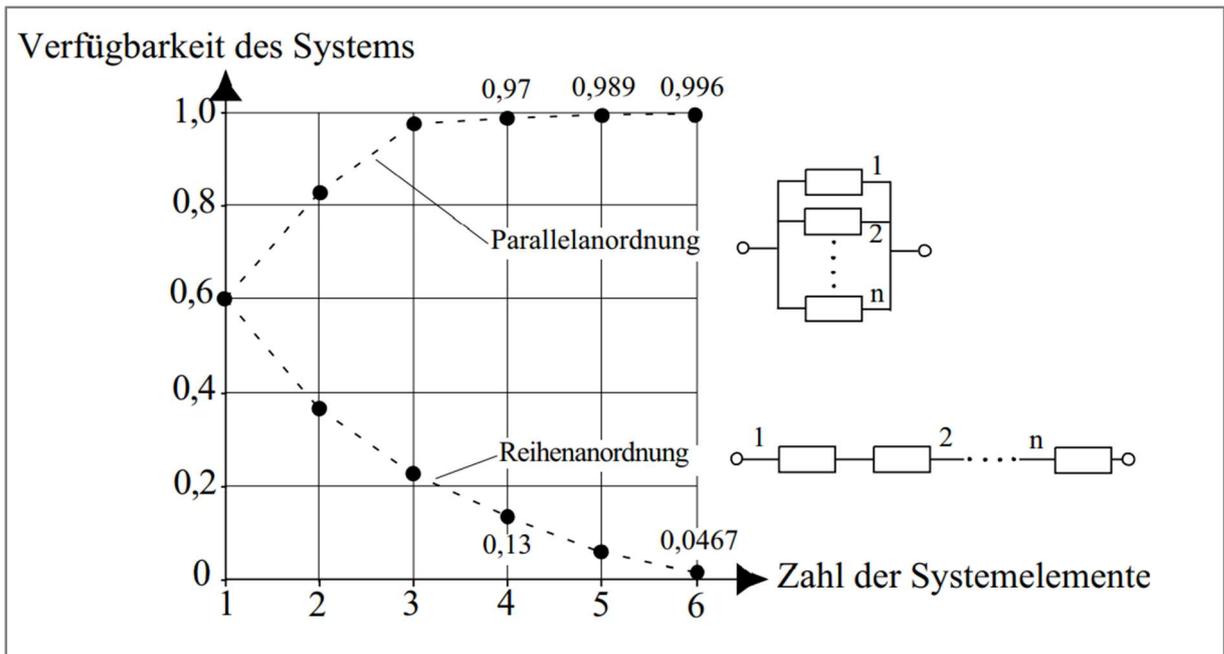


Abbildung 2-7: Zusammenhang von Anlagenstruktur und Anlagenverfügbarkeit [Arn-2019, S. 325]

Da für Betreiber intralogistischer Anlagen weniger die technische Verfügbarkeit einzelner Teilelemente, sondern die Verfügbarkeit des gesamten intralogistischen Systems wichtig ist, wurde der Begriff der **Leistungsverfügbarkeit** eingeführt. Nach Richtlinie VDI 4486 ist die Leistungsverfügbarkeit der anforderungs- und termingerechte Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen. [VDI-4486]

Neben Redundanzen können **zeitliche Puffer** als Mittel genutzt werden, um die Leistungsverfügbarkeit sicherzustellen. Diese sind im Zusammenhang von Projektmanagement und Netzplantechnik definiert als Zeitreserve, innerhalb derer die Verschiebung einzelner Vorgänge keine Auswirkung auf das Gesamtprojekt hat. [Sch-2014, S. 130]

2.2.3 Instandhaltungsarten

Um die technische Verfügbarkeit und damit auch die Leistungsverfügbarkeit langfristig zu gewährleisten, gibt es die Instandhaltung. DIN Richtlinie 31051 definiert die Instandhaltung als alle Maßnahmen innerhalb des Lebenszyklus eines Objekts, welche Erhalt oder Wiederherstellung des zur Ausübung der angedachten Funktion erforderlichen Zustands dienen [DIN-31051]. Instandhaltung kann sowohl von der eigenen Instandhaltung als auch von externen Firmen ausgeführt werden [DIN-528]. Die Maßnahmen sollten regelmäßig geschehen und den sicheren Betrieb gewährleisten [VDI-2681;

DIN-528]. Richtlinie DIN 31051 unterteilt Instandhaltung in vier verschiedene Kategorien [Lei-2017, S. 15; DIN-13306; DIN-31051].

- Die **Wartung** beschreibt die Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats.
- Im Rahmen der **Inspektion** werden die einzelnen Objekte auf Konformität ihrer maßgeblichen Merkmale überprüft.
- Das Wiederherstellen der ursprünglichen Funktion eines Objekts durch Ausführen verschiedener Maßnahmen wird als **Instandsetzung** bezeichnet.
- Um die immanente Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit oder Sicherheit eines Objekts zu steigern wird die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen, die dazu beitragen unter dem Begriff **Verbesserung der Funktionsfähigkeit** zusammengefasst. [DIN-31051]

Weiter differenziert die Richtlinie zwischen geplanter und ungeplanter Instandhaltung. **Geplante** Instandhaltung wird nach einem festgelegten Zeitplan durchgeführt. Diese kann in Form von vorausbestimmter Instandhaltung geschehen, welche präventiv in festgelegten Zeitabständen ohne vorherige Zustandsermittlung erfolgt. Beinhaltet die präventive Instandhaltung auch eine Analyse des Ist-Zustands, spricht man von zustandsorientierter Instandhaltung. Aufgeschobene korrektive Instandhaltung wird ausgeführt, um bereits erkannte Fehler zu beheben. [DIN-13306]

Neben der geplanten kann auch die **ungeplante** Instandhaltung weiter differenziert werden. Opportunistische Instandhaltung kann als präventive oder aufgeschobene korrektive Instandhaltung aufgefasst werden, welche ungeplant zu Zeiten geplanter Instandhaltung durchgeführt wird. Nach Erkennen eines Fehlers wird sofortige korrektive Instandhaltung durchgeführt, um Fehlerbehebung zu betreiben. Somit werden unannehmbare Folgen vermieden. [DIN-13306]

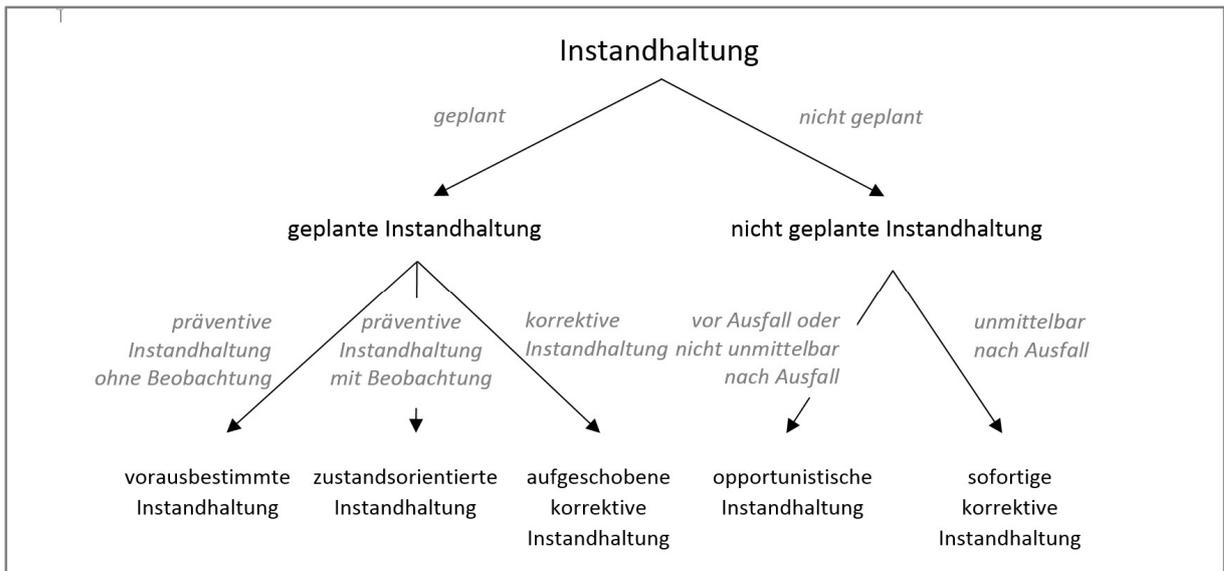


Abbildung 2-8: Instandhaltungsarten angelehnt an DIN 13306 [DIN-13306]

Leidinger ordnet verschiedene Instandhaltungsaktivitäten in die Kategorien zeitbasiert, zustandsbasiert und ausfallbasiert. Zeitbasierte Instandhaltung wird in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt, während bei zustandsbasierter Instandhaltung Aktivitäten basierend auf Diagnosen des Ist-Zustands erfolgen. Bei ausfallbasierter Instandhaltung wird erst gehandelt, wenn es eine Anlagenstörung gibt. [Lei-2017, S. 16ff.]

2.3 Ungeplante Ausfälle

2.3.1 Ausfallarten und -ursachen

Ein **Ausfall** ist nach DIN-Richtlinien 13306 und 31051 der Verlust der Fähigkeit eines Objekts, eine geforderte Funktion zu erfüllen. Häufig ist auch von einem **Fehler** die Rede. Dieser ist definiert als Zustand, in dem ein Objekt unfähig ist, eine geforderte Funktion auszuführen. Die **geforderte Funktion** kann als Funktion, Kombination von Funktionen oder Gesamtkombination der Funktionen eines Objekts beschrieben werden, die für die Erfüllung einer vorgegebenen Anforderung notwendig ist. [DIN-13306; DIN-31051]

Zur Klassifizierung von Ausfällen oder Fehlern kann man sich der beiden Einflussgrößen Schwere und Ausfallhäufigkeit bedienen. Als Schwere werden die möglichen oder tatsächlichen schädlichen Folgen eines Ausfalls oder Fehlers bezeichnet. Um die beiden Faktoren miteinander zu verbinden, wird das Maß der Kritikalität genutzt. Die **Kritikalität** ist ein zahlenmäßiger Index, der die Schwere eines Ausfalls oder Fehlers mit

der Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit seines Auftretens in Zusammenhang setzt. [DIN-13306]

Abbildung 2-9 visualisiert eine Kritikalitätsmatrix und dient der Veranschaulichung.

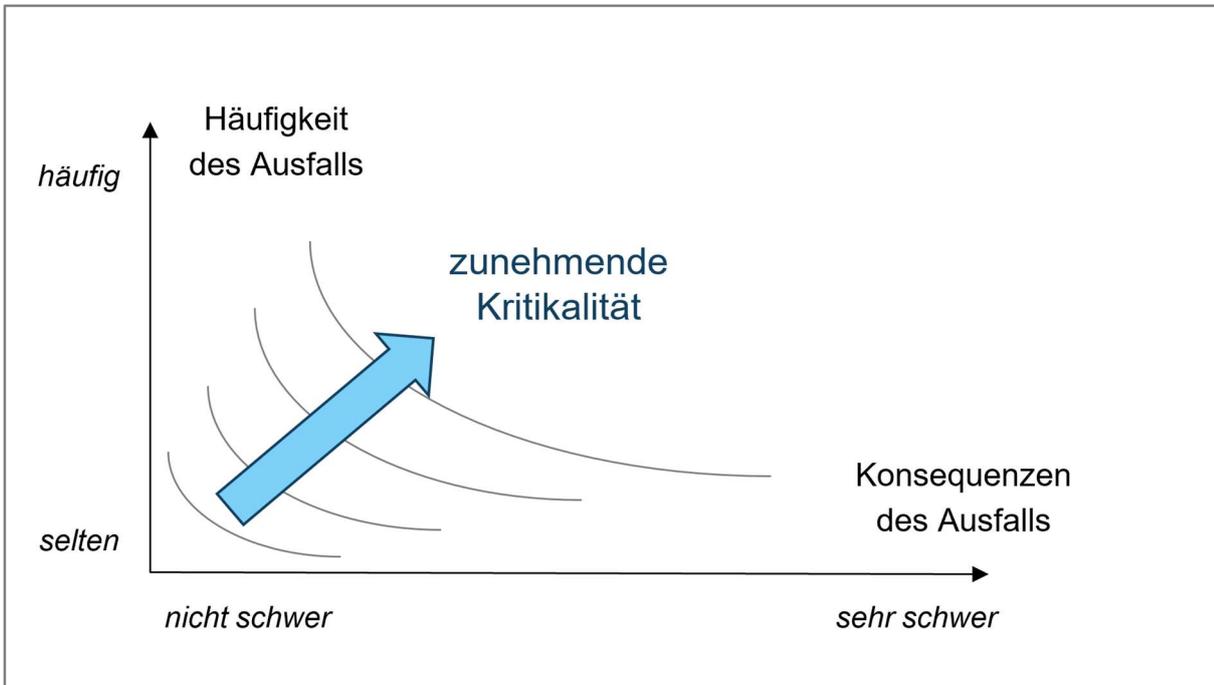


Abbildung 2-9: Kritikalitätsmatrix angelehnt an DIN 13306 [DIN-13306]

Ausfälle von Anlagen geschehen zufällig und können diverse Ursachen haben. Als **Ausfallursache** sind Umstände zu verstehen, die während der Planung des Konstruktionsentwurfs, der Herstellung, der Inbetriebnahme, der Nutzung oder der Instandhaltung zu einem Ausfall führen [DIN-13306]. Oft kommt es in Folge von Alterung intralogistischer Anlagen zu abnehmender Leistungsfähigkeit aufgrund von Verschleißerscheinungen. Ein häufiger Verlauf solcher Ausfälle kann in der allgemein bekannten „Badewannenkurve“ visualisiert werden. Die folgende Abbildung stellt qualitativ einen Verlauf der Ausfallhäufigkeiten dar. [Paw-2016, S. 70]

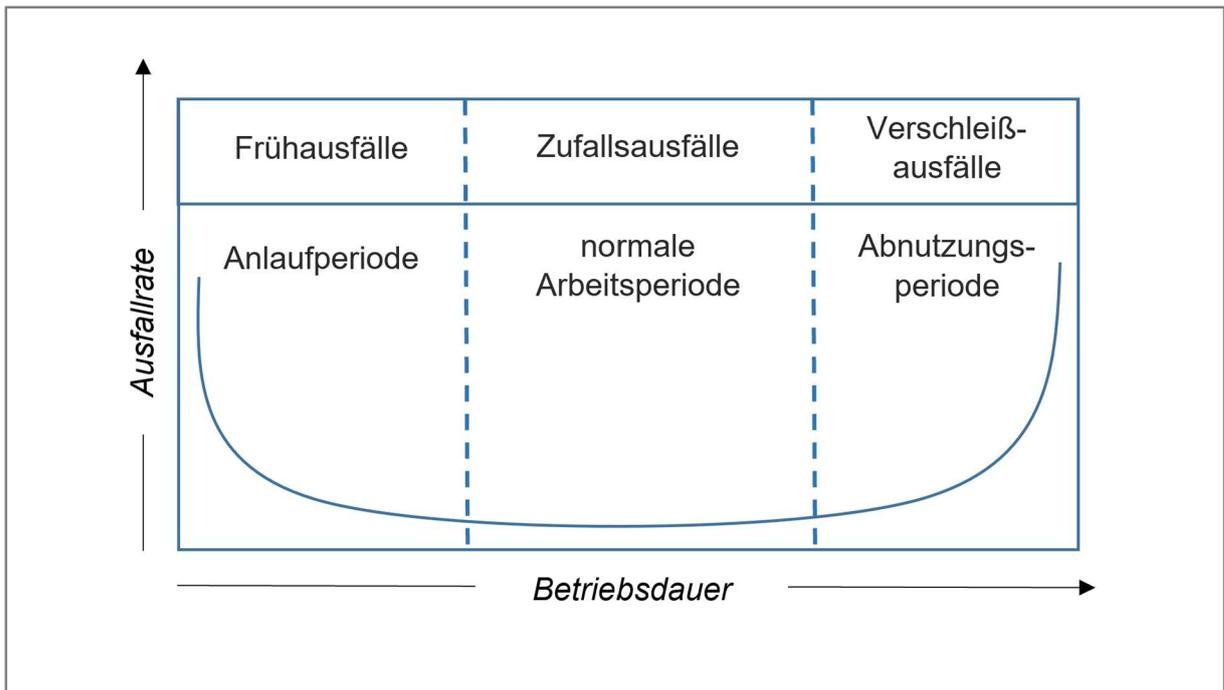


Abbildung 2-10: Ausfallverlauf nach der Badewannenkurve angelehnt an Pawelleck [Paw-2016, S. 70]

Die Badewannenkurve skizziert die Ausfallrate bei zunehmender Betriebsdauer und nimmt die Einteilung von drei verschiedene Arten von Ausfällen in drei unterschiedlichen Perioden vor [Paw-2016, S. 70; Lau-1999, S. 331].

- **Frühausfälle:** Diese Ausfälle geschehen in der ersten Phase des Lebenszyklus' eines Elements, der **Anlaufphase**. Grund für diese Art von Ausfällen sind Fehler in der Anlagenherstellung bzw. Wiederherstellung. Diese äußern sich beispielsweise durch Projektierungs-, Konstruktions-, Fertigungs-, und Montagefehlern und werden oft als „Kinderkrankheiten“ betitelt. Durch hohe Anforderung an das oft nicht so erfahrene Personal in Bezug auf technische Details ist die Anzahl der Ausfälle in dieser Phase hoch und nimmt mit der Zeit ab. [Hod-2018, S. 142f.; Paw-2016, S. 70]
- **Zufallsausfälle:** Unter Zufallsausfällen werden alle Ausfälle gefasst, die unabhängig von Verschleißstatus und Alter in der **normalen Arbeitsperiode** vorkommen. Auslöser können übermäßige und außergewöhnliche Beanspruchung einzelner Elemente sein. Diese Phase ist in Folge eines Lernprozesses in der Regel sehr stabil in Bezug auf die Ausfallrate. Neben wartender Instandhaltung ermöglichen Erfahrungswerte über das Verhalten der Elemente mit der Zeit zustandsorientierte Instandhaltung. [Hod-2018, S. 142f.; Paw-2016, S. 70]

- **Altersausfälle:** Mit zunehmender Alterung treten bei normalem Verschleiß während Alters- oder Verschleißausfälle auf. In dieser Phase, die **Abnutzungsperiode** genannt wird, ist auch der Ausfall von Hauptkomponenten keine Seltenheit. Den steigenden Ausfallraten kann im Rahmen von zustandsorientierter Instandhaltung durch Prognosen und Austauschen entgegengewirkt werden. [Hod-2018, S. 142f.; Paw-2016, S. 70]

2.3.2 Ausfallwahrscheinlichkeiten

Zur Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird das **Ausfallrisiko** genutzt. Es beinhaltet die Auswirkung von Unsicherheit auf gesetzte Ziele und wird durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, welche die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zu einem Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß berücksichtigt. Das Risiko R ist definiert als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit W eines Ereignisses und seiner Auswirkung A . [DIN-9241-220; Lau-1999, S. 322; Lei-2017, S. 26ff.]

$$R = W \cdot A \quad \Leftrightarrow \quad A = \frac{W}{R} \quad (2-5)$$

Die folgende Abbildung 2-11 dient der Verdeutlichung dieses Zusammenhangs.

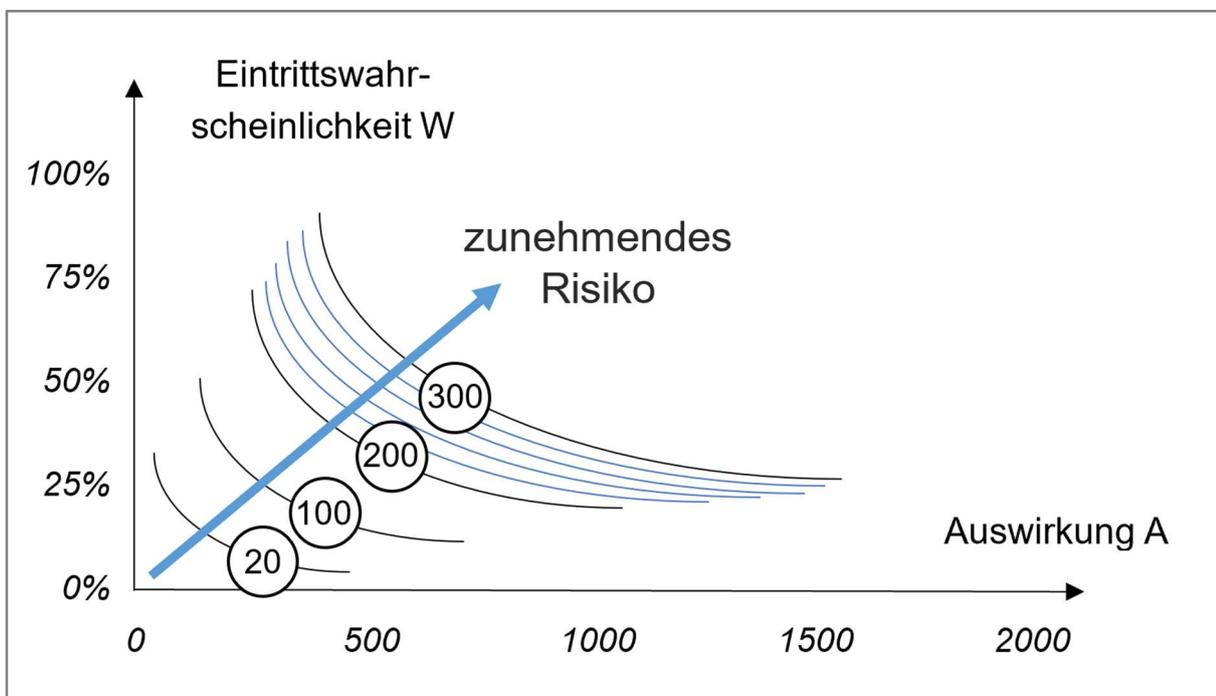


Abbildung 2-11: Zusammenhang von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung von Risiken angelehnt an Leidinger [Lei-2017, S. 27f.]

Die Hyperbeln stellen Linien gleichen Risikos dar. Bei hoher Eintrittswahrscheinlichkeit nähern diese sich an die X-Achse an, bei geringer Eintrittswahrscheinlichkeit an die Y-Achse. Diese Darstellung ermöglicht eine realistische Zuordnung von Risiko und Auswirkung. Die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit bleibt sehr schwierig. Insbesondere bei geringer statistischer Basis ist die Genauigkeit der Ermittlung einer repräsentativen Wahrscheinlichkeit eher gering. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten von Bauteilausfällen in industriellen Anlagen muss daher häufig auf Hypothesen und Ersatzmodellen zurückgegriffen werden. Um Risiken zu kategorisieren, können qualitative Einstufungen genutzt werden. Eine mögliche Einteilung wird in Tabelle 2-1 skizziert. [Lei-2017, S. 27f.]

Tabelle 2-1: Wahrscheinlichkeitsklassen angelehnt an Leidinger [Lei-2017, S. 27f.]

Ausgeschlossen	$W = 0$
Sehr unwahrscheinlich	$0 < W \leq 5\%$
Unwahrscheinlich	$5\% < W \leq 30\%$
Eher wahrscheinlich	$30\% < W \leq 50\%$
Wahrscheinlich	$50\% < W \leq 70\%$
Sehr wahrscheinlich	$70\% < W \leq 95\%$
Fast sicher	$95\% < W < 100\%$
Sicher	$W = 100\%$

Die qualitative Risikowahrnehmung kann nach *Leidinger* als emotional begründet angesehen werden. Daher ist es wichtig, Risiken zu quantifizieren, um sie bewerten zu können. Aufgrund der Höhe der anfallenden Kosten bei Betriebsunterbrechung kann die Dauer des möglichen unplanmäßigen Anlagenstillstands herangezogen werden. Damit kann die Risikobewertung bei Anlagenausfällen durch die Verrechnung von Ausfallzeit und Ausfallwahrscheinlichkeit ermittelt werden. [Lei-2017, S. 28]

Tabelle 2-2 zeigt ein Beispiel des Zusammenhangs von Ausfallzeit und Ausfallhäufigkeit in Form einer Risikomatrix.

Tabelle 2-2: Exemplarische Risikomatrix für Regalbediengeräte

1 Woche						
2-3 Tage						
1 Tag						
6 Stunden						
3 Stunden						
1 Stunde						
20 Minuten						
10 Minuten						
	halbjährig	alle 4 Mon.	monatlich	wöchentlich	alle 3 Tage	täglich

In X-Richtung sind Ausfallhäufigkeiten bezogen auf ein Jahr dargestellt, die Y-Achse gibt die Ausfalldauer an. Der Risikowert setzt sich aus der Verrechnung der beiden Achsen zusammen. Ausgehend von unten links nimmt die Risikobewertung bei Bewegung nach oben rechts sukzessive zu. Steigende Ausfallhäufigkeiten werden mit zunehmenden Ausfallzeiten verrechnet. Der Farbverlauf von hell- zu dunkelblau dient als Indikator für die steigende Risikobewertung. Der Bereich oben rechts ist nicht bewertet. Der Grund dafür ist, dass diese Szenarien unrealistisch sind. So können beispielsweise viermonatige Ausfälle logischerweise nicht wöchentlich vorkommen. [Lei-2017, S. 32ff.; Sch-2019a, S. 110]

2.3.3 Ausfallkosten

Anlagenausfallkosten können viele verschiedene Ursachen haben. Neben dem Produktionsausfall sind Personenschäden, Zerstörung oder Beschädigung der Umwelt, Leistungsabfall der Anlage und eine Verschlechterung der Reparaturbedingungen denkbar. Zudem sind die Ausfallzeit und -schwere und damit verbunden auch die Höhe der Kosten stark abhängig von der Struktur des Systems. Bei engen Verkettungen und wenig Pufferzeiten kann beispielsweise eine Störung zum Ausfall mehrerer Maschinen führen. [Paw-2016, S. 71]

Ausfälle intralogistischer Anlagen ziehen in Art und Umfang unterschiedliche Kosten nach sich. Diese werden auch in der Fachliteratur unterschiedlich typisiert. Pawelleck fasst Ausfallkosten als Teil der indirekten Instandhaltungskosten auf. Diese können in

unterschiedliche Kostenkategorien eingeteilt werden. Denkbar ist eine Einstufung in die folgenden drei übergeordneten Gruppen. [Paw-2016, S. 68]

- (1) **Stillstandkosten:** Diese Kosten umfassen die Nichtbeschäftigung des Produktionspersonals während eines Ausfalls. Darüber hinaus zählen Kosten zur Außer- und Wiederinbetriebnahme der Anlage zu dieser Kostenkategorie.
- (2) **Entgangene Deckungsbeiträge:** Erfolgsverluste können in Form entgangener Deckungsbeiträge dargestellt werden. Mögliche qualitätsbedingte Preisnachlässe sowie Zugeständnisse dem Kunden gegenüber zwecks Kompensation gehören ebenfalls zu dieser Kategorie.
- (3) **Weitere Ausfallkosten**
 - Ersatzbeschaffungen von beschädigtem Material
 - Zukauf von Teilen zur Vermeidung weiterer Produktionsausfälle in verketteten Anlagen
 - Strafzahlungen bei nicht erfolgter Leistung
 - Sonderschichten und Überstunden zum Aufholen von Produktionsrückständen
 - Imageschäden [Paw-2016, S. 68]

Um diese anfallenden Ausfallkosten zu erfassen werden drei Ansätze dargestellt. Eine **weite Fassung** des Begriffs Ausfallkosten fasst alle negativen wirtschaftlichen Auswirkungen eines Ausfalls zusammen. Diese Kosten bestehen aus Kosten zur Vermeidung von Ausfallkosten, Kosten vorbeugender Instandhaltung, ausfallbedingte Instandsetzungskosten und Ausfallfolgekosten. Fasst man den Begriff der Ausfallkosten **eng**, so werden diese Kosten direkt als Bestandteil der Instandhaltungskosten aufgenommen. Ausfallkosten können ebenso durch Aufschlüsselung des Verschleißes einer Anlage nach **wirtschaftlichen Nachteilen** dargestellt werden. Eine signifikante Unterscheidung wird vorgenommen in Kosten für die Reduzierung von Anlageausfallkosten und den Anlageausfallkosten selbst. [Paw-2016, S. 70f.]

Nach *Biedermann* stellt das Aufsummieren messbarer ungenutzter Verbräuche und zusätzlicher Kosten im Produktionsbereich mit dem nur teilweise messbarem Erfolgsausfall einen weiteren Ansatz dar, die anfallenden messbaren Kosten zu quantifizieren [Bie-2008, S. 26f.].

$$\text{Ausfallkosten} = \text{ungenutzte Verbräuche} + \text{Erfolgsausfall} \quad (2-6)$$

Dabei umfassen ungenutzte Verbräuche im Produktionsbereich unter anderem das Aufholen von Rückständen z.B. durch Überstunden oder erhöhte Verbräuche durch

Minderleistungen. Erfolgsausfälle können durch die ausbleibende Produktion von Absatzprodukten beschrieben werden. Dazu können außerdem Kosten bei Nichteinhaltung von Terminen oder durch die Errichtung größerer Fertiglager entstehen. [Bie-2008, S. 27f.]

Nach Richtlinie VDI 4403 können Ausfallkosten in zwei verschiedene Typen kategorisiert werden. **Primäre Kosten** sind diejenigen Kosten, die im Zusammenhang mit der Behebung der Störung unmittelbar anfallen. Darüber hinaus entstehen **sekundäre Kosten**, die aus einem Produktionsausfall, fehlender Lieferbereitschaft und Ersatzmaßnahmen resultieren. Diese sind normalerweise höher, aber schwieriger zu erfassen als primäre Ausfallkosten. [VDI-4403]

In der folgenden Grafik ist der Zusammenhang zwischen Höhe der Ausfallkosten und dem Verlauf einer Störung dargestellt.

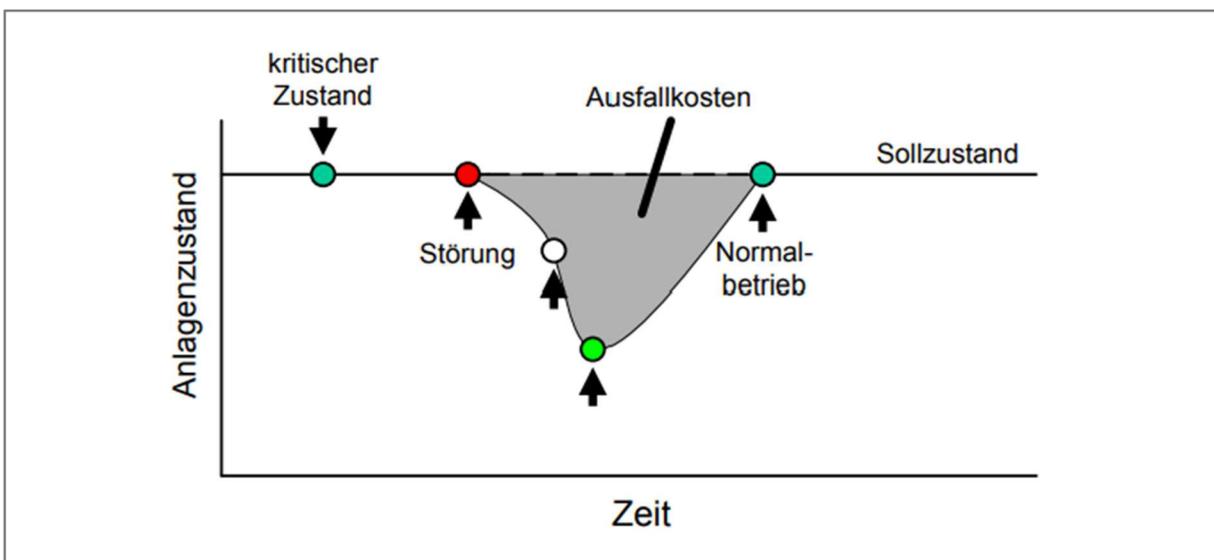


Abbildung 2-12: Qualitativer Störungsverlauf bei ungeplanten Ausfällen [VDI-4403]

Die Bedeutung indirekter Instandhaltungskosten zeigt sich dadurch, dass sie die direkten Instandhaltungskosten oft bis auf das Drei- bis Fünffache übersteigen [Paw-2016, S. 68]. Aufgrund der häufig hohen Ausfallkosten ergreifen Industrieunternehmen zuweilen große Aufwendungen zur Vermeidung etwaiger Ausfälle [Bie-2008, S. 26ff.]. Dabei sind die zwei folgenden Maßnahmen wichtig.

- 1) Ein **redundanter Aufbau** der intralogistischen Anlagen zur Sicherung der Verfügbarkeit [Bie-2008, S. 28]

- 2) **Ersatzteilbevorratung** zur Wiederherstellung der Produktionsbereitschaft im Störfall [Bie-2008, S. 28]

2.3.4 Ersatzteilmanagement

Ersatzteile sind Teile, Gruppen oder vollständige Erzeugnisse, die dazu gedacht sind, beschädigte, verschlissene oder fehlende Teile, Gruppen oder Erzeugnisse zu ersetzen [DIN-24420].

Es lassen sich nach dem Ansatz von *Biedermann* zwei große Gruppen unterteilen. Ausfälle von Bauteilen können kritisch oder weniger kritisch sein. Ausfallrelevante Bauteile werden **Strukturbauteile** genannt. Ihre Kritikalität setzt sich zusammen aus der Stellung des Bauteils innerhalb der Anlage und in größerem Kontext der Stellung der Anlage innerhalb des gesamten Produktionsflusses. Mit Fortschreiten der Produktion wird ein ausfallbedingter Stillstand immer teurer. Daher steigt die Zuverlässigkeitsanforderung im Verlauf der Produktion. [Bie-2008, S. 59ff.]

Aufgrund großer Heterogenität zwischen den verschiedenen Ersatzteilen sind weitere Kategorisierungen von Nöten. Wichtige Kriterien sind der Preis, Bestandsmenge und -wert und der Verbrauch [Paw-2016, S. 296f.]. Zur Quantifizierung dieser Faktoren kann sich der ABC- und XYZ-Analyse bedient werden. Die **ABC-Analyse** setzt den Ersatzteilverhältnis in Verhältnis mit der dazugehörigen Bedarfshäufigkeit und ermöglicht so eine Einteilung drei verschiedene Teilkategorien. [Paw-2016, S. 323ff.; Bie-2008, S. 61f.]

- **A-Teile** sind bekannt als „**klassische Reserveteile**“. Sie sind Einort-Reserveteile, die mit geringer Stückzahl bereits einen hohen Anteil des Bestandswerts ausmachen. [Bie-2008, S. 62; Paw-2016, S. 323]
- **B-Teile** besitzen ein ausgewogenes Verhältnis von Wert und Menge und werden in großer Anzahl gelagert. Diese Teile sind in der Regel Wechselelemente und damit Mehrort-Reserveteile bzw. **Normbauteile**. [Paw-2016, S. 324; Bie-2008, S. 62]
- **C-Teile** weisen ein umgekehrtes Verhältnis zu Teilen der A-Kategorie auf [Paw-2016, S. 323f.]

Qualitativ zeigt Abbildung 2-13 die Verteilung der verschiedenen Kategorien.

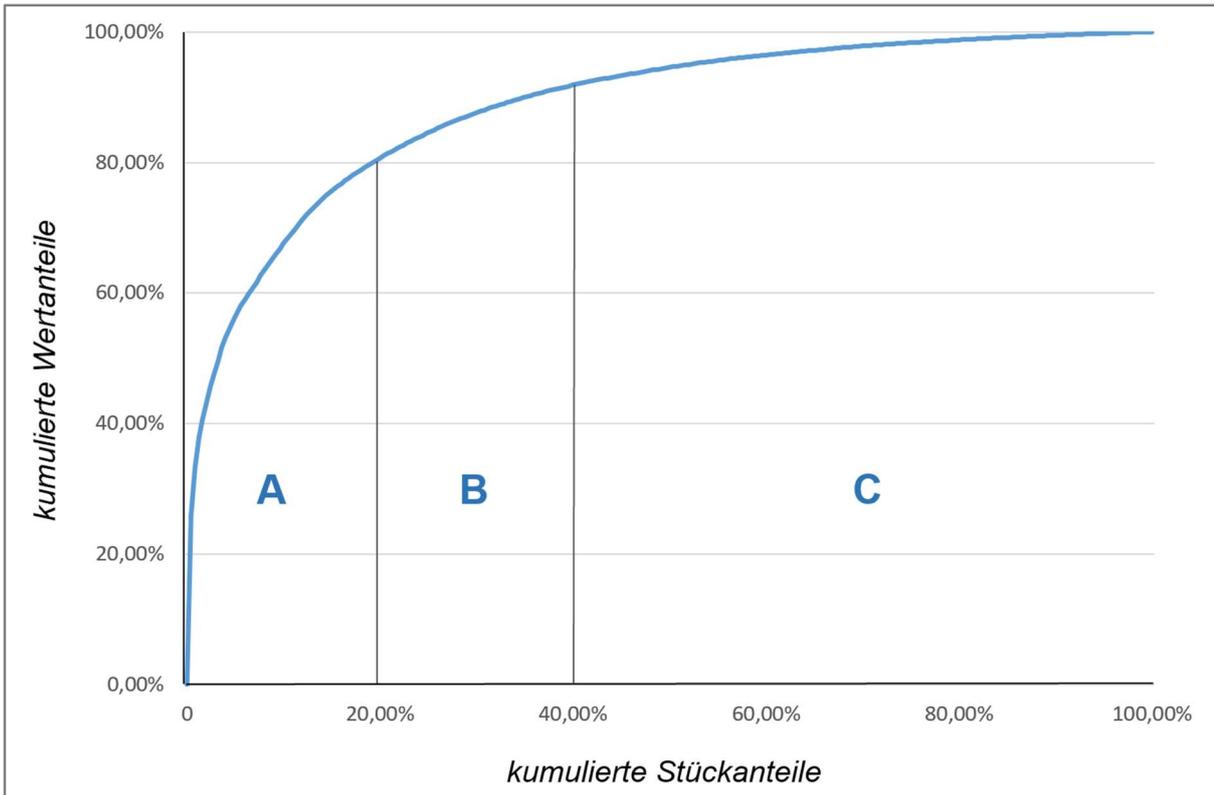


Abbildung 2-13: ABC-Verteilung

Zusätzlich bietet die **XYZ-Analyse** die Möglichkeit der Einteilung von Teilen in Kategorien abhängig von Verbrauch und Vorhersagegenauigkeit. Während X-Teile konstant verbraucht werden und eine hohe Vorhersagegenauigkeit aufweisen, unterliegen Vorhersage und Verbrauch von Y-Teilen starken Schwankungen. Das Verhalten von Z-Teilen ist kaum prognostizierbar. [Paw-2016, S. 324]

Basierend auf der Einstufung verschiedener Ersatzteile werden Strategien entwickelt, um ein möglichst kostengünstiges Ersatzteilmanagement zu betreiben. So wird abhängig von Typ und Umständen ermittelt, wie viele Ersatzteile zu einem bestimmten Zeitpunkt vorrätig sein sollten und alternativ wie lange eine Neubeschaffung dauern würde. Die gewählte Strategie beeinflusst ebenfalls, wie viel Kapital in Form von Ersatzteilverräten gebunden wird. [Ebe-2014, S. 137ff.; Paw-2016, S. 312ff.]

Häufig sind die auszutauschenden Elemente nicht identisch mit den lieferbaren Einheiten. Elemente können in vielen Anwendungen in beliebig viele Einzelteile zerlegt werden. Daher werden oft kleinere Bauteile innerhalb des ausgefallenen größeren Bauteils ausgewechselt. In Fällen, in denen der Austausch kleinerer Elemente zwar möglich, aber mit großem Aufwand verbunden wäre, kann die übergeordnete Einheit

ausgetauscht werden. So muss beim Austausch nicht identischer Teile darauf geachtet werden, dass die Funktionsfähigkeit erhalten bleibt und mit dem Gesamtsystem kompatibel ist. [Ebe-2014, S. 140ff.]

Insbesondere bei Alterung von Anlagen spielen die Kosten für die Ersatzteilbeschaffung eine erhebliche Rolle im Kontext der Instandhaltung [Hod-2018, S. 142f.]. Die folgende Darstellung zeigt den Zusammenhang von Kapitalbindungskosten und Ausfallkosten bei Nichtverfügbarkeit [Paw-2016, S. 294]. Eingetragene Graphen dienen dabei lediglich der qualitativen Verdeutlichung.

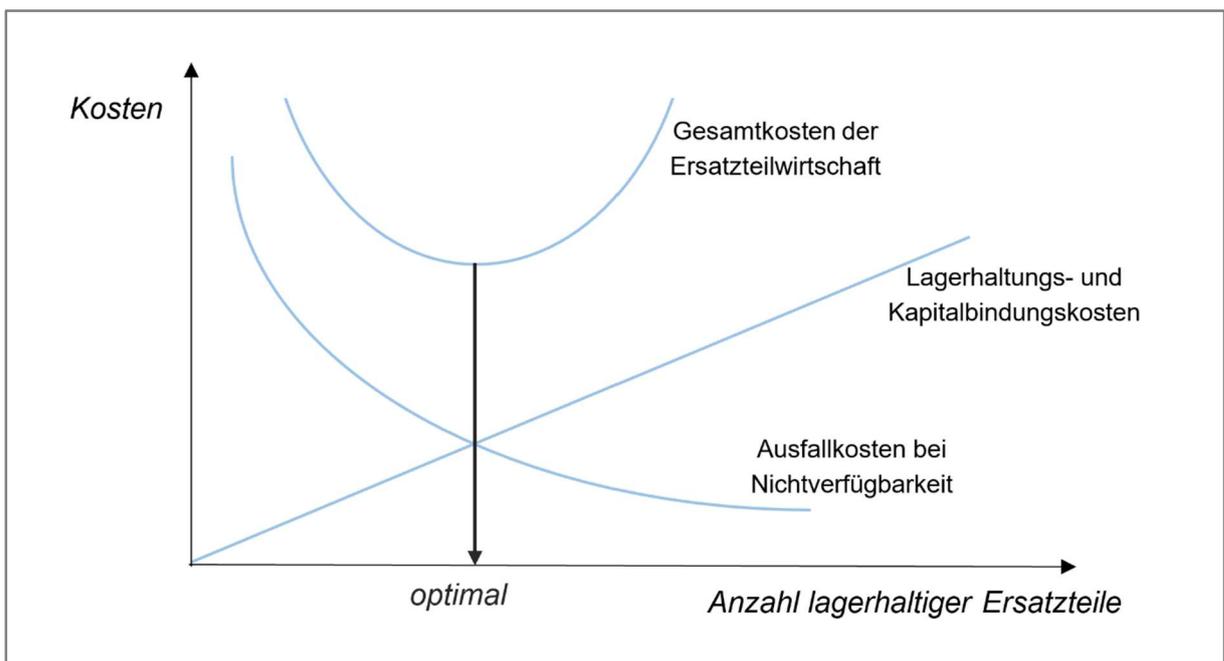


Abbildung 2-14: Gesamtkosten der Ersatzteilwirtschaft angelehnt an Pawelleck [Paw-2016, S. 294]

Die Grafik macht deutlich, dass die Ersatzteilverfügbarkeit den Ausfallkosten entgegenwirkt, gleichzeitig allerdings selbst zum Kostenfaktor in Form von Kapitalbindung wird. Zielsetzung ist das Erreichen einer hohen Flexibilität bei niedrigen Kosten. Die Maximierung der Verfügbarkeit von Ersatzteilen und die Minimierung der Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten sind zwei konkurrierende Ziele, die das Optimierungsproblem der Ersatzteilwirtschaft darstellen. [Paw-2016, S. 294]

2.4 Modernisierung

2.4.1 Definition und Arten

Neben den beschriebenen vorbeugenden Maßnahmen stellen Modernisierungen eine weitere Möglichkeit dar, ungeplanter Ausfälle zu reduzieren. DIN-Richtlinie 13306 definiert den Begriff **Modernisierung** als Änderung oder Verbesserung eines Objekts unter Berücksichtigung technologischer Fortschritte zur Erfüllung neuer oder geänderter Anforderungen [DIN-13306]. Nach Richtlinie VDI 4403 ist eine Modernisierung die Erneuerung bzw. Hochrüstung bestehender Anlagen auf den neuesten technischen Stand [VDI-4403].

Dabei gibt es verschiedene Arten der Modernisierung. Als Folge zunehmender Anlagengestörungen kann eine Reparatur bzw. ein Austausch von störungsverursachenden Teilen vorgenommen werden. Bei Leistungsabfällen und Verschleißerscheinungen kann eine Generalüberholung der Anlage notwendig werden. Im Rahmen eines Voll-austausches wird das alte System durch ein neues System ersetzt. [VDI-4403]

Im Kontext intralogistischer Anlagen ist der Begriff Modernisierung mit dem Begriff Retrofit gleichzusetzen. Nach *Luber* bezeichnet **Retrofit** die Nachrüstung und Modernisierung bereits bestehender Anlagen. Ferner kann von einem digitalen Retrofit gesprochen werden. Darunter versteht man die digitale Aufrüstung von Maschinen, um sie für Technologien der Industrie 4.0 und Anwendungen des Internet of Things (IoT) einsetzen zu können. Vorhandene Maschinen werden dabei nicht neu angeschafft, sondern mit moderner Technik verbessert und ausgestattet. [Lub-2018]

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff Retrofit stellvertretend für die Modernisierung intralogistischer Anlagen verwendet.

2.4.2 Einflussfaktoren

Nach Richtlinie DIN 4403 lassen sich zahlreiche Einflussfaktoren auf eine Entscheidung über Retrofit-Maßnahmen zusammentragen. Neben **systembedingten Gründen**, welche unmittelbar im Zusammenhang mit Technik und Zustand der Anlage stehen, tragen **unternehmens- und marktbedingte Gründe** zum Entscheidungsprozess bei. Eine Übersicht von Modernisierungsgründen zeigt die folgende Tabelle. [VDI-4403]

Tabelle 2-3: Gründe für Modernisierungen in der Intralogistik nach VDI 4403

Systembedingt	Markt- und unternehmensbedingt
<ul style="list-style-type: none"> • Sinkende Anlagenverfügbarkeit • Steigende Ausfallkosten • Fehlendes Fachwissen • Mangelnde Ersatzteilversorgung • Ansteigende Betriebskosten • Unerfüllbare Sicherheitsanforderungen • Ausgeschöpfte Leistungsreserven • Ergonomische- und arbeitsbedingte Einflüsse 	<p>Anforderungen Markt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veränderte Lieferbedingungen • Verändertes Kaufverhalten • Einführung neuer Produkte <p>Anforderungen Unternehmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der Produktionskapazität • Verbesserung der Wirtschaftlichkeit • Optimierung und Bündelung von Kapazitäten • Veränderung der innerbetrieblichen Logistik

Wenn die geforderte **Anlagenverfügbarkeit** nicht oder nur durch ständige Nachbesserung erreicht wird, sollte eine Modernisierung in Betracht gezogen werden. Gründe für die steigende Anlagenverfügbarkeit sind neben veralteter Technik eine **sinkende Ersatzteilversorgung** und zunehmend **fehlendes Fachwissen** über Komponenten und Anlageteile. Wenn Ersatzteile stark überaltert sind, ist ab einem gewissen Punkt die Versorgung kaum noch möglich. Abgekündigte Teile werden zum Teil durch eigene Konstruktionen und Speziallösungen ersetzt, während gleichzeitig das Anlagen-Know-How sukzessive sinkt. Folgend ist exemplarisch der Verlauf der Verfügbarkeitskurve unter Einbezug der Modernisierung dargestellt. [VDI-4403]

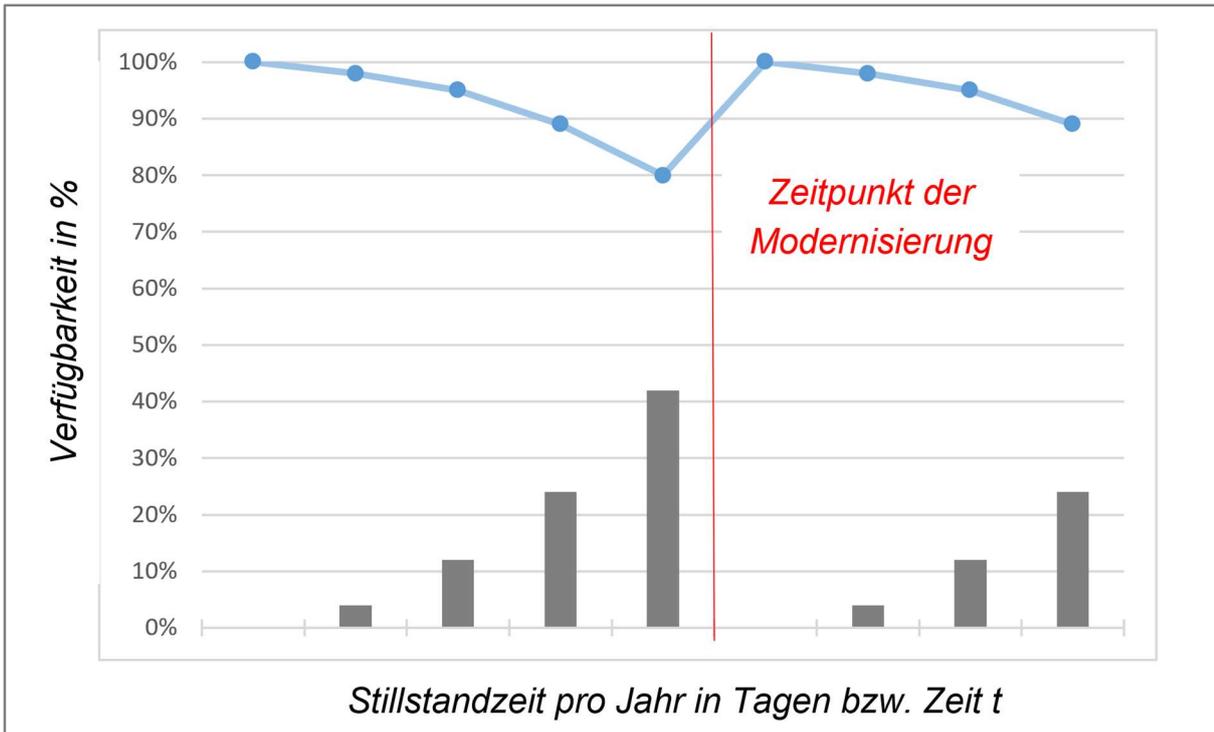


Abbildung 2-15: Auswirkungen von Modernisierungen auf die Verfügbarkeit angelehnt an VDI 4403 [VDI-4403]

Als Folge sinkender Verfügbarkeit steigen mit der Zeit **Ausfall- und Betriebskosten** der Anlage. Gründe dafür sind ein höherer Ersatzteilverbrauch aufgrund von Verschleißerscheinungen sowie längere Ausfallzeiten durch kompliziertere Ausfälle. Weitere Einflussfaktoren sind mangelndes Erfüllen neuer **Sicherheitsanforderungen**, bereits vollends ausgeschöpfte Leistungsreserven oder ergonomische- und arbeitsbedingte Einflüsse wie die Optimierung von Arbeitsabläufen. [VDI-4403]

Genauso können Veränderung am Markt oder im Unternehmen Modernisierungsentscheidungen beeinflussen. Hier lassen sich unter anderem Veränderungen von Lieferbedingungen, verändertes Kaufverhalten oder das Einführen neuer Produkte den **Marktanforderungen** zuschreiben. Zu den Anforderungen aus dem Unternehmen zählen Erweiterungen der Produktionskapazität, Verbesserung der Wirtschaftlichkeit oder die Optimierung von Kapazitäten. [VDI-4403]

3 Wirtschaftlichkeitsanalysen

In Kapitel 3 wird ein detaillierter Überblick über verschiedene Herangehensweisen und Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse gegeben. Nach einer klassifizierenden Einordnung und der Definition wichtiger Grundbegriffe im Kapitel 3.1 befassen sich Kapitel 3.2.1 bis 3.2.3 mit der Vorstellung dreier wichtiger und in der Praxis relevanter Bewertungsverfahren von Projektalternativen. Abschließend wird in Kapitel 3.2.4 ein bewertendes Fazit gezogen.

3.1 Klassifizierung von Bewertungsmethoden

Bewertungsmethoden dienen der wirtschaftlichen Entscheidungsfindung. Als Entscheidung kann die Wahl zwischen mehreren explizit oder implizit vorliegenden Lösungsmöglichkeiten verstanden werden [Mül-1990, S. 78]. Eine Entscheidungsfindung setzt die Kenntnis mindestens zweier klar abgegrenzter Alternativen und der allgemeinen äußeren Umstände sowie die Bewertbarkeit der Handlungsmöglichkeiten voraus [Wes-2012, S. 2].

Bewertungsmethoden lassen sich allgemein in zwei Gruppen unterteilen: **qualitative** und **quantitative**. Der signifikante Unterschied der zwei Kategorien besteht in der Art der Ergebniserfassung. Qualitative Bewertungsmethoden sind nicht in Zahlen messbar, sondern erfassen und vergleichen verschiedene Ergebnisse in beschreibender Form. Quantitative Bewertungsmethoden hingegen dienen der Entscheidungsfindung durch einen zahlenmäßigen Vergleich verschiedener Alternativen. Eine weitere wichtige Differenzierung lässt sich in Bezug auf quantitative Methoden vornehmen. Neben **monetären** Bewertungsmethoden (Wirtschaftlichkeitsberechnung) werden ebenso **nicht-monetäre** Bewertungstechniken (Nutzen- & Kostenbetrachtung) angewandt, um den Entscheidungsprozess unter Berücksichtigung möglichst vieler, verschiedener Faktoren zu vereinfachen. [Gla-2014, S. 133ff.]

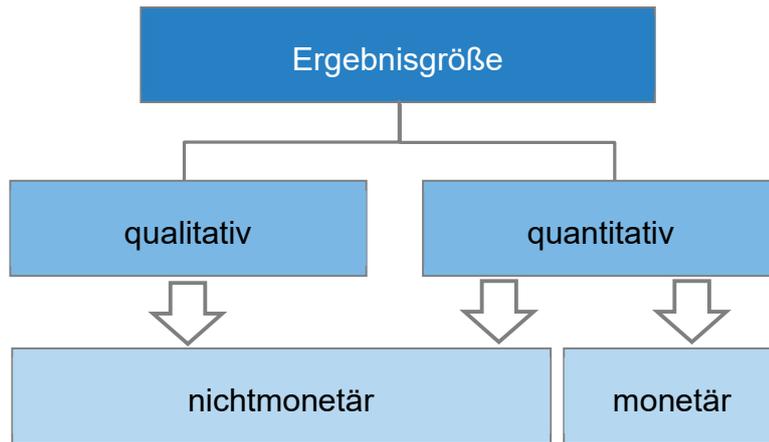


Abbildung 3-1: Übersicht von Bewertungsmethoden angelehnt an Glatte [Gla-2014, S. 133]

Die Grundlage für eine Entscheidungsmethode bilden einheitliche Bewertungsmaßstäbe. Hier kann zwischen zwei Evaluierungsansätzen unterschieden werden. Der Vergleich zwischen zwei Handlungsmöglichkeiten lässt sich sowohl durch eine **ordnale** als auch durch eine **kardinale** Bewertung ausdrücken. [Han-2011, S. 16ff.]

Eine Ordinalskala ist eine Rangskala, welche bei verschiedenen Alternativen eine Rangordnung zum Ausdruck bringt [Aue-2013, S. 98]. Als Kardinalskala hingegen wird eine metrische Skala bezeichnet. Der kardinale Bewertungsansatz drückt neben einer Rangordnung auch ein messbares Verhältnis zwischen verschiedenen Alternativen aus. Damit zeigt eine kardinale Bewertung nicht nur, dass ein Unterschied vorliegt, sondern auch wie groß dieser ist. [Aue-2013, S. 63; Han-2011, S. 16ff.]

Wichtig bei der Anwendung von Entscheidungsmethoden ist die Sicherheit, dass Werte wie angenommen eintreten. Wenn sowohl die Konsequenzen als auch die dazugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit zu 100% bekannt sind, spricht man von **Sicherheit** [Müh-2015, S. 211]. Bei wirtschaftlichen Entscheidungsmethoden, die in die Zukunft gerichtet sind, ist der Eintritt unterstellter Werte oft nicht sicher [Müh-2015, S. 208f.]. Hanusch skizziert dafür drei verschiedene Szenarien [Han-2011, S. 131ff.].

- **Entscheidung bei objektivem Risiko:** Den jeweiligen Zuständen können objektive oder statistische Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, die häufig auf Erfahrungswerten und Daten basieren.
- **Entscheidung bei subjektivem Risiko:** Fehlen statistische Werte zur Beurteilung der Situation, ist es dem Entscheidungsträger nur möglich, aufgrund seiner persönlichen Einschätzung zu handeln.

- **Entscheidung unter Unsicherheit:** Häufig ist eine Entscheidung auch unter Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeits- oder Risikoabschätzung nicht möglich. Basierend auf potenziellen Projektergebnissen unter verschiedenen Umweltzuständen kann dann lediglich unter Unsicherheit entschieden werden.

Abhängig von der statistischen Datenlage gibt es verschiedene Herangehensweisen an die Verwendung von prognostizierten und unsicheren Werten. So kann man bei Entscheidungen in Risikosituationen beispielsweise mit Erwartungswerten rechnen. Bei Entscheidungen unter Unsicherheit können verschiedene Szenarien berechnet werden. [Han-2011, S. 132ff.; Gan-1997, S. 232ff.]

Bei Bewertungsmethoden, die einen längeren Zeitraum beschreiben, muss der zeitliche Einfluss berücksichtigt werden. Um den Zeitwert des Geldes darstellen zu können, werden zukünftige Zahlungsströme Z_t mit dem Diskontierungsfaktor q verrechnet. [Gla-2014, S. 136f.]

$$Z_0 = \frac{1}{q^t} \cdot Z_t \quad (3-1)$$

Z_0 stellt den Wert zum Stichtag, also dem Zeitpunkt $t = 0$ dar. Die Zeit t wird gewöhnlich in Jahren gemessen. Um den Diskontierungsfaktor zu ermitteln, wird der Zinssatz p mit 1 addiert. [Gla-2014, S. 136f.]

$$q = 1 + \frac{p}{100} \quad (3-2)$$

In der Praxis wird bei Investitionsentscheidungen zumeist der **Barwert** verwendet. Der Barwert W_{BW} ist ein finanzmathematisches Instrument. Er beschreibt den gegenwärtigen Wert von Zahlungen, die in der Zukunft erfolgen. Zur Errechnung des Barwerts über mehrere Perioden werden zunächst die Zahlungsströme einzelner Perioden t diskontiert und in der Folge aufsummiert. [Gla-2014, S. 137; Bus-2015, S. 36ff.]

$$W_{BW} = \sum_t W_{BW,Z_t} = \sum_t \frac{Z_t}{(1+p)^t} \quad (3-3)$$

Aufgrund einer Fülle an qualitativen Entscheidungsfaktoren reicht eine rein monetäre Betrachtung oft nicht aus. Daher finden im Kontext von vielschichtigen und komplexen Entscheidungen insbesondere nicht-monetäre Bewertungsmethoden Anwendung. Abbildung 3-2 zeigt eine Übersicht von nicht-monetären Methoden. [Gla-2014, S. 134]

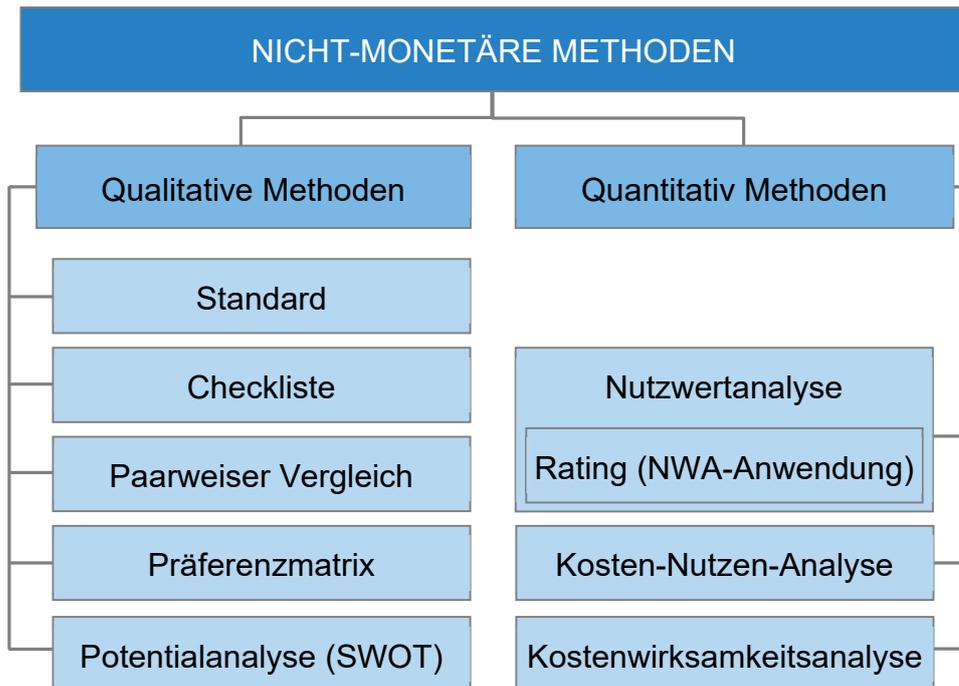


Abbildung 3-2: Übersicht von nicht-monetären Bewertungsmethoden angelehnt an Glatte [Gla-2014, S. 134]

Qualitative Herangehensweisen sind in der Regel deskriptiv und machen eine Bewertung von Auswahlmöglichkeiten nicht leicht. Daher sind bei der Entscheidungsfindung quantitative Methoden wünschenswert und hilfreich. Die gängigsten Bewertungsmethoden sind in der folgenden Übersicht zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, ob die Input- oder die Outputseite der Methode monetär bzw. nicht monetär bewertbar ist. [Gla-2014, S. 134ff.; Müh-2015, S. 160]

Tabelle 3-1: Übersicht der Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse

Art des Verfahrens	Art der Erfassung der Projektwirkungen	
	Output-/Outcomeseite (Nutzen)	Inputseite (Kosten)
Nutzwertanalyse NWA	nichtmonetär (mittels Punktwerten)	nichtmonetär (mittels Punktwerten)
Kosten-Nutzen-Analyse KNA	monetär	monetär
Kostenwirksamkeitsanalyse KWA	nichtmonetär	monetär

3.2 Vorstellung von Bewertungsmethoden

3.2.1 Nutzwertanalyse

Die **Nutzwertanalyse** (NWA) ist eine Bewertungsmethode, die mehrere Alternativen miteinander vergleichbar macht. Sie ist insbesondere dann hilfreich, wenn die Entscheidungsfaktoren kaum oder gar nicht quantifizierbar sind. Ziel der Methode ist zahlenmäßig messbare und nicht-messbare Einflussfaktoren unter Berücksichtigung individueller Gewichtung zu quantifizieren und einen Vergleich verschiedener Szenarien zu ermöglichen. Das Ergebnis dieser Analyse ist der **Nutzwert**. [Han-2011, S. 175; Gla-2014, S. 150]

In der Literatur weichen die beschriebenen Vorgehensweisen verschiedener Autoren leicht voneinander ab. Im Folgenden werden alle betrachtete Methoden nach den beiden Autoren *Hanusch* und *Glätte* beschrieben. Dabei stehen Indizes für verschiedene Alternativen m und Teilziele n . Tabelle 3-2 zeigt das methodische Vorgehen. Zur Veranschaulichung beschreibt der weiß gekennzeichnete Teil die vorbereitenden Schritte. Für die Nutzwertfassung charakteristische Schritte sind in blauer Farbe hinterlegt. [Han-2011, S. 175f.; Gla-2014, S. 150ff.]

Tabelle 3-2: Methodik der Nutzwertanalyse nach Hanusch

I	Erstellen eines Zielsystems
II	Erfassen von Nebenbedingungen
III	Bestimmung von Alternativen
IV	Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse
V	Ermittlung der Zielerfüllungsgrade
VI	Gewichtung der Zielerfüllungsgrade
VII	Amalgamation und Entscheidung

I Zielanalyse

Zunächst werden alle Ziele vollständig, widerspruchsfrei und operational erfasst und zusammengetragen. Das Aufstellen eines Zielsystems kann als das Aufbrechen des Problems in verschiedene Subprobleme oder Teilziele Z_n verstanden werden. In der problemorientierten Zielanalyse werden die einzelnen Teilaspekte sukzessive aggregiert, um das übergeordnete Gesamtziel darzustellen. [Han-2011, S. 164f.]

Glatte betitelt die einzelnen Teilziele mit dem Begriff Kriterien. Zudem nimmt er eine Einteilung in zwei verschiedene Arten von Kriterien vor. **Muss-Kriterien** erfassen die Minimal- und/oder Maximalanforderungen, deren Einhaltung zwingend erforderlich ist. Die Erfüllung von **Soll-Kriterien** hingegen ist lediglich wünschenswert. [Gla-2014, S. 150]

II Erfassung von Nebenbedingungen

In der Folge werden alle relevanten Nebenbedingungen erfasst. Diese können physischer, budgetärer, gesetzlicher, administrativer oder politischer Natur sein. Handlungsalternativen, die mit einer dieser Nebenbedingungen nicht vereinbar sind, fallen bereits an dieser Stelle weg. [Han-2011, S. 11ff.; Lau-2003, S. 10f.]

Nach *Glatte* wird eine Alternative, die mindestens ein „Muss-Kriterium“ nicht erfüllen kann, aus der Analyse gestrichen [Gla-2014, S. 150].

III Bestimmung von Alternativen

Alle Handlungs- oder Projektalternativen A_m werden zusammengetragen [Han-2011, S. 175f.].

IV Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse

Ein wichtiger Schritt der Nutzwertanalyse ist die Entwicklung von **Wirksamkeitsmaßen** und Messung der Zielerträge [Han-2011, S. 176]. Dazu werden die individuellen Faktoren durch das Einführen von Einheiten oder Indikatoren operationalisiert. Im Anschluss müssen die Teilwirksamkeiten w_{nm} auf der Wirksamkeitsskala positioniert werden. Hier sind nominale, ordinale und kardinale Bewertungsskalen denkbar. Während qualitative Wirksamkeiten häufig nur in nominalen oder ordinalen Skalen ausgedrückt werden können, ist es möglich, quantitative Größen auf kardinalen Bewertungsskalen einzuordnen. [Han-2011, S. 166ff.]

V Ermittlung der Zielerfüllungsgrade

Die Teilwirksamkeiten oder Zielerträge w_n der einzelnen Kriterien sind in eine einheitliche kardinale Bewertungsskala umzuwandeln. Jedem Teilziel Z_n wird getrennt nach den Handlungsalternativen A_m ein **Zielerfüllungsgrad** e_{nm} zugeteilt. Die Erfüllungsgrade beschreiben das Ausmaß der Zielerreichung und werden genutzt, um die verschiedenen Kriterien zu quantifizieren. Üblicherweise erfolgt die Einteilung in einem kardinalen Skalensystem und kann unterschiedlich aussehen. Möglich sind Einteilungen nach Punkten oder Aufstellungen von Rangordnungen. [Han-2011, S. 176; Gla-2014, S. 151]

Um diese einheitliche Skalierung zu ermöglichen, wird ein einheitlicher Bewertungsschlüssel benötigt. In der praktischen Umsetzung bietet sich daher an, mit Punktesystemen zu verfahren. So werden physische Größen genauso wie indikative, qualitative Merkmale einheitlich in ein Bewertungssystem übertragen. Gängige Punkteverteilungen sind 1-5, 1-10 oder 1-100. [Han-2011, S. 177f.]

Die folgende Grafik zeigt den möglichen Rahmen einer solchen Skala [Han-2011, S. 179].

Tabelle 3-3: Exemplarische Umrechnungsskala der Zielerfüllungsgrade

Zielsystem	Bewertungsmaßstab	Zielerfüllungsgrade										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Z_1												
Z_2												
Z_3												

VI Gewichtung der Zielerfüllungsgrade

Abhängig von der Bedeutung der jeweiligen Teilziele Z_n für das spezifische Problem werden die einzelnen Zielerfüllungsgrade mit unterschiedlichen Gewichtungen versehen. Diese kann durch den Gewichtungsfaktor g_n in absoluten Zahlen ausgedrückt werden. Auch eine prozentuale Angabe ist möglich. Für jede Alternative wird ein **Teilnutzwert** n_{nm} des betreffenden Teilziels Z_n durch Multiplikation von Gewichtungsfaktor g_n und zutreffendem Zielerfüllungsgrad e_{nm} berechnet. [Han-2011, S. 176ff.; Gla-2014, S. 151]

$$n_{nm} = g_n \cdot e_{nm} \quad (3-4)$$

VII Amalgamation und Entscheidung

Durch Aufsummieren der unterschiedlich gewichteten einzelnen Teilnutzwerte n_{nm} wird ein Gesamtnutzwert N_m für die jeweilige Entscheidungsalternative A_m ermittelt [Han-2011, S. 176].

$$N_m = \sum_n n_{nm} \quad (3-5)$$

Diese dimensionslose Zahl wird häufig als Nutzwert bezeichnet und besitzt nur in Relation zu anderen Nutzwerten Aussagekraft. Durch das Ordnen der verschiedenen

Nutzwerte kann eine Rangfolge aufgestellt und Empfehlungen ausgesprochen werden. Die folgende Tabelle zeigt eine an *Hanusch* angelehnte Nutzwertmatrix, welche die theoretische Berechnung von Nutzwerten zusammenfasst. [Han-2011, S. 181; Gla-2014, S. 151]

Tabelle 3-4: Exemplarische Nutzwertmatrix einer NWA nach *Hanusch* [Han-2011, S. 181]

		Projektalternativen					
		A_1			A_2		
Teilziele	Gewichte	Zielertrag	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielertrag	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Z_1	g_1	w_{11}	e_{11}	$n_{11} = g_1 \cdot e_{11}$	w_{12}	e_{12}	$n_{12} = g_1 \cdot e_{12}$
Z_2	g_2	w_{21}	e_{21}	$n_{21} = g_2 \cdot e_{21}$	w_{22}	e_{22}	$n_{22} = g_2 \cdot e_{22}$
Z_3	g_3	w_{31}	e_{31}	$n_{31} = g_3 \cdot e_{31}$	w_{32}	e_{32}	$n_{32} = g_3 \cdot e_{32}$
Summe	1	Nutzwert von A_1		N_1	Nutzwert von A_2		N_2

Die Nutzwertanalyse ermöglicht unter Berücksichtigung individueller Bewertungsmaßstäbe den Einbezug eines umfangreichen Kriterienkatalogs. Somit wird eine Rangfolge verschiedener Alternativen ermöglicht. Der Fokus liegt ausschließlich auf der Bewertung des Nutzens ohne Berücksichtigung der dafür erforderlichen Kosten. [Müh-2015, S. 162f.; Han-2011, S. 183; Gla-2014, S. 153]

3.2.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Kontrast zur Nutzwertanalyse vergleicht die **Kosten-Nutzen-Analyse** (KNA) Alternativen unter Berücksichtigung von Kosten basierend auf rein monetären Bewertungsmaßstäben. Dabei wird der erwartete Nutzen verschiedener Möglichkeiten den dabei entstehenden Kosten gegenübergestellt. Bei anfallenden Zahlungsströmen wird deren Wert zum Zeitpunkt der Methode berücksichtigt. Die entstehende Differenz von Nutzen und Kosten ermöglicht das Abwägen von Handlungsalternativen. [Sch-1996, S. 208; Han-2011, S. 7ff.; Gla-2014, S. 154] Folgend wird die Methodik dieses Bewertungsansatzes nach *Hanusch* und *Glatt* dargestellt [Han-2011, S. 7ff; Gla-2014, S. 154ff.]. Tabelle 3-5 stellt die Schritte der Methode farblich differenziert vor. Vorbereitende Schritte sind in weiß gekennzeichnet, der für eine monetäre Bewertung charakteristische Part in blau. [Han-2011, S. 7]

Tabelle 3-5: Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse nach Hanusch

I	Bestimmung relevanter Nebenbedingungen
II	Formulierung und Vorauswahl von Alternativen
III	Bestimmung der Projektwirkungen
IV	Zeitliche Homogenisierung
V	Gegenüberstellen von Nutzen und Kosten für verschiedene Alternativen
VI	Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit
VII	Aufstellen einer Rangordnung

I Bestimmung relevanter Nebenbedingungen

Wie bei der Nutzwertanalyse wird zu Beginn die Problem- und Aufgabenstellung beschrieben und dabei erfasst, welche Nebenbedingungen unter allen Umständen eingehalten werden müssen [Han-2011, S. 7].

II Formulierung und Vorauswahl von Alternativen

Die verschiedenen Projektalternativen A_m , welche mit den Nebenbedingungen übereinstimmen, werden zusammengetragen [Han-2011, S. 13f.].

III Bestimmung der Projektwirkungen

In diesem Schritt werden zunächst alle Wirkungen der einzelnen Alternativen gesammelt. Dann erfolgt eine monetäre Bewertung in Form von Nutzen und Kosten. Zur Erfassung der Faktoren in monetärer Form sind viele verschiedene Vorgehen möglich. Für jeden Teilaspekt erhält man dann einen Nutzenwert n_{nm} und einen Kostenwert c_{nm} . Durch Aufsummieren der einzelnen Werte werden für die einzelnen Alternativen A_m der Gesamtnutzen N_m und die Gesamtkosten C_m ermittelt. [Gla-2014, S. 156; Han-2011, S. 15ff.]

$$N_m = \sum_n n_{nm} \quad (3-6)$$

$$C_m = \sum_n c_{nm} \quad (3-7)$$

IV Zeitliche Homogenisierung

Die monetär bewerteten Nutzen- und Kostenwerte werden diskontiert, um den Wert künftiger Zahlungsströme zu berücksichtigen [Han-2011, S. 101ff.]

V Gegenüberstellen von Nutzen und Kosten für verschiedene Alternativen

Auf Basis der ermittelten und zeitlich homogenisierten Ergebnisse werden Nutzen und Kosten der einzelnen Alternativen gegenübergestellt und verglichen. Um eine Auswertung vornehmen zu können, gibt es verschiedene Ansätze. Insbesondere das Kosten-Nutzen-Verhältnis und die Differenz der aufsummierten Nutzen- und Kostenwerte werden häufig genutzt. [Gla-2014, S. 157; Han-2011, S. 119]

$$V_{KNA,m} = \frac{N_m}{C_m} \quad (3-8)$$

$$\Delta_{KNA,m} = N_m - C_m \quad (3-9)$$

VI Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit

In der Folge müssen die einzelnen Werte darauf überprüft werden, wie sicher ihr Eintreten ist. Entsprechend der Risikosituation werden die einzelnen Parameter mit adäquaten Methoden modifiziert. [Gla-2014, S. 7, 131ff.]

VII Aufstellen einer Rangordnung

Abschließend lässt sich auch hier eine Rangfolge der verschiedenen Alternativen basierend auf ihren Kosten-Nutzen-Werten aufstellen [Han-2011, S. 7]. Tabelle 3-6 zeigt zusammenfassend das Vorgehen in Form einer Kosten-Nutzen-Matrix in Anlehnung an *Glatte* [Gla-2014, S. 158].

Tabelle 3-6: Exemplarische Kosten-Nutzen-Matrix nach Glatte

Kriterium	Eigenschaften, Auswirkungen	A_1		A_2	
		Kosten C_{n1}	Nutzen N_{n1}	Kosten C_{n2}	Nutzen N_{n2}
K_1	E_1	C_{11}	N_{11}	C_{12}	N_{12}
K_2	E_2	C_{21}	N_{21}	C_{22}	N_{22}
K_3	E_3	C_{31}	N_{31}	C_{32}	N_{32}
K_n	E_n	C_{nm}	N_{nm}	C_{nm}	N_{nm}
Summe Nutzen			$\sum N_{nm}$		$\sum N_{nm}$
Summe Kosten		$\sum C_{nm}$		$\sum C_{nm}$	
Differenz		$\Delta = \sum N_{nm} - \sum C_{nm}$			
Quotient		$V = \frac{\sum N_{nm}}{\sum C_{nm}}$			

Die KNA ermöglicht eine monetäre Bewertung. Diese kann grundsätzlich eine auf Fakten basierende Entscheidung ermöglichen. Gleichzeitig ist die Voraussetzung, alle Werte zu quantifizieren, problematisch. Zudem kommen qualitative Merkmale wie ökologische Aspekte oder Zeitersparnisse durch den monetären Fokus kaum zum Tragen. Auch die geldmäßige Bewertung von Nutzen kann sich als schwierig erweisen. [Gla-2014, S. 157f.; Müh-2015, S. 188f.]

3.2.3 Kostenwirksamkeitsanalyse

Die **Kostenwirksamkeitsanalyse** (KWA) ist eine Verknüpfung von Nutzwert- und Kosten-Nutzen-Analyse. Das Vorgehen basiert darauf, die in Nutzen gemessenen Nutzwerte (Wirksamkeiten) den entstehenden Kosten gegenüberzustellen. Nutzen und Kosten werden dabei zunächst separat voneinander für die einzelnen Kriterien ermittelt. Während die Kosten in monetären Einheiten ermittelt werden, wird die Nutzenseite durch die Berechnung von Nutzwerten dargestellt. [Gla-2014, S. 159; Han-2011, S. 161; Müh-2015, S. 164]

Tabelle 3-7 verdeutlicht die einzelnen Schritte der Methode nach *Hanusch* und *Glatte* [Han-2011, S. 162; Gla-2014, S. 159f.]

Tabelle 3-7: Methodik der Kostenwirksamkeitsanalyse

I Erstellen eines Zielsystems
II Erfassen von Nebenbedingungen
III Ermittlung der Projektalternativen
IV Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse
V Ermittlung der Zielerfüllungsgrade
VI Gewichtung der Zielerfüllungsgrade
VII Aufsummieren und Ermittlung des Nutzwerts
VIII Erfassung der Kosten
IX Zeitliche Homogenisierung
X Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit
XI Ermitteln der Gesamtkosten
XII Berechnung der Kostenwirksamkeiten

I -III Beschreibung der zu untersuchenden Situation

Wie bei den bereits vorgestellten Methoden wird zu Anfang die Situation beschrieben. Dazu werden wie bei der Nutzwertanalyse zunächst im Rahmen der Zielanalyse die Teilziele Z_n vollständig, widerspruchsfrei und operationalisierbar erfasst. Dann werden einschränkende Nebenbedingungen festgehalten, die unter allen Umständen erfüllt sein müssen. In der Folge sind die verschiedenen Handlungsalternativen A_m zusammenzutragen. [Han-2011, S. 162; Gla-2014, S. 159]

An dieser Stelle der Methodik verändern sich die Herangehensweisen der zwei Autoren. *Hanusch* zufolge verfolgt die Kostenwirksamkeitsanalyse nicht das Ziel, die Einflussgrößen zu einem Gesamtmaß zu vereinen. Die Möglichkeit der Verknüpfung bleibt dem Entscheidungsträger selbst überlassen [Han-2011, S. 161]. Folgend wird der weitere Ablauf anhand der Methodik nach *Glatte* verdeutlicht [Gla-2014, S. 159f.].

IV-VII Ermittlung des Nutzens gemäß NWA

Im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse werden die einzelnen Outputwirkungen wie nach der Nutzwertanalyse durch physische Maße oder Indikatoren quantifiziert und in eine einheitliche Skalierung übertragen. Die einzelnen Teilwirksamkeiten werden durch

Verrechnung von Gewichtungsfaktor und Zielerfüllungsgrad ermittelt. Die Teilnutzwerte werden zu einer Gesamtnutzwert (Wirksamkeit) aggregiert. Analog zum Vorgehen der NWA erhält man einen Nutzwert für jede Projektalternative. [Gla-2014, S. 159]

$$N_m = \sum_n n_{nm} \quad (3-10)$$

VIII–XI Ermittlung der (diskontierten) Kosten gemäß KNA

In der Kostenanalyse werden analog zu Kosten-Nutzen-Analyse alle Kosten in monetärer Form ermittelt, gemessen und bewertet [Han-2011, S. 162]. Diese sind bei unterschiedlichen Zeitpunkten durch Diskontierung zu homogenisieren und anschließend aufzuaddieren [Gla-2014, S. 159].

$$C_m = \sum_n c_{nm} \quad (3-11)$$

XII Ermittlung der Kostenwirksamkeit

Durch Division von Nutzwert und Kosten der einzelnen Alternativen lässt sich die Kostenwirksamkeit ermitteln. Diese ist ein Verhältnis aus Nutzen in nicht monetärer Bewertung und monetär quantifizierter Kosten. [Gla-2014, S. 160]

$$KW_m = \frac{N_m}{C_m} \quad (3-12)$$

Die Kostenwirksamkeitsanalyse kombiniert NWA und KNA und vergleicht Nutzen gemessen in Nutzwerten mit monetär bewerteten Kosten.

3.2.4 Zusammenfassung und Fazit

Die vorgestellten Methoden verfolgen grundsätzlich einen ähnlichen Ansatz, unterscheiden sich aber in ihrer Erfassung von Kosten und Nutzen.

Im Rahmen der NWA können bei Anwendung eines einheitlichen Bewertungsmaßstabs und einer konsistenten Bewertungsskalierung qualitative und quantitative Faktoren miteinander verglichen werden. Somit wird eine Rangfolge nach Nutzwerten verschiedener Alternativen ermöglicht. Diese macht Handlungsoptionen zwar vergleichbar, die resultierende Bewertungseinheit ist allerdings eine dimensionslose Kennzahl. Nur im Vergleichskontext hat diese Zahl eine Aussagekraft. Kostenaspekte werden gar nicht berücksichtigt. [Han-2011, S. 183; Müh-2015, S. 163f.; Gla-2014, S. 153]

Bei der KNA hingegen ist die Wahl der Bewertungsskala in Form von Geldeinheiten vorgegeben, was eine objektive Analyse grundsätzlich ermöglicht. Der Vorteil zeichnet sich vor allem in der einheitlichen Skalierung aus, denn Geld ist bei konsistentem Gebrauch einer Währung immer gleich. Allerdings ist dieses Vorgehen durch die fehlende Möglichkeit, alle Faktoren monetär auszudrücken, limitiert. Zudem ist der Aufwand groß, alle Aspekte in monetäre Größen umzurechnen. [Müh-2015, S. 188f.; Gla-2014, S. 157f.]

Bei Gebrauch der KWA wird versucht, durch eine Verbindung beider Ansätze sowohl Objektivität als auch die Berücksichtigung möglichst vieler Einflussgrößen zu wahren. Zwar ist ein gewisser Grad an Subjektivität nicht zu vermeiden, die objektive Kostenbewertung wirkt diesem aber entgegen. [Müh-2015, S. 187f.]

In der Praxis sind Entscheidungen über Retrofit-Maßnahmen unter den individuellen Rahmenbedingungen verschiedener Unternehmen zu bewerten. Viele der Gründe und Faktoren, die in der Praxis für eine Modernisierungsentscheidung Relevanz haben, sind qualitativer Natur. Diese können nicht monetär dargestellt werden [vgl. Kapitel 2.4.2]. Zur Berücksichtigung dieser Einflussgrößen kann der einheitlich skalierte Nutzwert berechnet werden. Gleichzeitig sind Investitionskosten in monetären Einheiten bekannt. Es ist ebenfalls möglich, Ausfallkosten zu quantifizieren. Risikobewertungen können genutzt werden, um Kosten bei ungeplanten Ausfällen zu errechnen [vgl. Kapitel 2.3.3]. Daher wird für die Methode zur Dringlichkeitsbewertung von Modernisierungsmaßnahmen die **Kostenwirksamkeitsanalyse** ausgewählt.

4 Methodik zur Datenerhebung

Im folgenden Kapitel wird die angewandte Methodik zur Beschaffung von eigenen Daten erläutert. Kapitel 4.1 befasst sich mit der Wahl der Methodik. Dabei werden das Ziel der Datenerhebung, die Herangehensweise sowie die Auswahl der zur Datenerhebung herbeigezogenen Personen beschrieben. Kapitel 4.2 zeigt den konkreten Fragenkatalog für die durchgeführten Expertengespräche. Dieser wird einleitend erklärt und ist zum Verständnis in thematisch abgegrenzte Unterkapitel gegliedert.

4.1 Wahl der Methodik

4.1.1 Ziel der Datenerhebung

Um in Anlehnung an die vorgestellten Bewertungsmethoden eine eigene Methode zur Dringlichkeitsbewertung von Modernisierungsmaßnahmen entwickeln zu können, bedarf es praxisnaher Informationen [vgl. Kapitel 1.2, S.3]. Diese sind in der Fachliteratur nicht zu finden. Im Rahmen einer eigenen Datenerhebung ist es wichtig, herauszuarbeiten, wie die Bewertung von Modernisierungsprojekten in der Intralogistik im Moment geschieht. Beteiligte Interessensgruppen sind genauso herauszuarbeiten wie mögliche Schwachstellen im aktuellen Prozess.

Außerdem müssen diejenigen Einflussfaktoren ausfindig gemacht werden, die in der Praxis relevant sind für eine solche Entscheidung. Folglich ist es das Ziel der Datenerhebung, Faktoren zu sammeln, welche Kosten und Nutzen von Modernisierungsmaßnahmen in der Intralogistik zuzuschreiben sind. Um die Nutzenseite von einer Retrofit-Maßnahme darstellen zu können, sollen verschiedene Modernisierungsgründe gesammelt und deren Bedeutung für die Retrofit-Entscheidung herausgearbeitet werden. Mit Blick auf die Kostenseite dient die eigene Datenerhebung der Analyse von Ausfallfolgen. Besonders im Fokus stehen dabei die im Zuge eines Ausfalls entstehenden Kosten und wodurch diese bedingt sind.

4.1.2 Auswahl der Herangehensweise

Grundsätzlich kann zwischen quantitativen und qualitativen Forschungsmethoden unterschieden werden. Quantitative Herangehensweisen zeichnen sich dadurch aus, dass bereits bestehende Hypothesen oder Theorien auf ihre Gültigkeit in der Realität überprüft werden. Diese Form von aus theoretisch gesammeltem Wissen, das in der Realität durch empirische Beobachtung überprüft wird, nennt man **Deduktion**. [Brü-2008, S. 25f.]

Um eine möglichst repräsentative Aussagekraft über die Validität einer Theorie zu überprüfen, wird bei quantitativer Forschung zumeist **statistisches Sampling** genutzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die befragten Personen das soziale Gefüge der zur untersuchenden Gesamtheit repräsentiert. Wichtig für eine große Aussagekraft ist eine große Anzahl an Befragten. [Brü-2008, S. 20f.]

Im Rahmen qualitativer Forschungsmethoden werden wissenschaftliche Theorien und Hypothesen durch induktives Vorgehen generiert und entwickelt. **Induktion** bezeichnet das Erarbeiten von Theorien basierend auf empirischen Daten und qualitativen Aussagen aus der Praxis [Brü-2008, S. 48]. Ein wichtiger Aspekt beim Einsatz qualitativer Methoden ist das Einbauen von **Rückkopplungsschleifen**. Diese beschreiben, dass Annahmen, Hypothesen und Fragen durch Erkenntnisgewinnung im Laufe der Forschung fortlaufend hinterfragt und angepasst werden. [Brü-2008, S. 19ff.; May-2020, S. 8ff.]

Bei qualitativer Forschung wird **theoretisches Sampling** genutzt. Diese Auswahlstrategie einer Untersuchungsgruppe erfasst in der Regel weniger Fälle als quantitative Verfahren. Die zu untersuchende Gruppe oder das soziale Milieu ist anhand der Fragestellung bereits vorgegeben. Entscheidend ist oft das Erfüllen eines bestimmten Katalogs an Kriterien. [Brü-2008, S. 19ff.]

Die folgende Abbildung 4-1 verdeutlicht den qualitativen Forschungsprozess [May-2020, S. 7].

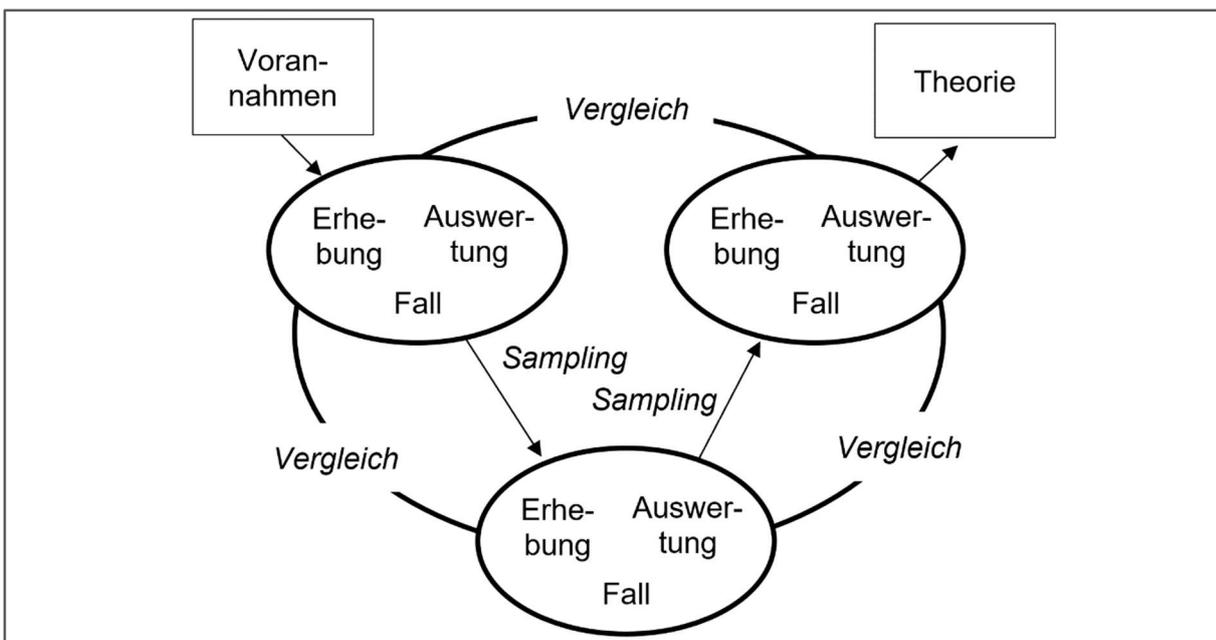


Abbildung 4-1: Qualitatives Forschungsdesign angelehnt an Mayring [May-2020, S. 7]

Die Abbildung zeigt den Einbezug von Rückkopplungsschleifen in qualitativer Forschung. Der zirkuläre Aufbau verdeutlicht das fortlaufende Vergleichen und Anpassen ursprünglicher Annahmen im Verlauf des Forschungsprozesses. [May-2020, S. 7]

Im Rahmen dieser Arbeit sind für die Datenerhebung **qualitative Methoden** zu wählen. Die Wahl der Methodik zur Datenerhebung kann nur im Kontext der Aufgaben- oder Problemstellung vollzogen werden. Nach *Bienefeld und Gausling* bietet sich qualitative Forschung zur Erfassung von Gegenständen an, welche in der Forschung bis dato kaum untersucht worden sind. In diesen Themenfeldern liegen folglich kaum empirisch abgesicherte oder theoretische Kenntnisse vor. Weiter fokussiert qualitative Forschung die individuelle und subjektive Wahrnehmung der Befragten. [Bie-2017, S. 22]

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Methode. Dazu sollen keine Hypothesen überprüft, sondern verschiedene offen formulierte Fragen beantwortet werden [vgl. Kapitel 1.2, S. 3f.]. Folglich sind qualitative Forschungsmethoden für die Arbeit zielführend.

Die Komplexität und Individualität der zu untersuchenden Gegenstände sind hoch. Deshalb erfolgt die Datenerhebung in Form von **Interviews** basierend auf den Ausführungen von *Mey und Mruck* [Mey-2020, S. 317ff.]. So ist es möglich, dem Gesprächspartner individuellen Freiraum zu gewähren und durch konkrete Nachfragen zu komplexen Sachverhalten auf die Umstände des Informationsaustausches eingehen und reagieren zu können [May-2020, S. 4].

4.1.3 Auswahl des Teilnehmerkreises

Basierend auf theoretischem Sampling werden Kontaktpersonen mit hoher fachlicher Expertise im Rahmen eines **Experteninterviews** zu den verschiedenen Aspekten befragt. Experten können als Personen definiert werden, die „sich – ausgehend von einem spezifischen Praxis- oder Erfahrungswissen, das sich auf einen klar begrenzba- ren Problembereich bezieht – die Möglichkeit geschaffen haben, mit ihren Deutungen das konkrete Handlungsfeld sinnhaft und handlungsleitend für Andere zu strukturieren“ [Bog-2014, S. 13]. Der Vorteil von Expertengesprächen geht über die reine Informationsbeschaffung hinaus und umfasst insbesondere die große Praxisrelevanz und Einfluss des Gesprächspartners im berufsübergreifenden Kontext. Experten sind anhand der Forschungsfragen individuell zu bestimmen. [Mey-2020, S. 322; Bog-2014, S. 13f.].

Der Teilnehmerkreis der durchgeführten Gespräche besteht aus Personen in leitender Funktion im Bereich der Logistik und Lagerhaltung. Zu den Gesprächspartnern zählen Lagerleiter, Logistikleiter, Projekt- und Logistikplaner sowie Technik- und Produktionsleiter. Diese haben durch die häufig jahrelange Arbeit im operativen und strategischen Geschäft der Intralogistik einen großen Erfahrungsfundus in Bezug auf RBG, Instandhaltung und Modernisierungsentscheidungen.

4.2 Aufbau der Expertengespräche

4.2.1 Erstellung des Leitfadens

Der Aufbau der Expertengespräche verfolgt einen thematischen Leitfaden. Dieser dient der inhaltlichen Organisation, Steuerung und Überprüfung des inhaltlichen Verlaufs [Mey-2020, S. 327]. Es lässt sich eine Unterteilung in fünf verschiedene Themenblöcke vornehmen:

- A Kategorisierung
- B Entscheidungsprozess
- C Instandhaltung
- D Ungeplante Ausfälle
- E Entscheidungsfaktoren

Die erste Erstellung des Leitfadens erfolgt basierend auf Literaturrecherche in einem deduktiven Prozess. Mit vorangehender Forschung ist der Fragenkatalog im Rahmen von Rückkopplungsschleifen basierend auf den Auswertungen und ersten Erkenntnissen sukzessive anzupassen und zu verbessern [May-2020, S. 8f.]. So ist der Leitfaden für die Expertengespräche insbesondere nach den Erkenntnissen aus den ersten Gesprächen angepasst worden.

4.2.2 Kategorisierung und Einordnung

Im ersten Teil des Interviews soll durch einordnende Fragen ein allgemeiner Überblick erstellt werden. Dazu werden die Experten zunächst über Branchenzugehörigkeit und die Größe ihres Unternehmens befragt. Zur Einordnung werden die Kennzahlen Umsatz und Mitarbeiterzahlen verwendet. Als Umsatz sind die durch den Verkauf von Produkten generierten Einnahmen zu verstehen [Sch-2015, S. 3]. Der Leitfaden beinhaltet weiter die Abfrage der Lager- und RBG-Anzahl sowie die Anzahl der Lagerplätze innerhalb der Lager. Nach VDI Richtlinie 4403 ist Alterung ein wichtiger Einflussfaktor auf Retrofit-Maßnahmen [VDI-4403]. Aus diesem Grund ist die Abfrage des Alters der RBG in dem Fragebogen inkludiert. Retrofits können Leistungssteigerungen der RBG bewirken [VDI-4403]. Zur Untersuchung der Leistungskapazität wird abschließend nach der maximalen Leistung in LE oder ES/DS pro Stunde gefragt [VDI-3561a; VDI-3978].

Tabelle 4-1: Leitfaden 1 - Kategorisierung

A Kategorisierung
In welcher Branche operiert das Unternehmen?
Wie groß ist das Unternehmen (Umsatz/Mitarbeiter)?
Welche Aufgabe/Position hat der Gesprächspartner?
Wie viele automatische Lager werden insgesamt genutzt?
In wie vielen dieser Lager kommen RBG zum Einsatz?
In welcher Lagerart kommen RBG zum Einsatz?
Welche Objekte sind dort gelagert?
Wie viele Lagerplätze fassen diese Lager?
Wie viele RBG kommen pro Lager zum Einsatz?
Was ist das maximale Alter der RBG?
Von welchem Hersteller sind die RBG?
Welche Konstruktionsart haben die RBG?
Was ist die maximale Leistung der RBG?

4.2.3 Aktueller Entscheidungsprozess

In der Folge ist herauszuarbeiten, wie Modernisierungsentscheidungen im Moment getroffen werden. Durch das Expertengespräch sollen beteiligte Interessensgruppen und deren Standpunkte ausfindig gemacht werden. Auch wird nach dem Vorgehen in aktuellen Entscheidungsprozessen sowie dem finalen Entscheidungsträger gefragt. Um den von *Hanusch* behandelten Einfluss des Faktors Zeit in der Methode besser berücksichtigen zu können, wird eine Einschätzung über Dauer und Umfang durchgeführter Retrofit-Projekte abgefragt [Han-2011, S. 101ff.]. In diesem Abschnitt soll zudem der Einfluss von Anbietern von Retrofit-Maßnahmen beim aktuellen Modernisierungsprozess untersucht werden. Es ist wichtig, zu erfahren, wie Betreiber und Anbieter im gegenseitigen Austausch stehen. Dazu gehört auch die Frage, ob Betreiber über alle aktuelle Modernisierungsmöglichkeiten informiert sind.

Tabelle 4-2: Leitfaden 2 - Aktueller Entscheidungsprozess

B Entscheidungsprozess
Wer macht auf mögliche Retrofits aufmerksam?
Wer ist am Entscheidungsprozess beteiligt?
Sind Anbieter am Entscheidungsprozess beteiligt?
Wie ist der Austausch mit Anbietern generell?
Sind Updates und Möglichkeiten von Anbietern immer bekannt?
Wie läuft eine Modernisierungsentscheidung ab?
Wer fällt die finale Entscheidung?
Wie lange dauert die Umsetzung von Retrofit-Projekten?

4.2.4 Instandhaltung

Im dritten Teil des Interviews wird auf die grundlegende Struktur, Art und Umfang der betriebenen Instandhaltung eingegangen. Der Themenblock untersucht die Häufigkeit der Durchführung vorbeugender oder überwachender Instandhaltung. Diese Unterteilung wird von Richtlinie DIN 13306 übernommen [DIN-13306]. Es wird gefragt, ob die Tätigkeiten von internen oder externen Instandhaltern durchgeführt werden. Weiter werden die Tätigkeiten der Instandhaltung spezifiziert und nach der Dokumentation gemäß Richtlinie DIN 528 gefragt [DIN-528].

In Zusammenhang mit der Instandhaltung wird das Auftreten von Ausfällen genauer untersucht. Einleitend wird nach Häufigkeit und Dauer von Ausfällen in normalem Betrieb gefragt. Diese Faktoren sind wesentlich für eine genaue Kostenermittlung [Paw-2016, S. 70ff.; VDI-4403]. Um zukünftige Ausfallkosten zur Bewertung von Modernisierungsmaßnahmen prognostizieren zu können, sind Prognosemodelle von Nöten. Bei der Verwendung von Verfügbarkeitsrechnungen für die Zukunft sind Daten über Ausfälle und Störungen aus der Vergangenheit wichtig [VDI-3580]. Daher umfasst der letzte Part die Abfrage von Dokumentation, Analyse und Prognose von Ausfällen.

Tabelle 4-3: Leitfaden 3 - Instandhaltung

C Instandhaltung
Wie häufig wird regelmäßige Instandhaltung durchgeführt?
Gibt es überwachende/vorbeugende Instandhaltung?
Von wem wird diese Instandhaltung durchgeführt?
Welche Tätigkeiten werden im Rahmen der Instandhaltung durchgeführt?
Wird die Instandhaltung dokumentiert?
Wie häufig kommt es zu Stillständen?
Wie lange dauern solche Ausfälle in der Regel?
Was sind die häufigsten Arten von Ausfällen?
Werden Stillstandzeiten dokumentiert?
Werden die Stillstandzeiten ausgewertet?
Gibt es Prognosemodelle für Ausfälle?

4.2.5 Folgen ungeplanter Ausfälle

Basierend auf den Erkenntnissen des vorherigen Abschnitts sollen an dieser Stelle die Folgen von ungeplanten Ausfällen abgefragt werden. Im ersten Teil dieses Themenkomplexes werden von Unternehmen getroffene Maßnahmen zum Schutz vor ungeplanten Ausfällen analysiert. Dazu soll ermittelt werden, wie kritisch der Ausfall eines RBG in Bezug auf die nach Richtlinie VDI 3581 definierte Gesamtverfügbarkeit ist [VDI-3581]. Die Unternehmen werden daher nach der Kritikalität von RBG befragt. Die Frage nach Maßnahmen gegen ungeplante Ausfälle wird offen formuliert. Denkbar wäre das Erwähnen von Redundanzen oder zeitlichen Puffern [Fis-2004, S. 73]. Zur Ermittlung von Ausfallkosten spielt die Lieferkette eine zentrale Rolle. Daher werden Fragen über die zeitliche Taktung und mögliche Lieferverzögerungen gestellt.

Im zweiten Teil wird gefragt, welche Kosten bei Ausfall eines RBG entstehen und in welcher Form diese erfasst und prognostiziert werden. Der Leitfaden ist in Fragen zu den nach Richtlinie VDI 4403 definierten Primärkosten und Sekundärkosten gegliedert [VDI-4403]. In diesem Teil des Gesprächs ist der Fragenkatalog als Orientierung zu verstehen. Je nach Verlauf und Antwort des Gesprächspartners wird hier entschieden, welche Themen vertieft und welche gegebenenfalls übersprungen werden. Die offen gestellte Eingangsfrage nach entstehenden Kosten kann durch explizite Nachfragen zur Erfassung bestimmter Kosten ergänzt werden [Mey-2020, S. 327].

Bei der Abfrage von Primärkosten wird untersucht, wie Unternehmen unmittelbar auf einen Ausfall reagieren. Ermittelt wird wie Fehlersuche, Fehlerbehebung und Umplanung kostentechnisch erfasst werden. Außerdem kann es zum Einsatz von Alternativlagern kommen. Die dabei entstehenden Kosten für Umplanung und Einlagerung können ebenfalls erfragt werden. Im zweiten Teil des Katalogs wird auf die Sekundärkosten eingegangen. Denkbar sind vertragliche Folgen, Notlieferungen, Imageverluste, Überstunden zur Nacharbeit und Preisnachlässe [Paw-2016, S. 69ff.]. Langfristig können erhöhte Ausfallhäufigkeiten bewirken, dass sich Ersatzteilverräte und damit die Kapitalbindungskosten erhöhen [Paw-2016, S. 294]. Die Erfassung solcher Kosten wird ebenfalls abgefragt.

Tabelle 4-4: Leitfaden 4 - Folgen ungeplanter Ausfälle

D Ungeplante Ausfälle
D.1 Umstände von Ausfällen
Werden RBG als Bottlenecks angesehen?
Werden RBG kritisch angesehen?
Welche Maßnahmen gibt es gegen ungeplante Ausfälle?
Gibt es eingeplante Zeitpuffer?
Ab wann würde es zu einem Lieferverzug bei Ausfall eines RBG kommen?
Wie geht die Supply Chain weiter/ An wen gehen die Objekte?
Wie häufig kommt es zu Lieferverzügen?
D.2 Ausfallkosten
D.2.1 primär
Fall 1: <i>kein Ausweichlager</i>
Welche unmittelbaren Kosten entstehen bei einem Ausfall eines RBG?
Werden Kosten für die Fehlersuche bewertet?
Werden Kosten für die Fehlerbehebung bewertet?
Werden Kosten für die Umplanung bewertet?
Werden Kosten für die Ersatzteile bewertet?
Gibt es Wartezeiten für die Logistik?
Gibt es erneute Anfahrten für die Logistik?
Werden diese monetär bewertet?
Fall 2: <i>internes Ausweichlager</i>
Werden bei Ausfällen interne alternative Lager genutzt?
Werden Kosten für die Umplanung von internen Lagern erfasst?
Kommt es zu Überstunden?
Werden diese bewertet/erfasst?
Fall 3: <i>externes Ausweichlager</i>
Werden bei Ausfällen externe alternative Lager genutzt?
Werden Mietkosten pro Stellplatz gezahlt?
Werden Ein- und Auslagerung von Objekten monetär bewertet?
Wird die Beförderung der Objekte zum Ausweichlager monetär bewertet?
D.2.2 sekundär

Gibt es bei Lieferverzug vertragliche Konsequenzen (Konventionalstrafen, Schadensersatz, ...)?
Wie häufig kommt das vor?
Werden entgangene Erlöse bewertet?
Gibt es Preisnachlasse als Folge von Ausfällen?
Werden Kapitalbindungskosten durch höhere Ersatzteilverhaltung bemessen?
Wie ist ihre Kundenstruktur (viele Großkunden, breite Kundenstruktur, ...)?
Werden bei Ausfall Auslieferungen nach Wichtigkeit der Kunden priorisiert?
Gibt es zusätzliche Logistikkosten bei Notlieferungen (z.B. an Großkunden)?
Werden Imageverluste nach Lieferverzügen bewertet?
Wie sieht eine solche Bewertung aus?
Gibt es Nachbearbeitungskosten/Reklamationsbearbeitungskosten?
Wie werden diese erfasst?

4.2.6 Entscheidungsfaktoren

Der letzte Teil des Expertengesprächs dient dazu, Einflussfaktoren auf die Entscheidung über eine Retrofit-Maßnahme zu sammeln. Ziel ist dabei, den Einfluss einzelner Aspekte sowie die Auswirkung auf die Dringlichkeit zu analysieren. Zur Erfassung der Bedeutung einzelner Einflussgrößen soll dafür möglichst eine Rangfolge oder Kategorisierung durch den Experten vorgenommen werden. Die Frage nach den Einflussfaktoren ist zunächst offen formuliert. Basierend auf den vorgestellten Modernisierungsgründen aus VDI Richtlinie 4403 können dann gezielt Faktoren nachgefragt werden [Mey-2020, S. 327; VDI-4403].

Tabelle 4-5: Leitfaden 5 - Einflussfaktoren auf die Modernisierungsentscheidung

E Einflussfaktoren
Welche Faktoren haben Einfluss auf eine Modernisierungsentscheidung?
Wie wichtig ist Leistungssteigerung?
Wie wichtig ist die Anlagenverfügbarkeit?
Wie wichtig ist die Ersatzteilverfügbarkeit?
Wie wichtig ist die Mitarbeiterentlastung?
Wie wichtig sind Gesetzesänderungen?
Wie wichtig sind Umweltaspekte?

5 Auswertung der Daten

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Expertengespräche dargestellt. Einzelne Unterkategorien grenzen die Frageblöcke thematisch ab. Nach der Einordnung befragter Unternehmen nach allgemeinen Daten in Kapitel 5.1 werden im Teil 5.2 die aktuelle Situation und Vorgehensweisen bei Instandhaltung und Modernisierungen analysiert. Kapitel 5.3 und 5.4 behandeln die Auswertung der Einflussfaktoren auf eine Modernisierungsentscheidung sowie die Folgen ungeplanter Ausfälle.

5.1 Kategorisierung und Überblick

Insgesamt wurden 10 telefonische Expertengespräche über eine Dauer von 45 bis 90 Minuten geführt. Alle Gesprächspartner waren offen und interessiert an einem Austausch zu den Themen, wodurch aufschlussreiche Gespräche mit vielen fachlichen Erkenntnissen zustande kamen. Die Anzahl der Gesprächspartner erlauben aber keine Generalisierung. Nach *Messmer und Hitzler* ist Generalisierung der Versuch, in einem eingeschränkten Untersuchungsfeld bestätigte Annahmen auf eine größere Einheit zu übertragen, die außerhalb der Reichweite der verfügbaren Daten liegt [Mes-2011, S. 60]. Durch die Ergebnisse können Thesen aufgestellt und durch folgende quantitative Forschungsarbeiten auf ihrer Validität überprüft werden.

Zunächst werden die verschiedenen kontaktierten Unternehmen vorgestellt. Um die Anonymität der Firmen zu gewährleisten, werden diese in der Folge durchnummeriert mit den Zahlen 1 bis 10 beschrieben.

Tabelle 5-1: Auswertung 1 - Kategorisierung der Unternehmen

Firma	Branche	Firmengröße		Position des Experten
		Mitarbeiter ges. (vor Ort)	Umsatz	
1	Industrie	1.500	395 Mio.	GF Logistik
2	Industrie	133.800	104,2 Mrd.	Leiter Logistik
3	Logistikdienstleistung	15.713	1.129,4 Mio.	Projekt-/Logistikleiter
4	Industrie	20.132	2.25 Mrd.	Leiter Logistik
5	Industrie	1.100	222 Mio.	Leiter Logistik

6	Industrie	2.000 (250)	55 Mio.	Lagerleiter
7	Logistikdienstleistung	4.500	-	Technikleiter
8	Industrie	8.986	2.855 Mrd.	Lagerleiter
9	Industrie	3.700	7.87,6 Mio.	Leiter Logistik
10	Industrie	2.000 (1.200)	493 Mio.	Leiter Logistik

Die Tabelle zeigt die Unternehmen differenziert nach ihrem Tätigkeitsbereich. Dabei sind mit 8 von 10 Unternehmen der Großteil in der Industrie tätig. Zwei Firmen agieren als Logistik-Dienstleister. Die Darstellung von Mitarbeiter- und Umsatzzahlen dient dem Verständnis von Organisation und Struktur der einzelnen Unternehmen. Hier lassen sich die meisten Firmen als mittelständische Unternehmen bezeichnen. 2 der 10 kontaktierten Firmen sind in Bezug auf Mitarbeiter und Umsatz signifikant größer.

Die verschiedenen Unternehmen unterscheiden sich ferner hinsichtlich ihrer Lagerstruktur. Geordnet nach Unternehmen erfasst Tabelle 5-2 Aufbau, Größe und Struktur des Lagerwesens.

Tabelle 5-2: Auswertung 1 - Übersicht Lagerstruktur

Firma	Anzahl Lager mit RBG / Gesamt	Lagerart	Anzahl RBG / Gassen	Anzahl Lagerplätze	Alter RBG in Jahren (max.)	Hersteller RBG
1	1/7	Palettenlager	4/4	-	6	SSI Schäfer
2	5/5	AKL Fertiglager	3/3 3/3 3/3 8/8 11/11	-	18	Eisenmann, TGW
3	2/2	AKL	11/11	55.000	22	Aberle
4	3/5	Palettenlager Tableaulager Tableaulager	3/3 1/1 1/1	3.000 4.000 800	26	Viastore
5	1/1	Palettenlager AKL	10/10 7/7	5.000 92.500	17	Viastore

6	1/1	Palettenlager AKL	4/4	2.770 5.400	31	SIVApplan, Dambach
7	2/2	Palettenlager 1 Palettenlager 2 AKL 1 AKL 2	4/4 4/4 5/5 3/3	34.000 64.000 20.000	38	SSI Schäfer, TGW
8	1/1	Palettenlager	2/9	6.042	27	Mannesmann Demag
9	1/1	Palettenlager	6/6	5.000- 10.000	>15	WITRON
10	1/1	Palettenlager	2/2	3.500	>15	Viastore

Die meisten Unternehmen nutzen in ihren automatisierten Lagern RBG. Dabei unterscheidet sich die Anzahl eingesetzter Regalbediengeräte von 2 bis 11 Maschinen pro Lager. Mit Blick auf die Struktur der Lager zeigt sich ein einheitliches Bild. Eine Gasse wird in der Regel von genau einem RBG bedient. Dabei können auch mehrere Gassen von einem RBG bedient werden [Hom-2018, S. 206]. Den Gesprächen zufolge agiert ein Unternehmen mit Umsetzern und versorgt 9 verschiedene Gassen mit 2 RBG. Bei der Lagerart kann im Allgemeinen die Differenzierung zwischen Palettenlager und AKL vorgenommen werden. Mit Blick auf die Anzahl der Lagerplätze und die damit verbundene Größe der Lager zeigen sich große Unterschiede. Die Anzahl reicht von 800 bis 92.500 Lagerplätzen pro Lager. Diese große Spannweite macht deutlich, wie unterschiedlich die verschiedenen Lagersituationen sind.

Weiter zeigt die Betrachtung des Baujahres der einzelnen RBG, dass diese in der Regel über Jahrzehnte genutzt werden. Das älteste Regalbediengerät ist bereits seit 38 Jahren im Einsatz. Dadurch kann vermutet werden, dass Verschleißerscheinungen zunehmen und Anlagen nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen [vgl. Kapitel 2.3.1]. Aufgrund der langjährigen Nutzungszeit kommen Retrofit-Maßnahmen bei RBG eine große Bedeutung zu. Bei der Befragung nach dem Hersteller zeigt sich ein heterogenes Bild. Es werden 9 verschiedene Firmen genannt.

5.2 Aktuelles Vorgehen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Auswertung des Vorgehens in der momentanen Situation. Dazu werden die in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 aufgeführten Fragen zusammen

ausgewertet und getrennt nach den Kategorien Instandhaltung und Entscheidungsprozess nacheinander erläutert. Abbildung 5-1 zeigt, wie häufig Unternehmen Wartungen gegen Ausfälle durchführen.

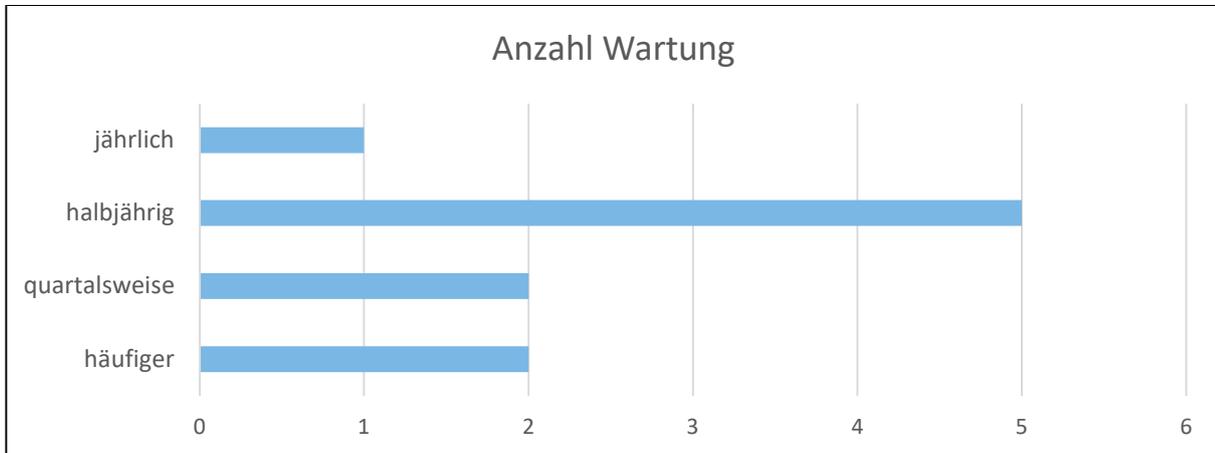


Abbildung 5-1: Auswertung 2 - Anzahl Wartungen pro Jahr

Instandhaltungsaktivitäten werden entweder ausschließlich von der unternehmensinternen Instandhaltung oder im Zusammenspiel mit externen Unternehmen durchgeführt. Alle Unternehmen geben an, vorbeugende Instandhaltung mindestens wöchentlich intern durchzuführen. Größere Wartungen der Anlagen werden durch externe Anbieter vollzogen. Die Anzahl dieser Wartungen schwankt von einmal jährlich bis alle zwei Monate. Durchgeführte Tätigkeiten im Rahmen der Instandhaltung beinhalten laut Experten vor allem Reinigungen und kleinere Reparaturen.

Trotz Instandhaltungsmaßnahmen kann es zu ungeplanten Ausfällen kommen. Es ist allen Gesprächspartnern sehr schwergefallen, Aussagen über allgemeine Ausfallhäufigkeit und -dauer zu treffen. Die Unregelmäßigkeit der Ausfälle erschwert eine Generalisierbarkeit stark. Mit Hinblick auf häufig vorkommende Ausfallarten sind vor allem kurze Stillstände aufgrund von Sensor- und Positionierungsproblemen genannt. Mechanische oder IT-Probleme treten in der Regel seltener auf.

Im Umgang mit Ausfällen ist die Erfassung von Ausfallzahlen- und -arten bedeutsam. Abbildung 5-2 zeigt, wie Ausfälle in den Unternehmen dokumentiert, ausgewertet und prognostiziert werden.

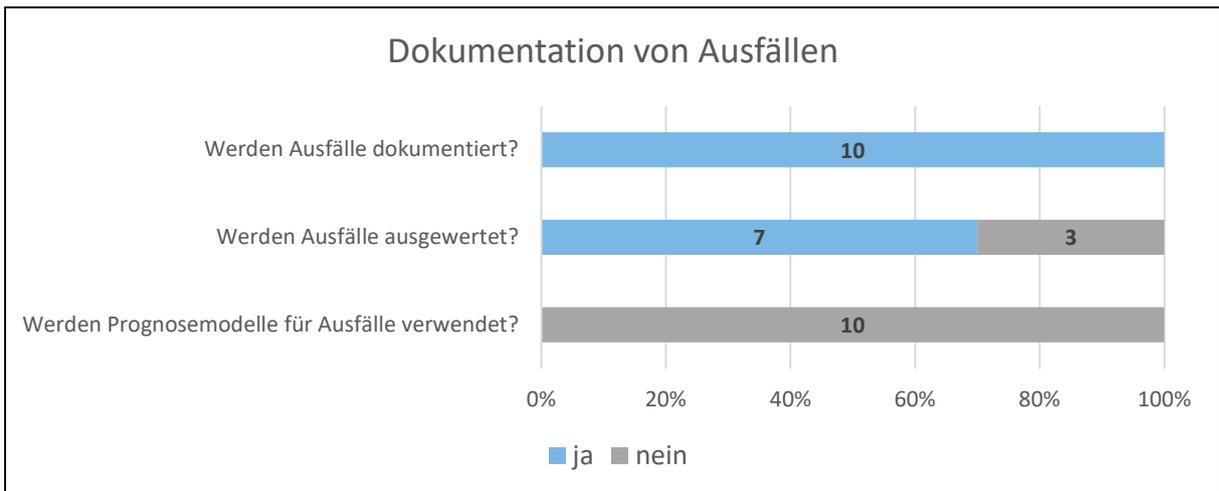


Abbildung 5-2: Auswertung 2 - Dokumentation von Ausfällen

Alle 10 Experten geben an, dass die Instandhaltung dokumentiert wird, 7 der 10 Befragten werten Ausfälle sogar aus. Eine Erkenntnis ist, dass oft mit steigender Ausfallhäufigkeit Analysen und Auswertungen vermehrt zum Einsatz kommen. Prognosemodelle für Ausfallhäufigkeiten kommen in der Praxis nicht zum Einsatz.

Neben der Instandhaltung wirken Betreiber und Anbieter gemeinsam bei Planung, Entscheidung und Umsetzung von Retrofit-Maßnahmen. Die nachfolgende Grafik zeigt, welche Partei Initiator von Modernisierungsmaßnahmen ist.

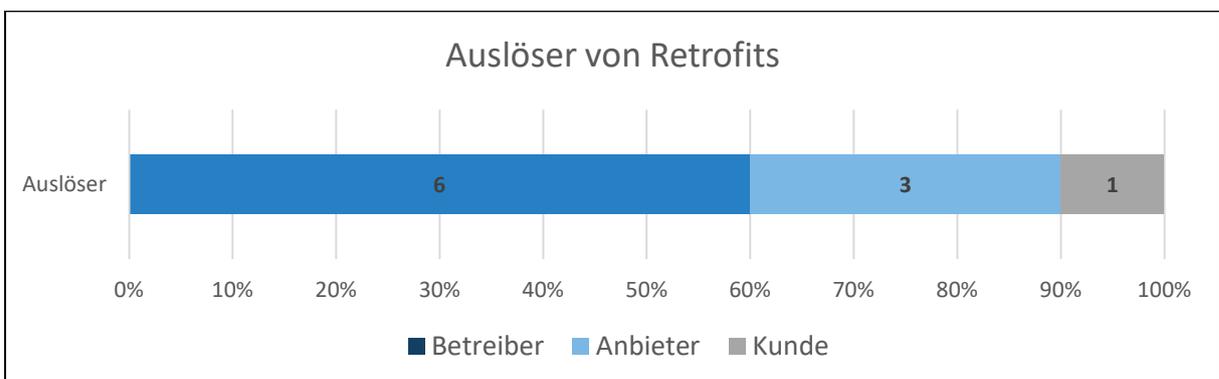


Abbildung 5-3: Auswertung 2 - Auslöser von Retrofits

Die Aussagen der Experten sind unterschiedlich. Der Großteil der Modernisierungen wird durch interne Beobachtungen ausgelöst (6 von 10). Allerdings kann der Anstoß zur Modernisierung auch durch den Anbieter erfolgen (3 von 10). In einem Fall wurden Retrofit-Maßnahmen durch einen Kunden ausgelöst.

Abhängig von Firmenstruktur und -größe sowie Umfang des Retrofitprojekts werden im Verlauf des verschiedene Interessensgruppen involviert. Eine unternehmensübergreifende Vereinheitlichung ist daher schwierig. Der typische Verlauf eines Modernisierungsprojekts lässt sich dennoch anhand der Interviews skizzieren. Die Gespräche ergeben, dass sich in der Regel nach dem ersten Anstoß leitende Mitarbeiter aus Logistik, Lager und Produktion über Modernisierungsmöglichkeiten austauschen. Bei Bedarf findet ein Informationsaustausch mit Anbietern statt, welche Retrofit-Maßnahmen im konkreten Fall geeignet sind. Daraufhin holt der Einkauf zumeist mehrere Angebote ein. Experten zufolge erfolgt die finale Entscheidung aufgrund oft großer Summen meistens durch die Geschäftsführung. Die Entscheidung einer Retrofit-Maßnahme ist also ein langer Prozess, der viele Schritte durchläuft. Neben dem langen Zeitraum wird die Dringlichkeitsbewertung durch unterschiedliche Wissensstände und verschiedene Interessenslagen der beteiligten Personen zusätzlich erschwert.

Bei der Einschätzung, ob Retrofit-Maßnahmen im Normalfall zu einem richtigen Zeitpunkt durchgeführt werden, fällt das Fazit der Experten unterschiedlich aus. Bei einigen, wenigen Unternehmen ist die Bewertung des Zeitpunkts positiv. Ein Großteil der Gesprächspartner hingegen sagt, dass Modernisierungen oft zu spät stattfinden. Als mögliche Begründungen für die Ablehnung oder Verschiebung von Retrofit-Maßnahmen werden exemplarisch die folgenden Aspekte angeführt.

- Retrofit-Maßnahmen sind nicht wertschöpfend, sondern verbessern nur die Verfügbarkeit.
- Solange die Lieferkette funktioniert, wird häufig übersehen, dass es zunehmend zu Problemen mit der Anlage kommt. Der steigende Mehraufwand wird ignoriert.
- Retrofit-Projekte stehen intern in Konkurrenz zu vielen anderen Projekten, welche aus finanzieller Sicht attraktiver wirken.

Diese Aussagen belegen, dass Retrofit-Projekte zuweilen Probleme haben, sich gegen andere Projekte durchzusetzen und wie schwierig es ist, die Dringlichkeit von Retrofits darzustellen.

5.3 Einflussfaktoren auf die Entscheidung

Bei der Auswertung der Gründe für eine Modernisierungsentscheidung ermöglichen die Gespräche eine Einteilung in sechs verschiedene Hauptkategorien. Diese haben unterschiedlich großen Einfluss auf die Dringlichkeit einer Modernisierungsentschei-

Um die qualitativen Aussagen der Gesprächspartner zu erfassen, wird die Dringlichkeit in vier verschiedene Stufen eingeteilt. In aufsteigender Reihenfolge gibt es die Kategorien:

- Kein Einfluss auf die Dringlichkeit (Grün)
- Positiver Nebeneffekt einer Modernisierung (Gelb)
- Wichtiges Kriterium (Orange)
- Ausschlaggebender Grund für Retrofits (Rot)

Tabelle 5-3 repräsentiert die von den Experten als relevant empfundenen Einflussgrößen in Bezug auf Retrofit-Maßnahmen.

Tabelle 5-3: Auswertung 3 - Einflussfaktoren auf die Dringlichkeitsbewertung

		Firma									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ziele	Gesetzesänderung	Grün	Gelb	Grün	Grün	Grün	Gelb	Grün	Gelb	Gelb	Gelb
	Mitarbeiterauslastung	Gelb	Gelb	Grün	Gelb	Gelb	Gelb	Orange	Orange	Gelb	Gelb
	Energieeffizienz	Gelb	Orange	Orange	Gelb						
	Leistung	Gelb	Rot	Orange	Orange	Rot	Orange	Orange	Gelb	Orange	Gelb
	Anlagenverfügbarkeit	Rot	Orange	Grün	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Rot	Rot
	Ersatzteilverfügbarkeit	Orange	Orange	Rot	Rot						

Die Tabelle zeigt unternehmensübergreifend klare Tendenzen auf. **Gesetzesänderungen** fallen bei den meisten Unternehmen kaum ins Gewicht. Die Anlagen müssen zwar den aktuellen Normen entsprechen, die Änderung einzelner Gesetze führt allerdings selten zu einer veränderten Dringlichkeitsbewertung. Am häufigsten finden in diesem Kontext Brandschutzrichtlinien Erwähnung [VDI-3564].

Mitarbeiterentlastung und **Energieeffizienz** werden von den meisten Experten als positive Nebeneffekte einer Modernisierung aufgefasst, sind aber nicht als die unmittelbaren Auslöser zu verstehen. Retrofit-Maßnahmen können Prozessverbesserungen bewirken. Diese beschreiben nach Richtlinie DIN 9241-220 Maßnahmen, die zur Verbesserung der Qualität von Prozessen und Organisation unter Berücksichtigung der Geschäftsanforderungen und den Erfordernissen anderer betroffener Parteien durchgeführt werden. Arbeitsabläufe können effizienter und effektiver gestaltet werden [DIN-

9241-220]. Folglich werden weniger Mitarbeiter an Lagerarbeiten, insbesondere an die korrektive Instandhaltung, gebunden und können sich anderen Tätigkeiten widmen. Gleichzeitig ermöglichen Modernisierungen den Einsatz umweltfreundlicherer Technik und damit einhergehend beispielsweise erhöhte Rückspeisung von Bremsenergie. Energierückspeisungen ermöglichen, dass Energie beim Bremsen und Absenken von RBG wieder ans Netz zurückgegeben wird und den gesamten Energiebedarf reduziert [Rue-2018, S. 19].

Mit Blick auf die **Leistung** und **Anlagenverfügbarkeit** ist zu erkennen, dass 7 bzw. 9 von 10 befragten Experten diese Aspekte mindestens als wichtig einstufen. Für 2 bzw. 3 von 10 sind es sogar entscheidende Gründe. Die Expertengespräche zeigen, dass Leistungssteigerungen oft als Reaktion auf die Forderungen von Kunden angestrebt werden. Einige Experten stellen dar, dass dies auch von Verantwortlichen im Lager als Argument genutzt wird, um Entscheidungsträger mit dem Argument höherer Produktivität von Modernisierungsmaßnahmen zu überzeugen. Anlagenverfügbarkeit definiert sich über Ausfälle. Viele Gespräche ergeben, dass sinkende Verfügbarkeit ein Auslöser für Retrofit-Überlegungen ist. Insbesondere bei Alterung von Anlagen und damit einhergehenden steigenden Ausfallzahlen gewinnt dieser Punkt an Einfluss.

Der Aspekt der **Ersatzteilverfügbarkeit** wird von 8 der 10 Gesprächspartner als entscheidender Einflussfaktor eingestuft und hat damit eine besonders große Bedeutung. Die Kritikalität, oft eng verbunden mit Abkündigungen von Ersatzteilen, wird in der Regel als entscheidender Faktor bei der Dringlichkeitsbewertung angesehen.

5.4 Folgen ungeplanter Ausfälle

Die Antworten zum Themenkomplex der ungeplanten Ausfälle fallen sehr unterschiedlich aus. Es lässt sich festhalten, dass RBG für keinen der 10 Gesprächspartner ein Bottleneck in Hinblick auf die Leistung darstellen. Als Bottleneck oder Flaschenhals ist ein Engpass im Fertigungsprozess zu verstehen [Hom-2011, S. 38]. Allerdings werden die RBG von allen Befragten als kritische Komponenten in der Lieferkette beschrieben.

Die Gespräche zeigen, dass die Folgen und Kosten von Ausfällen kaum zu generalisieren sind und immer eine konkrete Fallbetrachtung vorgenommen werden muss. Es wird deutlich, dass Auswirkungen von Ausfällen stark davon abhängen, wie gut Anlagen und Prozesse bereits im Vorfeld auf einen ungeplanten Stillstand vorbereitet sind. Eine relevante Maßnahme gegen Ausfälle sind eingebaute Redundanzen [Fis-2004, S. 73]. Abbildung 5-4 zeigt, welche Anlagen eine redundante Struktur nutzen.

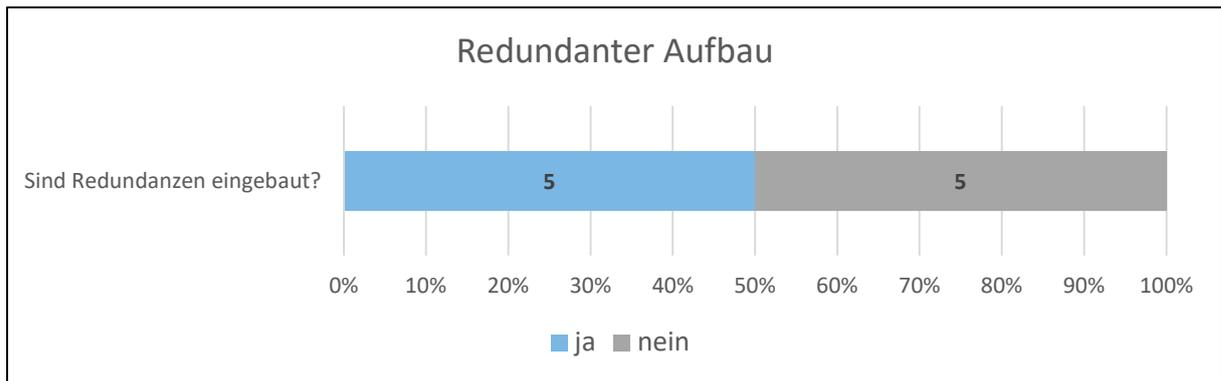


Abbildung 5-4: Auswertung 4 - Redundante Anlagenstruktur

Die Auswertungen ergeben, dass 5 der 10 befragten Unternehmen Redundanzen in ihrem automatisierten Lager nutzen. Als Folge davon stellt sich bei 3 dieser 5 Firmen heraus, dass Ausfälle geringe negative wirtschaftliche Konsequenzen mit sich bringen und auch in der Befragung keine weitere Relevanz hatten. Grund dafür ist die Möglichkeit der Kompensation eines Gassenausfalls [VDI-3581; Fis-2004, S. 73].

Weiter ist von Bedeutung, wie groß der eingeplante zeitliche Puffer ist bis Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Lieferkette entstehen. Bei Erfassung der Pufferzeiten sind Unterschiede im Bereich von einer halben Stunde bis zu einem ganzen Tag aufgetreten. Die Abbildung 5-5 zeigt, wie viel Zeit die einzelnen Lager als Pufferzeit eingeplant haben.

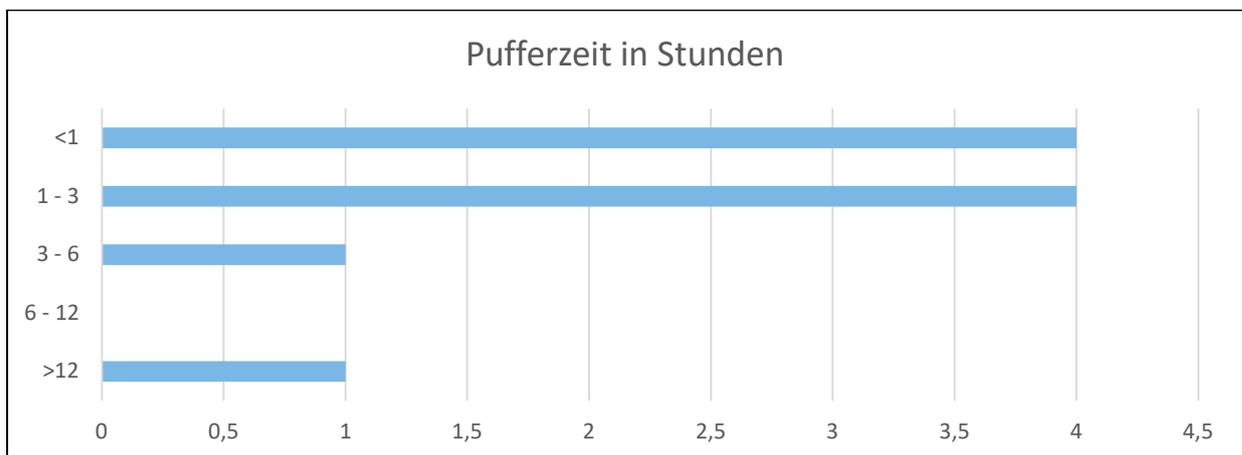


Abbildung 5-5: Auswertung 4 - Pufferzeiten der Anlagenbetreiber

Viele Ausfälle haben keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Lieferkette, sondern können kompensiert werden. 8 von 10 Lager können einen Ausfall ab 3 Stunden nicht kompensieren. Ausfälle über diesen Zeitraum führen zu Auswirkungen auf die Liefer-

kette in unterschiedlicher Art und Weise. Bei der Frage, wie häufig ein Stillstand vorkommt, welcher länger als die Pufferzeit andauert, fallen die Antworten sehr unterschiedlich aus. Eine genaue Quantifizierung ist keinem Experten möglich. Die qualitative Einordnung der Aussagen reicht von der Aussage, dass Ausfälle dieser Art nie vorkommen, bis zu täglichen Ausfällen mit Auswirkungen auf die Lieferkette. Eine generelle Tendenz ist, dass sich Ausfälle dieser Art nicht so häufig ereignen. Weiter sagen alle 10 Befragten, dass das Vorkommen dieser Ausfälle nach einer Modernisierungsmaßnahme stark abnimmt [vgl. Kapitel 2.4.2]. Exemplarisch ist die von einem Experten genannte Entwicklung durch die Retrofit-Maßnahmen von einem Ausfall pro Tag zu einem Ausfall pro Monat zu nennen.

Die beschriebenen Unterschiede von Prävention und Organisation sorgen dafür, dass auch die entstehenden Kosten von den Unternehmen unterschiedlich erfasst werden. Mit Hinblick auf die entstehenden **Primärkosten** verdeutlicht die folgende Abbildung 5-6 relevante primäre Kosten und deren Erfassung.

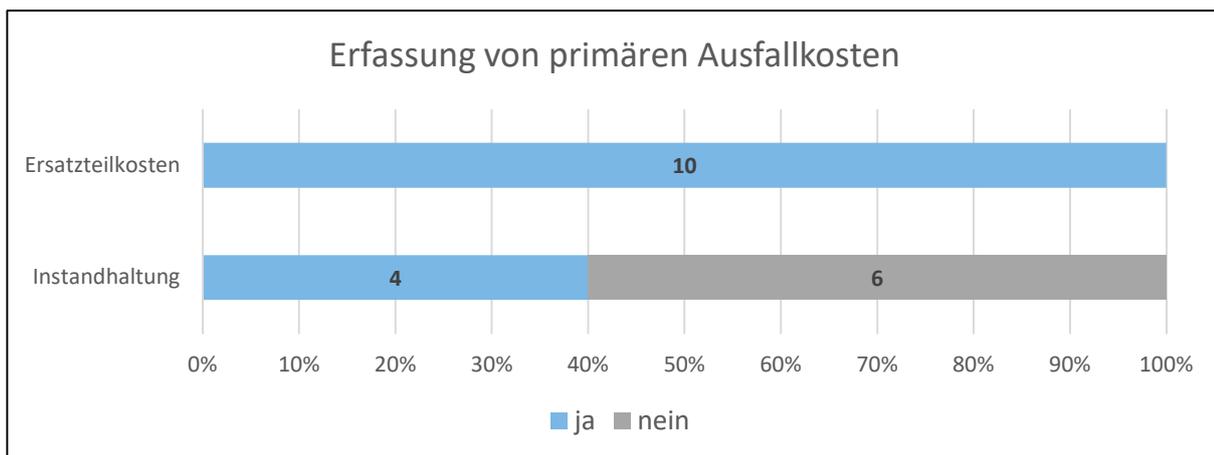


Abbildung 5-6: Auswertung 4 - Erfassung primärer Ausfallkosten

Nach Aussagen der Experten wird beim Ausfall eines RBG in Form von Fehlersuche geschaut, was die Ursache des Ausfalls ist. Gleichzeitig erfolgt Koordination und Umplanung der intralogistischen Lieferkette, um zu gewährleisten, dass es nicht zu Verzögerungen kommt. Dabei ist unternehmensabhängig zu untersuchen, wie das Lager aufgebaut ist. Möglich ist das Abstellen einer Gasse oder Umlagern von Objekten. Im weiteren Verlauf muss der Fehler dann behoben werden [DIN-31051; DIN-13306]. Zudem kann es mitunter dazu kommen, dass Instandhalter sich selbst in die Anlage begeben müssen. Zur Erfassung der hier anfallenden Kosten ist es möglich, die Ausfallzeit mit dem Lohn der **Instandhaltung** zu verrechnen. 4 von 10 Experten geben an, so zu verfahren. Die Mehrheit allerdings erfasst diese Kosten nicht monetär, sondern sieht diese als laufende Kosten der Instandhaltung an. Im Falle des Ausfalls eines Teils

und dem Bedarf eines **Ersatzteils** fallen Wiederbeschaffungskosten an. Diese fallen ebenfalls in die Kategorie der Primärkosten und werden von allen 10 Unternehmen bewertet und erfasst.

In der Folge von Ausfällen kann es bei Stau am Wareneingang gezwungenermaßen zum Einsatz von Alternativlagern kommen. Zur Verdeutlichung der Relevanz von Alternativlagern in der Praxis dient Abbildung 5-7.

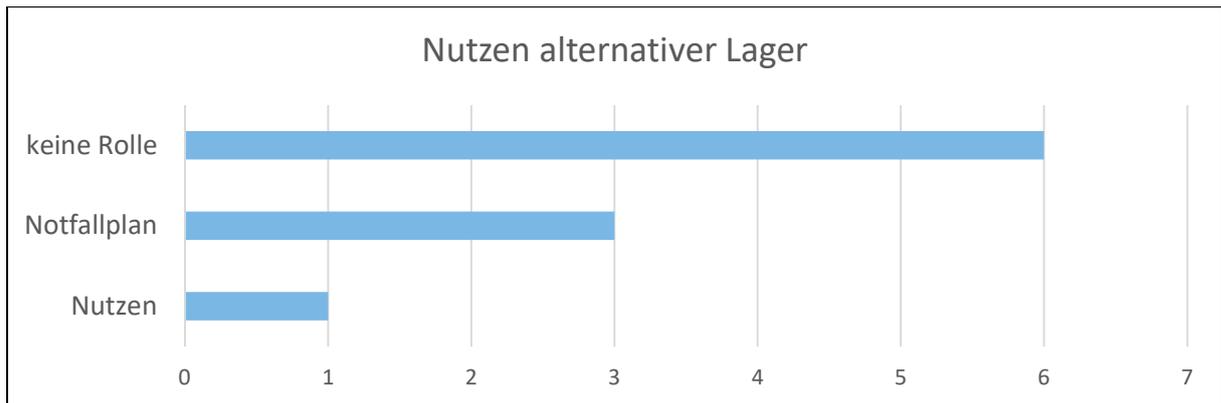


Abbildung 5-7: Auswertung 4 - Nutzen von Alternativlagern

6 der 10 Experten geben von sich, dass Alternativlager keine Rolle in der Planung und Reaktion auf Ausfälle spielen. Immerhin 3 Unternehmen sagen, im Falle eines Notfalls auf alternative Lager zugreifen zu können, diese allerdings noch nicht nutzen mussten. Lediglich ein Gespräch ergab, dass Alternativlager in der Praxis genutzt werden. Dabei entstehen laut dem Gesprächspartner die folgenden Kosten:

- Kosten für die Umlagerung
- Ein- und Auslagerungskosten pro Objekt
- Mietkosten pro Objekt

Abhängig davon, ob ein internes oder ein externes Lager bedient wird, müssen unterschiedliche Auswirkungen bedacht werden. Bei internen wie externen Lösungen entstehen Kosten für Umplanung und Umlagerung, welche zeit- bzw. mengenabhängig bewertet werden können. Bei externen Lagern fallen zusätzlich Kosten für Einlagerung und Miete in Abhängigkeit von der Anzahl an Objekten an.

Bei Ausfällen, die einen Lieferverzug nach sich ziehen, können zudem Kosten für Notlieferungen verursacht werden. Diese Kosten sind stark davon beeinflusst, welche Kundenstruktur die einzelnen Unternehmen aufweisen. Je nach Bedeutung des Kunden kann es zu Priorisierung von Aufträgen kommen. Folglich werden hohe Kosten für

Notlieferungen in Kauf genommen, um einen Lieferausfall zu vermeiden. Beispiele aus den Gesprächen sind Notlieferungen per Auto oder Zug. Folgend ist zu sehen, wie viele Unternehmen Aufträge in der Praxis bei drohendem Lieferverzug priorisieren und potenziell von solchen Notlieferungen betroffen sind.

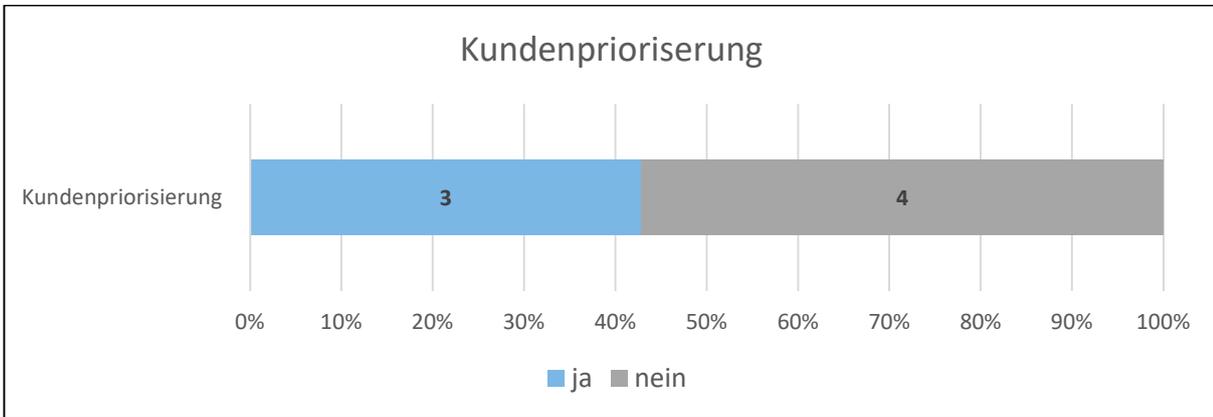


Abbildung 5-8: Auswertung 4 - Priorisierung von Aufträgen

Zu erkennen ist, dass 3 Experten angeben, Lieferungen aufgrund der Kundenstellung zu priorisieren. 4 der 10 Gesprächspartner nehmen aufgrund einer breiten Kundenstruktur keine Priorisierung vor. 2 Experten konnten keine Aussage darüber tätigen. Eine weitere Firma fällt ebenfalls aus der Statistik, da sie lediglich einen Kunden beliefert.

Zusätzlich zu den Primärkosten fallen insbesondere bei schwerwiegenden Ausfällen sekundäre Kosten an [VDI-4403]. Die folgende Grafik zeigt, welche möglichen **Sekundärkosten** wie häufig bei den befragten Unternehmen bedacht und erfasst werden.

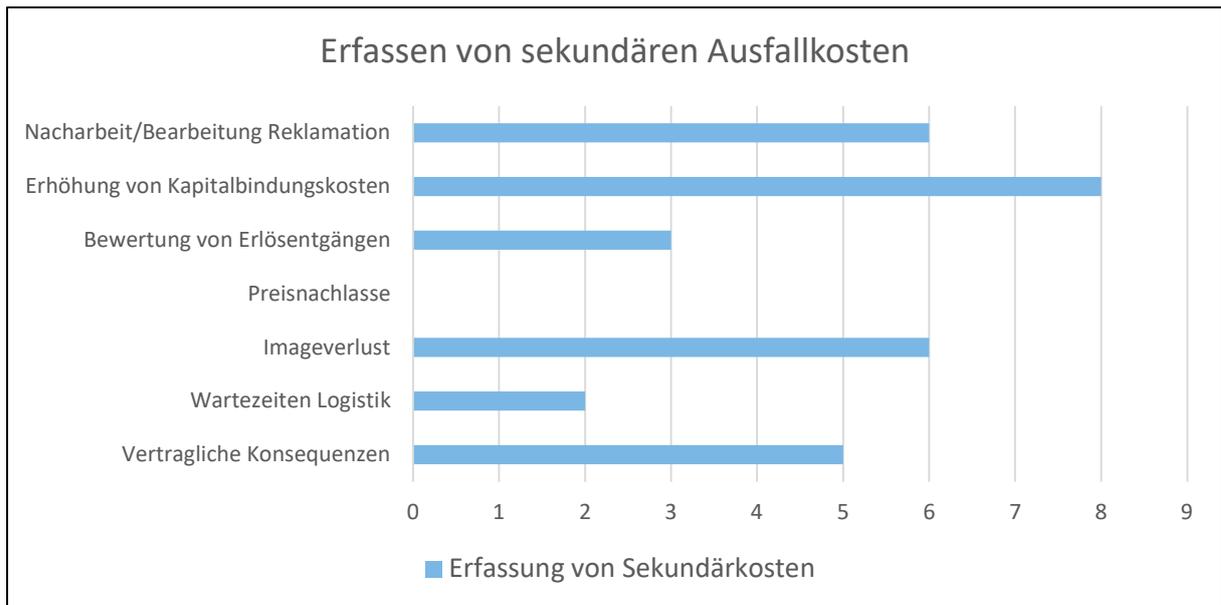


Abbildung 5-9: Auswertung 4 - Erfassung sekundärer Ausfallkosten

Durch die Tabelle wird deutlich, dass in Folge von Ausfällen insbesondere längerer Art **Nacharbeiten** eine wichtige Rolle spielen [Paw-2016, S. 68]. 6 der 10 befragten Experten sagen aus, dass solche Kosten ermittelt werden. Diese werden zumeist von der Instandhaltung ausgeführt und als Mehrarbeit in Form von Überstunden monetär erfasst. Inhaltlich fallen laut Experten Aufarbeitungen von Ausfallursachen, Prüfungen von Verbesserungsmaßnahmen sowie Bearbeitungen von Reklamationen in das Tätigkeitsfeld der Mehrarbeit.

Als Folge von Ausfällen, welche einen Austausch von Bauteilen mit sich bringen, werden zudem steigende **Kapitalbindungskosten** erfasst. Diese kommen durch das Bevorraten von Ersatzteilen zustande [Paw-2016, S. 294]. Auch das Einbauen von Redundanzen erhöht das gebundene Kapital, da kritische Teile für die Produktion doppelt gelagert werden. Hier sagen 8 von 10 Unternehmen, dass diese Art von Kosten dokumentiert werden.

Nur 3 der Befragten geben an, dass **entgangene Erlöse** als direkte Folge von Ausfällen berechnet werden [Bie-2008, S. 26f.]. Viele Experten geben an, dass sie die interne Produktion beliefern. Nicht verkaufte Waren werden als Folge der Produktion und nicht dem Lager zugeschrieben. Eine mögliche Erfassung ist eine Pauschale je nicht verkauftem Produkt. Ähnlich wie das Erfassen von entgangenen Erlösen können **vertragliche Konsequenzen** eine Rolle spielen. So werden Ausfälle in der Produktion sowie Lieferverzögerungen oft mit empfindlichen Strafzahlungen verbunden [Paw-2016, S. 68]. Von den 10 Befragten sagen 5, dass solche Zahlungen vorkommen. Hier werden Unterschiede in der Häufigkeit deutlich. Die Relevanz solcher Zahlungen ist abhängig von

der Branche. Die Befragungen zeigen, dass solche Kosten insbesondere für Logistik-Dienstleister und Zulieferer der Automobilindustrie eine große Rolle spielen. Eine mögliche Erfassung kann pro Minute Produktionsausfall oder pro nicht produzierte Ware beim belieferten Unternehmen erfolgen.

Bei Lieferverzügen kann es zu dem Fall kommen, dass Speditionsunternehmen als Folgestelle in der Lieferkette **Wartezeiten** oder gar unnötige Anfahrten erfahren. Diese lassen sich in Form von Zahlungen pro Stunde verrechnet mit der Wartezeit erfassen. Wiederanfahrten hingegen werden häufiger in Pauschalen ausgedrückt. Von solchen Kostenerfassungen und -erfahrungen berichten 2 der 10 befragten Unternehmen.

Die Befragungen ergeben ferner, dass **Preisnachlasse** als Folge von Lieferverzügen in der Praxis nicht vorkommen. **Imageverluste**, welche schwer zu beziffern sind, werden hingegen als wichtig angesehen [Paw-2016, S. 68ff.]. 6 der 10 befragten Unternehmen versuchen, Imageverluste zu erfassen. Die Quantifizierung erfolgt unterschiedlich. In den Gesprächen werden messbare Größen wie Liefertreue oder Lieferqualität genauso genannt wie eine qualitative Bewertung von „sehr gut“ bis „sehr schlecht“.

6 Methode zur Dringlichkeitsbewertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Expertengespräche auf die vorgestellten Bewertungsmethoden angewandt, um eine Methode zur Analyse der Dringlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen zu entwickeln [vgl. Kapitel 3; Kapitel 5]. Die Durchführung der Methode wird in Kapitel 6.1 vorgestellt. Kapitel 6.2 veranschaulicht das Vorgehen anhand eines konkreten Beispiels. In Kapitel 6.3 und Kapitel 6.4 werden Ersatzteil- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Abschließend beinhaltet Kapitel 6.5 eine Bewertung der Methode hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit.

6.1 Aufbau der Methode

Die Methode zur Dringlichkeitsbewertung von RBG verfolgt den methodischen Rahmen einer Kostenwirksamkeitsanalyse. Zur Orientierung zeigt Tabelle 6-1 den Überblick über die einzelnen Schritte [vgl. Kapitel 3.2.3, S. 44f.].

Tabelle 6-1: Methode - Übersicht Methodik

I Erstellen eines Zielsystems
II Erfassen von Nebenbedingungen
III Ermittlung der Projektalternativen
IV Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse
V Ermittlung der Zielerfüllungsgrade
VI Gewichtung der Zielerfüllungsgrade
VII Aufsummieren und Ermittlung des Nutzwerts
VIII Erfassung der Kosten
IX Zeitliche Homogenisierung
X Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit
XI Ermitteln der Gesamtkosten
XII Berechnung der Kostenwirksamkeiten

I Erstellen eines Zielsystems

Zur Ermittlung des Nutzens, muss ein Zielsystem erstellt werden [Lau-2003, S. 9f.]. Basierend auf der Auswertung der Expertengespräche werden die wichtigsten Entscheidungsgründe als Subkriterien der Entscheidung über Modernisierungsmaßnahmen gesammelt und als Zielsystem zusammengefasst [vgl. Kapitel 5.3]. Diese sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Methode - Zielsystem

Zielsystem	
1. Verfügbarkeit	Anlagenverfügbarkeit Imagebewertung
2. Mitarbeiterauslastung	Produktivität der Instandhaltung Personalkosten (PK) Kosten extern ausgeführter Instandhaltung
3. Leistung	Kapazität Energieeffizienz
4. Gesetzesänderung	Konformität mit aktuellen Gesetzen
5. Ersatzteilsituation	Ersatzteilverfügbarkeit Kapitalbindung durch Vorräte

II Erfassen von Nebenbedingungen

Eine Nebenbedingung, welche unter allen Umständen erfüllt werden muss, ist das Einhalten geltender Gesetze und Normen. Im Fall von intralogistischen Anlagen liegt ein besonderer Fokus auf Sicherheitsvorschriften wie die Einhaltung von Brandschutzrichtlinien [VDI-3564]. Retrofit-Maßnahmen, welche den aktuellen Richtlinien nicht entsprechen, fallen damit bereits an dieser Stelle weg.

III Ermittlung der Projektalternativen

Bei einer Modernisierungsentscheidung wird nicht zwischen zahlreichen verschiedenen Handlungsalternativen entschieden, sondern ob ein Retrofit geschehen soll oder nicht. Daher sind die zwei Handlungsmöglichkeiten **Alternative 1 – kein Retrofit**, welche das Szenario beschreibt, dass die Anlage ohne Modernisierungsmaßnahmen weiterläuft, und **Alternative 2 – Retrofit**, welche den Fall einer potenziellen Retrofit-Maßnahme darstellt. Die Auswahl verschiedener Alternativen kann ausgeweitet werden.

So können Retrofits von unterschiedlichem Umfang miteinander verglichen werden. Auch Angebote verschiedener Anbieter werden vergleichbar gemacht.

IV Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse

Die einzelnen Teilziele werden durch passende Wirksamkeitsmaße operationalisiert. Tabelle 6-3 bietet einen Überblick der Teilziele mit gewählten Wirksamkeitsmaße.

Tabelle 6-3: Methode - Wirksamkeitsmaße für die Einzelziele

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß
1. Verfügbarkeit	
<ul style="list-style-type: none"> Anlagenverfügbarkeit 	Verfügbarkeit in %
<ul style="list-style-type: none"> Imagebewertung 	Liefertreue
2. Mitarbeiterauslastung	
<ul style="list-style-type: none"> Produktivität der Instandhaltung 	Zeit für präventive Instandhaltung in Stunden pro Tag
<ul style="list-style-type: none"> Personalkosten (PK) 	Gebundene PK durch Instandhaltungstätigkeiten in € pro Monat
<ul style="list-style-type: none"> Kosten extern ausgeführter Instandhaltung 	Vertragskosten durch Externe in € pro Monat
3. Leistung	
<ul style="list-style-type: none"> Kapazität 	Maximale LE pro Stunde
	Maximale Anzahl ES/DS pro Stunde
<ul style="list-style-type: none"> Energieeffizienz 	Anteil rückgespeicherter Energie in %
4. Gesetzesänderungen	
<ul style="list-style-type: none"> Konformität mit aktuellen Richtlinien 	In Übereinstimmung mit den aktuellen Richtlinien
5. Ersatzteilsituation	
<ul style="list-style-type: none"> Kapitalbindung durch Vorräte 	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €
<ul style="list-style-type: none"> Ersatzteilverfügbarkeit 	Verfügbarkeitsfaktor

Die meisten Lager bemessen ihre **Verfügbarkeit** durch die Berechnung der Anlagenverfügbarkeit in Prozent [VDI-3581]. Den Expertengesprächen zufolge sind hohe Verfügbarkeitszahlen der Standard und können durch Retrofit-Maßnahmen weiter erhöht

werden. Eine sinkende Verfügbarkeit kann zu einer abnehmenden Liefertreue führen. Diese gibt Auskunft darüber, ob und in welchem Maße zugesagte Liefertermine eingehalten werden [Col-2010, S. 99]. Bei Abnahme der Liefertreue verschlechtert sich die externe Wahrnehmung des Unternehmens in Bezug auf eine potenzielle Zusammenarbeit. Aufgrund der hohen Anforderungen an Lieferanten sind Veränderungen in der Imagebewertung als Folge von Ausfällen sehr sensibel [vgl. Kapitel 1.1, S. 1]. Folglich stellt die Liefertreue ein Wirksamkeitsmaß für die laut Experten schwer messbare Imagebewertung dar.

Ein weiterer Faktor mit Einfluss auf Modernisierungsmaßnahmen ist die **Auslastung** von Mitarbeitern. Dieser Aspekt lässt sich quantitativ schwer beschreiben und wird auch von den Unternehmen selbst häufig nicht zahlenmäßig erfasst. Die Interviews zeigen, dass die Kosten für korrektive Instandhaltungsaktivitäten oft damit abgetan werden, dass Instandhaltungspersonal ohnehin dafür gedacht sei, Ausfälle zu beheben. Diese Art von Kosten, die durch den laufenden Betrieb abgedeckt werden, können als „Eh-da“-Kosten bezeichnet werden [Kle-2010, S. 179].

Dennoch ist es möglich, den Vorteil einer Mitarbeiterentlastung zu quantifizieren. Ein möglicher Ansatz ist es, eine Aufschlüsselung in drei verschiedene Wirksamkeitsmaße vorzunehmen. Nach den Expertengesprächen kann die Arbeitszeit der Instandhaltung wie nach DIN 13306 in präventive und korrektive Instandhaltung unterteilt werden [DIN-13306]. Ein erhöhter Fokus auf präventive Maßnahmen, führt zur Senkung der Ausfallkosten, erhöht aber die Kosten für vorbeugende Instandhaltung [Ryl-2010, S. 29]. Unter der Prämisse, dass präventive Instandhaltung Ausfälle und damit verbundene hohe Ausfallkosten vorbeugend verringert, ist sie reagierenden Maßnahmen vorzuziehen. Daher kann man die Zeit für vorbeugende Instandhaltung pro Tag als Wirksamkeitsmaß nutzen. Je mehr Zeit mit vorbeugender Instandhaltung verbracht wird, desto besser für den Anlagenzustand. Zudem lässt die Auswertung der Interviews darauf schließen, dass ab einem gewissen Grad an erhöhter Produktivität der Instandhaltung gebundene Personalressourcen freigesetzt oder Aufgaben von externen Firmen selbst übernommen werden können. Dadurch, dass die Instandhaltung weniger Ausfälle beheben muss, können potenziell Einsparungen vorgenommen werden. Ein geeignetes Wirksamkeitsmaß ist folglich die Erfassung der jeweiligen Kosten in € pro Monat.

Die **Leistung** des Systems lässt sich vor allem durch die Kapazität ausdrücken. Je nach Erfassung und Datenlage sind maximale Ein- bzw. Auslagerungen pro Stunde oder die maximale Anzahl an Einzel- bzw. Doppelspielen pro Stunde aussagekräftige Wirksamkeitsmaße [VDI-3561a]. Zudem fällt unter diesen Punkt zusätzlich die Energieeffizienz, welche in den Expertengesprächen Erwähnung gefunden hat. Um diese

zu erfassen, bietet sich beispielsweise die Angabe der rückgespeisten Energie in % an.

Gesetzesänderungen können ebenfalls Einfluss auf die Entscheidung über eine Modernisierungsmaßnahme haben. Im Rahmen von Modernisierungsüberlegungen ist zu prüfen, ob bei geplanten Maßnahmen der Bestandschutz von Altanlagen aufgehoben wird oder erhalten bleibt. Wichtig ist, ob eine Anlage mit den aktuellen Gesetzen und Richtlinien konform ist oder nicht. Das hier verwendete Wirksamkeitsmaß ist daher ein binärer Faktor, welcher entweder mit ja oder nein zu beantworten ist.

Die Expertengespräche zeigen, dass die **Ersatzteilsituation** im Vergleich zu allen anderen genannten Faktoren den größten Einfluss auf Modernisierungsentscheidungen hat [vgl. Kapitel 5.3, S. 63f.]. Daher wird das Thema in Kapitel 6.3 gesondert behandelt und analysiert.

V Ermittlung der Zielerfüllungsgrade

Wenn die einzelnen Ziele quantifiziert sind, erfolgt die Umrechnung per einheitlicher Bewertungsskala in Zielerfüllungsgrade. Die Zielerträge werden mit einem sinnvollen Umrechnungsschlüssel auf eine Skala von 1 bis 10 übertragen, wobei 1 die niedrigste und 10 die höchstmögliche Bewertung ist. Die Expertengespräche ergeben, dass es eklatante Unterschiede zwischen den Unternehmen gibt. Insbesondere hinsichtlich der wirtschaftlichen Größe und der Prioritätensetzung muss jedes Unternehmen in seiner Umgebung individuell betrachtet werden [vgl. Kapitel 5.1; Kapitel 5.3]. Daher ist es Aufgabe des Betreibers, an dieser Stelle selbst eine Skalierung festzulegen. Auswertungen der Interviews zufolge stellt zudem die Vielzahl an Interessensgruppen, die an der Entscheidungsfindung beteiligt sind, eine Schwierigkeit bei der Dringlichkeitsbewertung dar [vgl. Kapitel 5.2, S. 62]. Um diese Heterogenität der Standpunkte zu berücksichtigen, werden alle Beteiligten bei der Festlegung der Skalierung eingebunden. Diese Skalierung sollte bei erneuter Bewertung nicht mehr geändert werden, um langfristig eine Vergleichbarkeit zu wahren.

VI Gewichtung der Zielerfüllungsgrade

Die genannten Kriterien haben unterschiedlich großen Einfluss auf die Modernisierungsentscheidung. Diese Differenzen werden durch eine unterschiedlich starke Gewichtung der einzelnen Teilaspekte berücksichtigt. Der Nutzer kann die Methode durch Gewichtung individuell an die Gegebenheiten und Umstände seines eigenen Unternehmens anpassen. Auch hier können Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen durch das Eintragen einer eigenen Gewichtung Einfluss nehmen. In der Folge kann

beispielsweise durch die Berechnung von Mittelwerten eine unternehmensweite Priorisierung ermittelt werden. So sind die Interessen aller betroffenen Abteilungen in der Entscheidung vertreten.

VII Aufsummieren und Ermittlung des Nutzwerts

Zur Ermittlung des Gesamtnutzwerts einer Handlungsalternative werden die einzelnen Teilnutzwerte der zugehörigen 10 Teilziele zu einem Gesamtnutzwert aufsummiert.

$$N_m = \sum_{n=1}^{10} n_{nm} \quad (6-1)$$

VIII Erfassung der Kosten

Nach Ermittlung der Nutzwerte analog zur klassischen Kostenwirksamkeits- bzw. Nutzwertanalyse wird die Kostenseite erfasst. Dadurch, dass den einzelnen Teilzielen des Zielsystems nicht individuell Kosten zugeschrieben werden können, wird der Kostenaspekt durch einen einzigen Kostenfaktor dargestellt, welcher die gesamte Alternative beschreibt.

Die Kosten setzen sich zusammen aus einem Fixkostenanteil und einem Anteil von variablen Kosten.

Während bei der Alternative 1, welche die Situation ohne Retrofit beschreibt, lediglich variable Kosten anfallen, müssen bei der Alternative 2 die **Investitionskosten** als anfallende Fixkosten bedacht werden. Diese sind definiert als von der Produktion unabhängige Kosten, die in voller Höhe anfallen [Her-2015, S. 12; Sch-2019a, S. 274]. Im Kontext der Methode sind diese Kosten entsprechend unabhängig von äußeren Einflüssen wie Ausfällen und können ohne Risikoüberücksichtigung verwendet werden.

Die nach Expertengesprächen schwieriger zu beziffernden **variablen Kosten** sind die Kosten, die im Fall eines Ausfalls entstehen. Expertengespräche zeigen, dass **Ausfallkosten** von Branche, Lieferkettenstruktur und Unternehmensgröße abhängig sind [vgl. Kapitel 5.4, S. 64f.]. Diese Kosten hängen zwar unmittelbar von der Ausfallzeit ab, allerdings ist dieser Zusammenhang nur bis zu einem bestimmten Zeitpunkt linear. Um diese sprunghafte Kostenentwicklung darzustellen, lassen sich zwei unterschiedliche Ausfallkategorien differenzieren.



Abbildung 6-1: Methode - Zusammensetzung variabler Kosten

Ausfallkategorie 1 umfasst alle Ausfälle von RBG, welche keinen Lieferverzug oder anderweitigen Eingriff in die fortlaufende Lieferkette nach sich zieht. In der Regel bedeutet das, dass der Ausfall kürzer ist als die eingeplante Pufferzeit. Die anfallenden Kosten für Ausfallkategorie 1 bestehen demnach aus Fehlersuche, Umplanung und Fehlerbehebung [vgl. Kapitel 5.4, S. 66f.]. Diese werden durch die Multiplikation des Lohns der Instandhaltung mit der Ausfallzeit monetär erfasst. In der Folge wird dieser Wert verrechnet mit der Anzahl beteiligter Instandhalter. Zu den primären Kosten der Ausfälle von Kategorie 1 können zudem Ersatzteilkosten zählen. Diese werden in der Ersatzteilanalyse in Kapitel 6.3 erfasst. Zusammenfassend zeigt Tabelle 6-4 die Kosten von Kategorie 1.

Tabelle 6-4: Methode - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 1

Kosten k	Bewertungsmaßstab
Instandhaltung	
Fehlersuche	Lohn der Instandhaltung in € • Ausfallzeit in min Wartezeit
Umplanung	
Fehlerbehebung	

Ausfallkategorie 2 beschreibt alle Ausfälle, bei denen die Länge des Ausfalls die Pufferzeit überschreitet und Auswirkungen auf die Lieferkette resultieren. Den Expertengesprächen zufolge sind diese Ausfälle deutlich seltener, bringen aber hohe Kosten mit sich [vgl. Kapitel 5.4, S. 66]. Zur Festlegung der Ausfallkategorien müssen Pufferzeiten, Redundanzen und die Struktur der Lieferkette individuell ermittelt werden. Die unterschiedlichen in Ausfallkategorie 2 anfallenden Kosten k und deren Erfassung basieren auf den Nennungen der Experten [vgl. Kapitel 5.4, S.68ff.]. Tabelle 6-5 fasst alle in den Experteninterviews erwähnten Kosten zusammen.

Tabelle 6-5: Methode - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 2

Kosten k	Bewertungsmaßstab
Logistikkosten	
Wartezeit	In € pro Stunde • Wartezeit
Wiederanfahrt	Pauschale in €
Alternativlager	
Umplanung	Lohn Instandhaltung in € • Zeit für Umplanung
Umlagerung	Transportkosten für Umlagerung in €
Ein- bzw. Auslagerung	Kosten in € pro Einlieferung • Anzahl Objekte
Mietkosten	In € pro Stellplatz • benötigte Stellplätze
Notlieferung	Kosten in € für Nottransport (Auto, Taxi, usw.)
Vertragliche Konsequenzen	
Konventionalstrafen	Kosten in € pro nicht verkaufte Ware/ pro Minute Produktionsausfall
Schadensersatz	
Aufarbeitung	
Nacharbeitung	Anzahl Mitarbeiter • Überstunden in € pro Stunde • Anzahl Überstunden
Reklamation	

IX Zeitliche Homogenisierung

Nach Erfassung der Kosten erfolgt die zeitliche Homogenisierung durch die Berücksichtigung von Diskontierung. Trotz der Unsicherheit in Bezug auf den Zeitpunkt des Eintretens von Ausfallsituationen, ist eine solche zeitbasierte Bewertung zwar möglich, wird aber im Rahmen der Arbeit zur Veranschaulichung vernachlässigt.

X Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit

Anders als bei der Nutzenbetrachtung oder dem Erfassen der Investitionskosten sind die Kalkulationswerte der Ausfallkosten nicht sicher. Zum Erfassen dieser Kosten bedarf es **Prognosemodellen** für Anlagenausfälle. Zwar erfassen die meisten befragten Unternehmen die Ausfälle, Vorhersagemodelle kommen allerdings in der Praxis nicht zum Einsatz [vgl. Kapitel 5.2, S. 61]. Es lassen sich dennoch einige Tendenzen mit Blick auf Ausfallwahrscheinlichkeiten aus den Experteninterviews festhalten.

- die Ausfallwahrscheinlichkeiten nehmen mit Alterung der Anlagen zu
- die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Kategorie 1 ist deutlich höher als die eines Ausfalls der Kategorie 2

Zur Berechnung der Ausfallkosten ist im Optimalfall ein Prognosemodell bekannt, das jedem Ausfallereignis abhängig von der Ausfalllänge eine eigene Ausfallwahrscheinlichkeit zuordnet. In der Praxis sind solche Modelle kaum realisierbar [Lei-2017, S. 28ff.]. Dennoch können Schätzungen vorgenommen werden, welche Ausfallzeiten mit Ausfallhäufigkeiten verbinden [Lei-2017, S. 32f.]. Dazu ist es grundsätzlich möglich, durch die Auswertung von Ausfallzahlen aus der Vergangenheit und systematisches Fortführen der Tendenzen vorheriger Jahre Prognosemodelle zu entwickeln.

In den folgenden Schritten wird angenommen, dass Ausfallhäufigkeiten abhängig von Ausfallzeiten a in Minuten bekannt sind. Diese Annahme ermöglicht die Berechnung von Ausfallkosten für einzelne Ausfallzeiten und bietet die Grundlage aller folgenden Kalkulationen.

Zunächst werden basierend auf den Berechnungen von Risikowerten die jährlich prognostizierten Ausfallkosten $C_{m,t,a}$ einer bestimmten Alternative m im Jahr t mit der Ausfallzeit a durch die folgende Formel ermittelt.

$$C_{m,t,a} = W_{m,t,a} \cdot \sum_{k=1}^n C_{m,t,a,k} \quad (6-2)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $W_{m,t,a}$ wird durch die Ausfallhäufigkeit der Ausfalldauer a im Jahr t ausgedrückt. Diese Ausfallhäufigkeit pro Jahr und die dazugehörige Ausfallzeit sind entscheidend für die Höhe der Ausfallkosten. Durch den Index k werden alle pro Ausfall anfallenden Kosten wie Umplanungs- oder Logistikkosten beschrieben. Um die Jahreskosten $C_{m,t,a}$ eines bestimmten Jahres für eine bestimmte Ausfalldauer zu berechnen, werden alle anfallenden einzelnen Kosten $C_{m,t,a,k}$ pro Ausfall aufaddiert und mit der Ausfallhäufigkeit dieses Ereignisses pro Jahr $W_{m,t,a}$ verrechnet.

Da sich mit der Zeit sowohl Länge als auch Häufigkeit prognostizierter Ausfälle verändern, müssen die Prognosemodelle mit der Zeit angepasst und die Berechnungen neu durchgeführt werden. Daher verändert sich für die verschiedenen Jahre die Ausfallhäufigkeit $W_{m,t,a}$. Angenommen, dass die Durchführung einer Retrofit-Maßnahme zwei Jahre benötigt, können für die ersten zwei Jahre des Betrachtungszeitraums die gleichen Prognosemodelle für die Ausfälle und Kosten beider Alternativen genutzt werden. Ab dem Zeitpunkt, an welchem die Modernisierung abgeschlossen ist, verändern sich die Ausfallkurven. Da angenommen werden kann, dass die Ausfallhäufigkeit der Alternative Retrofit nach einem Umbau deutlich sinkt, muss ab dem Zeitpunkt abgeschlossener Maßnahmen eine Differenzierung vorgenommen werden [vgl. Kapitel 5.4, S. 66].

XI Ermitteln der Gesamtkosten

Nach Ermittlung der Einzelkosten abhängig von den Ausfallzeiten prognostiziert für ein Jahr können durch Kumulation die jährlichen variablen Kosten der verschiedenen Alternativen errechnet werden. Für die Kosten $C_{m,t}$ im Jahr t werden alle Kosten verschiedener Ausfallzeiten a in Minuten hochlaufend aufsummiert.

$$C_{m,t} = \sum_{a=1}^n C_{m,t,a} \quad (6-3)$$

Problematisch ist, dass es kein Prognosemodell gibt, welches jeder Ausfallzeit eine Ausfallhäufigkeit zuordnet. Denkbar ist daher, für die Berechnung der Ausfallkosten eine Kategorisierung nach der Ausfalldauer vorzunehmen. So können beispielsweise alle Ausfälle der Dauer $a = 0 - 10$ Minuten eine Kategorie darstellen, welche mit den gleichen Ausfallkosten z.B. den Kosten für $a = 10$ Minuten bewertet werden. Die Berechnung der variablen Jahreskosten sieht folglich so aus:

$$C_{m,t} = C_{m,t,10} + C_{m,t,20} + C_{m,t,30} + C_{m,t,40} + \dots + C_{m,t,n} \quad (6-4)$$

Nach Erfassung der jährlichen variablen Kosten werden die variablen Gesamtkosten einer Alternative errechnet. Diese werden durch die Summe aller jährlichen variablen Kosten über einen bestimmten Betrachtungszeitraum beschrieben. Basierend auf den Ergebnissen der Experteninterviews kann bei Retrofit-Maßnahmen von Idee bis zum Abschluss der Umbauarbeiten von einer Dauer von mehreren Jahren ausgegangen werden. Ausgehend von der Annahme, dass ein Retrofit-Projekt binnen zwei Jahren abgeschlossen werden kann, bieten sich Betrachtungszeiträume von 5 bis 10 Jahren an. Zur Ermittlung der variablen Kosten $C_{m,var}$ werden die jährlichen Kosten über den gesamten Betrachtungszeitraum von n Jahren aufaddiert.

$$C_{m,var} = \sum_{t=1}^n C_{m,t} \quad (6-5)$$

Durch die Summe der variablen Kosten $C_{m,var}$ mit den Fixkosten $C_{m,fix}$ können dann die Gesamtkosten einer Alternative ermittelt werden.

$$C_m = C_{m,fix} + C_{m,var} \quad (6-6)$$

Fixkosten fallen nur im Fall einer Investition an. Daher sind die variablen Kosten von Alternative 1 gleichbedeutend mit den Gesamtkosten der Alternative.

Um die Gesamtkosten mit dem Nutzwert vergleichen zu können, werden die errechneten Werte um 5 Dezimalstellen verschoben und in die gleiche Einheit übertragen.

$$C_m = C_m \cdot \frac{10^{-5}}{\text{€}} \quad (6-7)$$

Die folgende Übersicht fasst alle Schritte zur Kostenermittlung zusammen.

Ausfallkosten der Alternative m in Jahr t für Ausfallzeit a abhängig von Ausfallhäufigkeit $W_{m,t,a}$	$C_{m,t,a} = W_{m,t,a} \cdot \sum_{k=1}^n C_{m,t,a,k}$
Ausfallkosten der Alternative m in Jahr t	$C_{m,t} = \sum_{a=1}^n C_{m,t,a}$
Ausfallkosten der Alternative m über n Jahre	$C_{m,var} = \sum_{t=1}^n C_{m,t}$
Gesamtkosten für Alternative m	$C_m = C_{m,fix} + C_{m,var}$

Abbildung 6-2: Methode - Zusammenfassung der Kostenberechnung

XII Berechnung der Kostenwirksamkeiten

Nachdem Nutzwerte und Kosten der verschiedenen Alternativen ermittelt wurden, ist es möglich, eine Kostenwirksamkeitsberechnung durchzuführen. Dazu werden Nutzen und Kosten in Form der Kostenwirksamkeit ins Verhältnis gesetzt.

$$KW_m = \frac{N_m}{C_m} \quad (6-8)$$

Die Alternative mit der höheren Kostenwirksamkeit ist zu präferieren.

6.2 Anwendung der Methode

Zur Verdeutlichung des Vorgehens wird in der Folge anhand eines Business-Cases schrittweise die Anwendung der Methode erläutert. Dazu werden fiktive Werte eingefügt, welche auf den Erkenntnissen der Expertengespräche basieren.

I – III Beschreibung der Situation

Das folgende Beispiel vergleicht die Option, kein Retrofit durchzuführen mit einem Retrofit, welches 2 Jahre nach Planungsbeginn abgeschlossen ist. Beide Optionen sind mit den Richtlinien in Konformität. Ein Ausschluss aufgrund nicht erfüllter Nebenbedingungen liegt nicht vor. Es wird ein Zeitraum von 5 Jahren betrachtet.

IV Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse

Im Rahmen des vierten Schritts zeigt Tabelle 6-6 fiktive Zielerträge einzelner Teilziele.

Tabelle 6-6: Methode Beispiel - Zielertragsanalyse

		Alternative 1 kein Retrofit	Alternative 2 Retrofit
Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	w ₁	w ₂
Verfügbarkeit			
Anlagenverfügbarkeit	Verfügbarkeit in %	98,2	99,1
Imagebewertung	Liefertreue	hoch	sehr hoch
Mitarbeiterauslastung			
Produktivität der Instandhaltung	Zeit für präventive Instandhaltung in Stunden pro Tag	4,8	5,5
Personalkosten	Gebundene PK durch Instandhaltungstätigkeiten in € pro Monat	9.000	9.000
Kosten extern ausgeführter Instandhaltung	Vertragskosten durch Externe in € pro Monat	1.000	500
Leistung			
Kapazität	Maximale LE pro Stunde	60	90

	Maximale Anzahl ES/DS pro Stunde	-	-
Energieeffizienz	Anteil rückgespeicherter Energie in %	0	19
Gesetzesänderungen			
Konformität mit aktuellen Richtlinien	In Übereinstimmung mit den aktuellen Richtlinien	Ja	Ja
Ersatzteilsituation			
Kapitalbindung durch Vorräte	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €	9.500 €	7.000 €
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	-37,2	-7

In den Expertengesprächen wurde deutlich, dass die Anlagenverfügbarkeit in der Regel bei nahe 100% liegt. Daher sind die Werte 98,2% und 99,1% als realitätsnah einzuschätzen. Bei der Imagebewertung durch Liefertreue wird eine ordinale Bewertung in Form qualitativer Aussagen vorgenommen. Während die Liefertreue bei Alternative 1 bereits hoch ist, ermöglicht die Modernisierung noch eine Steigerung. Mit Blick auf die Mitarbeiterauslastung stehen 4,8 Stunden für präventive Instandhaltung 5,5 Stunden pro Tag im Falle eines Retrofits gegenüber. Durch die Erhöhung kann langfristig als Folge der Modernisierung sogar der Vertrag mit einem externen Anbieter für Instandhaltungsaktivitäten gekündigt und dessen Aufgaben selbst übernommen werden. Personalkosten sind bei beiden Alternativen gleich hoch und spielen damit bei der Bewertung keine Rolle. Mit Blick auf die Leistung ist eine Verbesserung von 60 auf 90 LE pro Stunde zu erkennen. Diese Zahlen sind von einem der Gesprächspartner exakt so genannt worden. Während bei alten Anlagen Energierückspeisungen noch keine Rolle spielen, ermöglicht der Einsatz effizienterer Technik nach der Modernisierung eine Rückspeisung von 19%. Beide Alternativen stimmen mit den aktuellen Normen überein.

In Hinblick auf die Ersatzteilsituation zeigen die Expertengespräche, dass in der Praxis große Schwankungen vorkommen. Keiner der Gesprächspartner konnte einen genauen Wert des gebundenen Kapitals durch Ersatzteillagerung nennen. Exemplarisch dienen an dieser Stelle die Werte 9.500 € und 7.000 €. Das zeigt, dass Retrofit-Maßnahmen eine bessere Verfügbarkeit von Ersatzteilen und geringe Ausfallhäufigkeiten bewirken. So müssen insgesamt weniger und weniger teure Teile gelagert werden. Auch in Bezug auf die Ersatzteilverfügbarkeit erzielt die Alternative Retrofit eine klare Steigerung von -37,2 auf -7 Punkten. Die Einordnung dazu erfolgt in Kapitel 6.3.

V Ermittlung der Zielerfüllungsgrade

Zur Umwandlung in Zielerfüllungsgrade wird Tabelle 6-7 gezeigt. Die Teilziele können nur unternehmensabhängig skaliert werden. Exemplarisch sind in die Skala Werte für ausgewählte Teilziele eingetragen, die unternehmensübergreifend ähnliche Größenordnungen besitzen. Die Übergänge zwischen zwei Zielerfüllungsgraden dienen hier nur der Veranschaulichung und müssen zuvor so definiert werden, dass jedem Zielertrag genau ein Zielerfüllungsgrad zugeschrieben werden kann. Dabei kann nach dem Prinzip „größer gleich“ oder „kleiner gleich“ verfahren werden.

Tabelle 6-7: Methode Beispiel - Umrechnungsskala für die Einzelziele

		Zielerfüllungsgrade									
Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Verfügbarkeit											
Anlagenverfügbarkeit	Verfügbarkeit in %	< 94	94 -	95 -	96 -	97 -	97,5 -	98 -	98,5 -	99 -	99,5 -
Imagebewertung	Lieferqualität		95	96	97	97,5	98	98,5	99	99,5	100
Mitarbeiterauslastung											
Produktivität der Instandhaltung	Zeit für präventive Instandhaltung in Stunden pro Tag										
Personalkosten	Gebundene PK durch Instandhaltungstätigkeiten in € pro Monat										
Kosten extern ausgeführter Instandhaltung	Vertragskosten durch Externe in € pro Monat										
Leistung											
Kapazität	Maximale LE pro Stunde										
	Maximale Anzahl ES/DS pro Stunde										
Energieeffizienz	Anteil rückgespeicherter Energie in %	< 5	5 -	9 -	12 -	15 -	18 -	20 -	22 -	25 -	> 30
9			9	12	15	18	20	22	25	30	
Gesetzesänderungen											
Konformität mit aktuellen Richtlinien	In Übereinstimmung mit den aktuellen Richtlinien	nein	-	-	-	-	-	-	-	-	ja
Ersatzteilsituation											
Kapitalbindung durch Vorräte	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €										
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	-50 bis -45	-45 bis -40	-40 bis -35	-35 bis -30	-30 bis -25	-25 bis -20	-20 bis -15	-15 bis -10	-10 bis -5	-5 bis 0

Exemplarisch werden bei der Anlagenverfügbarkeit Werte zwischen kleiner als 94% und 100% auf eine Skala von 1 bis 10 übertragen. Der Anteil rückgespeicherter Energie in % ist ebenfalls unternehmensübergreifend bewert- und übertragbar. Hier erfolgt eine Einordnung zwischen kleiner als 5% und größer als 30%. In Hinblick auf die Konformität mit Richtlinien werden entweder 10 Punkte bei Erfüllung oder 1 bei Nichterfüllung vergeben. Die Einordnung des Verfügbarkeitsfaktors wird ausführlich in Kapitel 6.3 erläutert

Bei Übertragung der Skalierung auf die Werte ergibt sich die folgende Umrechnung.

Tabelle 6-8: Methode Beispiel - Zielerfüllungsgrade

		Alternative 1 kein Retrofit		Alternative 2 Retrofit	
Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	w_1	e_1	w_2	e_2
Verfügbarkeit					
Anlagenverfügbarkeit	Verfügbarkeit in %	98,2	7	99,1	9
Imagebewertung	Lieferqualität	<i>hoch</i>	7	<i>sehr hoch</i>	9
Mitarbeiterauslastung					
Produktivität der Instandhaltung	Präventive Instandhaltung in Stunden pro Tag	4,8	4	5,5	6
Personalkosten	PK durch Instandhaltung in € pro Monat	9.000	4	9.000	4
Kosten extern ausg. Instandhaltung	Vertragskosten durch Externe in € pro Monat	1.000	2	500	6
Leistung					
Kapazität	Maximale LE pro Stunde	60	4	90	6
	Maximale Anzahl ES/DS pro Stunde	-	-	-	-
Energieeffizienz	Anteil rückgespeicherter Energie in %	0	1	19	6
Gesetzesänderungen					
Konformität mit aktuellen Richtlinien	In Übereinstimmung mit den aktuellen Richtlinien	<i>Ja</i>	10	<i>Ja</i>	10
Ersatzteilsituation					
Kapitalbindung durch Vorräte	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €	9.500 €	6	7.000 €	7
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	-37,2	3	-7	9

VI Gewichtung der Zielerfüllungsgrade

Die folgende Gewichtung der Faktoren entspricht der in den Expertengesprächen erkannten Bedeutung der einzelnen Aspekte. Die Priorisierung kann als unternehmensweiter Mittelwert verstanden werden und wird in der folgenden Tabelle verdeutlicht.

Tabelle 6-9: Methode Beispiel - Gewichtung der Einzelziele

Zielsystem	Gewichtung
1. Verfügbarkeit	20,0 %
• Anlagenverfügbarkeit	15,0 %
• Imagebewertung	5,0 %
2. Mitarbeiterauslastung	10,0 %
• Produktivität der Instandhaltung	7,5 %
• Personalkosten	1,0 %
• Kosten extern ausgeführter Instandhaltung	1,5 %
3. Leistung	10,0 %
• Kapazität	8,0 %
• Energieeffizienz	2,0 %
4. Gesetzesänderungen	10,0 %
• Konformität mit aktuellen Richtlinien	10,0 %
5. Ersatzteilsituation	50,0 %
• Kapitalbindung durch Vorräte	5,0 %
• Ersatzteilverfügbarkeit	45,0 %
Gesamt	100,0 %

Auffällig ist mit 50% die starke Gewichtung der Ersatzteilsituation, insbesondere der Ersatzteilverfügbarkeit mit 45%. Diese resultiert aus der in den Expertengesprächen erkannten großen Relevanz dieses Faktors [vgl. Kapitel 5.3]. Weiter ist die Verfügbarkeit der Anlage mit einer Bewertung von 0,2 als ausschlaggebender Faktor zu nennen. Mitarbeiterauslastung, Leistungsbewertung und die Anpassung an Gesetze spielen hier eine untergeordnete Rolle oder sind Nebeneffekte.

Die Gewichtung wird anschließend mit den einzelnen Zielerfüllungsgraden multipliziert, um Teilnutzwerte für jedes Teilziel zu erhalten. Tabelle 6-10 gibt eine Übersicht der errechneten Teilnutzen. Die Gewichtung sowie die Teilnutzwerte sind in roter Farbe hinterlegt.

Tabelle 6-10: Methode Beispiel - Berechnung der Teilnutzwerte

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Gewichtung	Alternative 1 kein Retrofit			Alternative 2 Retrofit		
			w_1	e_1	n_1	w_2	e_2	n_2
Verfügbarkeit		20,0 %			1,40			1,80
Anlagenverfügbarkeit	Verfügbarkeit in %	15,0 %	98,2	7	1,05	99,1	9	1,35
Imagebewertung	Lieferqualität	5,0 %	hoch	7	0,35	sehr hoch	9	0,45
Mitarbeiterauslastung		10,0 %			0,37			0,58
Produktivität der Instandhaltung	Präv. Instandhaltung in Stunden pro Tag	7,5 %	4,8	4	0,30	5,5	6	0,45
Personalkosten	PK durch Instandhaltung in € pro Monat	1,0 %	9.000	4	0,04	9.000	4	0,04
Kosten extern ausg. Instandhaltung	Vertragskosten durch Externe in € pro Monat	1,5 %	1.000	2	0,03	500	6	0,09
Leistung		10,0 %			0,34			0,60
Kapazität	Maximale LE pro Stunde	8,0 %	60	4	0,32	90	6	0,48
	Maximale Anzahl ES/DS pro Stunde		-	-	-	-	-	-
Energieeffizienz	Anteil rückgespeicherter Energie in %	2,0 %	0	1	0,02	19	6	0,12
Gesetzesänderungen		10,0 %		10	0,10		10	0,10
Konformität mit aktuellen Richtlinien	In Übereinstimmung mit akt. Richtlinien	10,0 %	Ja	10	0,10	Ja	10	0,10
Ersatzteilsituation		50,0 %			1,65			4,40
Kapitalbindung durch Vorräte	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €	5,0 %	9.500	6	0,30	7.000	7	0,35
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	45,0 %	-37,2	3	1,35	-7	9	4,05

Exemplarisch kann für die erste Alternative der Teilnutzwert des Ziels Verfügbarkeit ermittelt werden. Dazu werden die Teilnutzwerte der Unterziele Anlagenverfügbarkeit

und Imagebewertung wie folgt addiert: $0,15 \cdot 7 + 0,05 \cdot 7 = 1,40$. Analog wird bei jedem Teilziel vorgegangen.

VII Aufsummieren und Ermittlung des Nutzwerts

Abschließend werden die Nutzwerte der Alternativen durch Addition der Teilnutzwerte errechnet.

$$N_1 = 1,40 + 0,37 + 0,34 + 0,10 + 1,65 = \mathbf{3,86}$$

$$N_2 = 1,80 + 0,54 + 0,60 + 0,10 + 4,40 = \mathbf{7,48}$$

Handlungsalternative A_1 erzielt in diesem Beispiel also erwartungsgemäß einen geringeren Nutzwert als A_2 .

VIII Erfassung der Kosten

Bei der Kostenerfassung wird in dem Beispiel von einem Puffer von 2 Stunden und keiner redundanten Anlagenstruktur ausgegangen. Folglich fallen Ausfälle einer Ausfallzeit bis $a = 120 \text{ Minuten}$ in die Kategorie 1. Alle Stillstände, die von längerer Dauer sind, werden der Kategorie 2 zugeordnet. Die folgenden Übersichten zeigen die anfallenden Einzelkosten k der Ausfallkategorie 1 und 2. An dieser Stelle kann der Betreiber die individuellen Löhne und Vertragskosten eintragen, die abhängig von der eigenen Lagerstruktur anfallen.

Tabelle 6-11: Methode Beispiel - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 1

Kosten k	Bewertungsmaßstab	Bewertung
Instandhaltung		
Fehlersuche	Lohn der Instandhaltung in € • Ausfallzeit in min Wartezeit	$0,50 \text{ €} \cdot \text{Ausfallzeit in Minuten}$
Umplanung		
Fehlerbehebung		

Exemplarisch wird ein Stundenlohn der Instandhaltung von 30 € pro Stunde verwendet. Da die Ausfallzeit in Minuten erfasst wird, muss auch der Instandhaltungslohn in € pro Minute angegeben werden. Das führt zu einer Bewertung von 50 Cent pro Minute. In diesem Beispiel ist nur ein Instandhalter an der Fehlerbehebung beteiligt. Wären an dieser Stelle mehrere, müssten alle einzeln bewertet werden.

Tabelle 6-12: Methode Beispiel - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 2

Kosten k	Bewertungsmaßstab	Bewertung
Logistikkosten		
Wartezeit	In € pro Stunde • Wartezeit in Stunden	60 € • <i>Wartezeit in Stunden</i>
Wiederanfahrt	Pauschale in €	200 €
Alternativlager		
Umplanung	Lohn Instandhaltung in € • Zeit für Umplanung	30 € • <i>Zeit für Umplanung in Stunden</i>
Umlagerung	Transportkosten für Umlagerung in €	100 €
Ein- bzw. Auslagerung	Kosten in € pro Einlieferung • Anzahl Objekte	12 € pro <i>Einlagerung</i> • <i>Anzahl Objekte</i>
Mietkosten	In € pro Stellplatz • benötigte Stellplätze	10 € pro <i>Stellplatz</i> • <i>benötigte Anzahl Stellplätze</i>
Notlieferung	Kosten in € für Nottransport (Auto, Taxi, usw.)	500 €
Vertragliche Konsequenzen		
Konventionalstrafen	Kosten in € pro nicht verkaufte Ware / pro Minute Produktionsausfall	2.500 € pro <i>Minute Produktionsausfall</i> • <i>Zeit Produktionsausfall in Minuten</i>
Schadensersatz		
Aufarbeitung		
Nacharbeitung	Anzahl Mitarbeiter • Überstunden in € pro Stunde • Anzahl Überstunden	30 € • <i>Anzahl Überstunden</i>
Reklamation		

In dem Beispiel wird die Wartezeit von Logistikunternehmen mit 60 € pro Stunde angenommen, eine Wiederanfahrt ist pauschal mit 200 € bewertet. Theoretisch können auch Alternativlager zum Einsatz kommen. Dabei kann in vier unterschiedliche Einzelkosten differenziert werden. Die Umplanung wird mit 30 € pro Stunde bewertet. Transportkosten für Umlagerungen werden mit einer Pauschalen von 100 € berechnet. Ein- und Auslagerung bzw. Mietkosten können anzahlabhängig mit 12 bzw. 10 € pro Objekt berechnet werden. Die Quantifizierung der Notlieferung ist schwierig, da diese in der Regel spontan geschieht. Exemplarisch wird in dem Beispiel mit Kosten von 500 € gerechnet. Vertragliche Kosten werden mit 2.500 € pro Minute Produktionsausfall an

der Folgestelle der Lieferkette bewertet. Zuletzt wird die Mehrarbeit durch den Stundenlohn beteiligter Mitarbeiter von 30 € mit der Zeit an Überstunden verrechnet.

IX-X Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit

Zur Berechnung der jährlichen variablen Kosten pro Ausfalldauer werden die anfallenden Kosten mit den prognostizierten Ausfallhäufigkeiten verrechnet. Exemplarisch sind Berechnungen der Ausfallkosten $C_{1,1,10}$ und $C_{1,1,20}$, also anfallenden Kosten bei der Alternative $m = 1$ – kein Retrofit in Jahr $t = 1$ für die Ausfalldauer von $a = 10 \text{ min}$ und $a = 20 \text{ min}$ dargestellt.

Tabelle 6-13: Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit

<i>t = 1, a = 10 min</i>			
Kosten <i>k</i>	Bewertungsmaßstab	Bewertung	Ausfallhäufigkeit
Instandhaltung			<i>62 Ausfälle / Jahr</i>
Fehlersuche	Lohn der Instandhaltung in € • Ausfallzeit in min Wartezeit	<i>0,50 € • 10 min</i>	
Umplanung			
Fehlerbehebung			
Gesamt $C_{1,1,10}$	<i>(0,50 € • 10 min) • 62 / Jahr = 310 € / Jahr</i>		

Tabelle 6-14: Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit

<i>t = 1, a = 20 min</i>			
Kosten <i>k</i>	Bewertungsmaßstab	Bewertung	Ausfallhäufigkeit
Instandhaltung			<i>50 Ausfälle / Jahr</i>
Fehlersuche	Lohn der Instandhaltung in € • Ausfallzeit in min Wartezeit	<i>0,50 € • 20 min</i>	
Umplanung			
Fehlerbehebung			
Gesamt $C_{1,1,20}$	<i>(0,50 € • 20 min) • 50 / Jahr = 500 € / Jahr</i>		

Bei einem Ausfall von lediglich 10 Minuten errechnen sich die Ausfallkosten bei prognostizierten 62 Ausfällen im Jahr auf 310 € jährlich. 20 Minuten verbunden mit 50 Ausfällen jährlich ergeben 500 € im Jahr. Mit Blick auf Kosten der Ausfallkategorie 2 ist das Vorgehen gleich. Tabelle 6-15 zeigt ein Beispiel für die Ausfallzeit von $a = 180 \text{ min}$ und die Berechnung von $C_{1,1,180}$.

Tabelle 6-15: Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit

$t = 1, a = 180 \text{ min}$				
Kosten k	Bewertungsmaßstab	Bewertung	Ausfallhäufigkeit	
Logistikkosten				
Wartezeit	In € pro Stunde • Wartezeit	$60 \text{ €} \cdot 1 \text{ h}$	2 Ausfälle / Jahr	
Wiederanfahrt	Pauschale in €	-		
Alternativlager				
Umplanung	Lohn Instandhaltung in € • Zeit für Umplanung	-		
Umlagerung	Transportkosten für Umlagerung in €	-		
Ein- bzw. Auslagerung	Kosten in € pro Einlieferung • Anzahl Objekte	-		
Mietkosten	€ pro Stellplatz • benötigte Stellplätze	-		
Notlieferung	Kosten in € für Nottransport (Auto, Taxi, usw.)	500 €		
Vertragliche Konsequenzen				
Konventionalstrafen	Kosten in € pro nicht verkaufte Ware / Minute Produktionsausfall	$2.500 \text{ €} \cdot 1 \text{ min}$		
Schadensersatz				
Aufarbeitung				
Nacharbeitung	Anzahl Mitarbeiter • Überstunden in € pro Stunde • Anzahl Überstunden	$5 \cdot 30 \text{ €} \cdot 2 \text{ h}$		
Reklamation				
Gesamt $C_{1,1,180}$	$(60 \text{ €} + 500 \text{ €} + 2.500 \text{ €} + 300 \text{ €}) \cdot 2 / \text{Jahr} = 6.720 \text{ €} / \text{Jahr}$			

In diesem Fall wird angenommen, dass bei einem zeitlichen Puffer von $a = 120 \text{ min}$ das Unternehmen nach 2 Stunden in Lieferverzug gerät. In der gezeigten Kalkulation werden keine alternativen Ausweichlager genutzt. Ein Speditionsunternehmen muss allerdings eine Stunde warten, was eine Zahlung von 60 € nach sich zieht. Dazu müssen Notlieferungen über ungeplante Wege vorgenommen werden. Diese kosten 500 €. Zusätzlich wird die Nachbearbeitung des Ausfalls in Überstunden von 5 Mitarbeitern durchgeführt. Der kostenmäßig wichtigste Punkt ist die hohe Strafzahlung von 2.500€ für 1 Minute Produktionsstopp beim Folgeunternehmen. Ein solches Szenario ist kostspielig, kommt aber nach der Prognose auch nur zweimal jährlich vor.

Zur Klassifizierung der Ausfallzeiten in Abhängigkeit von Ausfallhäufigkeiten bietet es sich an, eine Übersicht in Form einer Risikomatrix zu erstellen. Durch den Einsatz verschiedener Farben ist es möglich, eine Kategorisierung bezüglich des Ausfalleinflusses vorzunehmen. Betreiber können so individuell festlegen, welche Ausfallzeiten mit welchen Ausfallhäufigkeiten für sie relevant sind und welche nicht. Exemplarisch zeigt Tabelle 6-16 eine mögliche Einordnung. Hier ist eine Einordnung der Relevanz von Ausfällen in fünf Kategorien durch die Kennzeichnung in verschiedenen Farben gezeigt.

Tabelle 6-16: Methode Beispiel - Risikomatrix

1 Woche						
2-3 Tage						
1 Tag						
6 Stunden						
3 Stunden	6.720 €					
1 Stunde						
20 Minuten				500 €		
10 Minuten						
	halbjährig	alle 4 Mon.	monatlich	wöchentlich	alle 3 Tage	täglich

Weiter ist grundsätzlich die zeitliche Homogenisierung durch Diskontierung anfallender Kosten zu beachten. Zur Vereinfachung und Übersichtlichkeit wird im Rahmen dieses Rechenbeispiels darauf verzichtet.

XI Ermitteln der Gesamtkosten

Zur Ermittlung der jährlichen variablen Kosten $C_{m,t}$ werden die einzelnen Ausfallkosten $C_{m,t,a}$ bestimmter Ausfallzeiten aufsummiert. Dazu erfolgt eine Kategorisierung der Ausfälle anhand ihrer Ausfalldauer in Schritten von $a = 10 \text{ Minuten}$. Alle Kosten der Ausfälle im Zeitraum von einer bis zehn Minuten werden mit der Berechnung von $C_{m,t,10}$ ermittelt.

$$C_{m,t} = C_{m,t,10} + C_{m,t,20} + C_{m,t,30} + C_{m,t,40} + \dots + C_{m,t,n} \quad (6-9)$$

Die folgenden Summen zeigen die Ausfallkosten der ersten beiden Jahre $C_{m,1}$ und $C_{m,2}$ unter Einbezug der zuvor errechneten jährlichen Kosten pro Ausfall.

$$C_{m,1} = 310 \text{ €} + 500 \text{ €} + 780 \text{ €} + \dots + 6.720 \text{ €} + \dots + 7.200 \text{ €} = 53.000 \text{ €}$$

$$C_{m,2} = 380 \text{ €} + 530 \text{ €} + 840 \text{ €} + \dots + 7.300 \text{ €} + \dots + 8.340 \text{ €} = 60.000 \text{ €}$$

Es wird angenommen, dass die Retrofit-Maßnahmen 2 Jahre nach Planungsbeginn abgeschlossen sind. Daher verändern sich ab Jahr 3 die prognostizierten Ausfälle und die damit verbundenen Kosten. Der gewählte Betrachtungszeitraum beträgt 5 Jahre. Tabelle 6-17 stellt den Verlauf variabler Kosten beider Alternativen in dieser Zeit dar.

Tabelle 6-17: Methode Beispiel - Verlauf der variablen Kosten

Jahr t	Variable Kosten pro Jahr t	
	Alternative 1 kein Retrofit	Alternative 2 Retrofit
1	53.000 €	53.000 €
2	60.000 €	60.000 €
3	69.000 €	18.000 €
4	79.000 €	20.000 €
5	90.000 €	22.000 €

Zur Ermittlung der variablen Gesamtkosten werden die Kosten für beide Alternativen über die 5 Jahre kumuliert.

$$C_{1,var} = 53.000 \text{ €} + 60.000 \text{ €} + 69.000 \text{ €} + 79.000 \text{ €} + 90.100 \text{ €} = 351.000 \text{ €}$$

$$C_{2,var} = 53.000 \text{ €} + 60.000 \text{ €} + 18.000 \text{ €} + 20.000 \text{ €} + 22.000 \text{ €} = 173.000 \text{ €}$$

Nach Erfassung der variablen Kosten werden die Gesamtkosten durch Addition der Fixkosten errechnet. Diese sind mit den Investitionskosten gleichzusetzen. Aus den Gesprächen geht hervor, dass sich diese Kosten im sechs- bis siebenstelligen Bereich einordnen lassen. In diesem Beispiel wird ein Retrofitprojekt mit Investitionskosten von 450.000 € dargestellt. In der Praxis werden diese Kosten durch Abschreibungen auf die Folgejahre verteilt. Aus Vereinfachungsgründen wird hier von einem fixen Kostenbetrag für diese Periode ausgegangen.

$$C_1 = C_{1,fix} + C_{1,var} = 0 \text{ €} + 351.000 \text{ €} = 351.000 \text{ €}$$

$$C_2 = C_{2,fix} + C_{2,var} = 450.000 \text{ €} + 173.000 \text{ €} = 623.000 \text{ €}$$

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die Kosten durch eine Verschiebung um fünf Zehnerpotenzen in eine handliche Form übertragen.

$$C_1 = 351.000 \text{ €} \cdot \frac{10^{-5}}{\text{€}} = 3,51$$

$$C_2 = 623.000 \text{ €} \cdot \frac{10^{-5}}{\text{€}} = 6,23$$

XII Berechnung der Kostenwirksamkeiten

Nach Ermittlung von Nutzwerten und Kosten kann abschließend durch Division beider Kennzahlen die Kostenwirksamkeit berechnet werden.

Tabelle 6-18: Methode Beispiel - Berechnung der Kostenwirksamkeiten

	Alternative 1 kein Retrofit	Alternative 2 Retrofit
Nutzwert N_m	3,86	7,48
Kosten C_m	3,51	6,23
Kostenwirksamkeit KW_m	$\frac{3,86}{3,51} = 1,09972$	$\frac{7,48}{6,23} = 1,20064$

Die Kostenwirksamkeit der Alternative, keine Retrofit-Maßnahmen durchzuführen wird durch den Wert 1, 1 beschrieben. Alternative 2 weist einen Wert von 1, 2 auf. Damit ist

nach der Methode über einen Betrachtungszeitraum von 5 Jahren die Entscheidung, ein Retrofit durchzuführen, der Alternative, nicht zu modernisieren, vorzuziehen.

6.3 Analyse der Ersatzteilsituation

6.3.1 Aufbau der Methode zur Ersatzteilanalyse

Eine besondere Rolle in der Entscheidungsfindung spielt die Ersatzteilsituation. Dieser von den Experten stark gewichtete Einflussfaktor wird in der Folge genauer beleuchtet. Dafür wird ein weiteres Bewertungssystem vorgestellt, um die Analyse der Ersatzteilverfügbarkeit vorzunehmen.

Tabelle 6-19 ist ein Ausschnitt aus der Nutzenberechnung des vorgestellten Beispiels aus Kapitel 6.2 und zeigt einordnend, an welcher Stelle der Methode die folgenden Erklärungen ansetzen [vgl. Kapitel 6.2, S. 87].

Tabelle 6-19: Methode - Einordnung der Ersatzteilsituation

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Gewichtung	Alternative 1 kein Retrofit			Alternative 2 Retrofit		
			w_1	e_1	n_1	w_2	e_2	n_2
Ersatzteilsituation		50,0 %			1,65			4,40
Kapitalbindung durch Vorräte	Wert der vorrätigen Ersatzteile in €	5,0 %	9.500	6	0,30	7.000	7	0,35
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	45,0 %	-37,2	3	1,35	-7	9	4,05

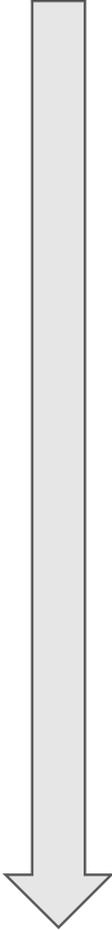
Um die Ersatzteilsituation darzustellen, kann man zwei verschiedene Kategorien unterscheiden: Kapitalbindungskosten durch Bevorraten von Ersatzteilen und die Wiederbeschaffungskosten im Falle eines Ausfalls [Paw-2016, S. 294]. Das Bevorraten von Ersatzteilen kann insbesondere bei Alterung von Anlagen und Abkündigungen von Bauteilen zu einem relevanten wirtschaftlichen Faktor werden [Sch-2006, S. 96]. Um diesen Faktor zu operationalisieren, können die gesamten **Kapitalbindungskosten** in € für die vorrätigen Ersatzteile erfasst werden.

Wie die Gespräche zeigen, unterliegt die Ersatzteilverfügbarkeit einem schwer quantifizierbaren Zusammenspiel unterschiedlicher Einflussfaktoren. Das Zusammenwirken der verschiedenen Einflussgrößen wird in der Folge skizziert. Dazu wird ein Bewertungssystem vorgestellt, welches es ermöglicht, die **Ersatzteilverfügbarkeit** zu

analysieren. Tabelle 6-20 zeigt das Bewertungsvorgehen zur Analyse der Ersatzteilverfügbarkeit. Die aufgeführten Kriterien k_n basieren auf den Erkenntnissen der Experteninterviews.

Tabelle 6-20: Methode - Analyse der Ersatzteilsituation

k_1 Kategorisierung des Bauteils		
Strukturbauteil	Kein Strukturbauteil	
-5	0	
k_2 Art des Bauteils		
Spezialteil	Standardteil	Normbauteil
-5	-2	0
k_3 Abkündigung des Bauteils		
Ja	Nein	
-15	0	
k_4 Aufwand der Wiederbeschaffung		
Hoch	Mittel	Niedrig
-20	-10	0
k_5 Ersatzteilbevorratung		
Nein	Ja	
-5	0	



Bewertungsmaßstab

Bei Anwendung der Methode werden fünf Bewertungskriterien k_n von den Ersatzteilen durchlaufen. In einem Lager kann eine solche Analyse für viele verschiedene Bauteile durchgeführt werden. Die Auswahl der betrachteten Bauteile ist vom Betreiber selbst zu wählen. Zu beachten ist, dass trotz allgemein guter Ersatzteilverfügbarkeit das Fehlen eines einzigen Ersatzteils die Dringlichkeitsbewertung stark verändern kann. Aus diesem Grund fließt in der Folge das Ersatzteil mit der niedrigsten Verfügbarkeitsbewertung in die Methode zur Dringlichkeitsbewertung ein.

Bei Anwendung der Methode zur Ersatzteilverfügbarkeit wird zu Beginn angenommen, dass die Verfügbarkeit unkritisch ist. Eine Verschlechterung der Ersatzteilverfügbarkeit

wird mit negativen Zahlen ausgedrückt. So bleibt der grundsätzliche Zusammenhang von besserer Verfügbarkeit bei höherer Punktzahl erhalten, die Veränderung der Situation kann durch Addition negativer Punkte ausgedrückt werden. Abhängig davon, ob das Ersatzteil in die Kategorie fällt oder nicht, werden zu einer Bewertung negative Punkte addiert. Bei 0 Punkten liegt die optimale Ersatzteilversorgung vor. Diese beschreibt ein unkritisches Bauteil, welches nicht vom Hersteller abgekündigt wurde und am Markt erhältlich ist. -50 Punkte bewerten die schlechteste vorstellbare Situation. Diese werden vergeben, wenn ein kritisches Bauteil abgekündigt wird, nur mit sehr großem Aufwand zu beschaffen ist und sich nicht mehr im eigenen Vorrat befindet. Alle Bewertungen befinden sich folglich im Bereich von -50 bis 0 Punkten. In der Folge werden die fünf Bewertungskriterien der Methode erklärt.

1) Kategorisierung des Bauteils:

Zunächst wird die Art des Bauteils kategorisiert. Liegt ein Strukturbauteil vor ist ein Ausfall dieses Teils schwerwiegend und macht die Ersatzteilverfügbarkeit notwendig zur Vermeidung langer Ausfallzeiten [Bie-2008, S. 59f.]. Die vorgenommene Unterscheidung bringt für das Kriterium k_1 eine Addition von 0 oder -5 Punkten mit sich.

2) Art des Bauteils:

Zur Erfassung der Beschaffungssituation hilft die Einordnung in die drei verschiedenen Kategorien Normbauteil, Standardteil und Spezialteil. Diese Kategorisierung geht aus den Expertengesprächen hervor. Alternativ kann eine Einstufung nach der von *Biedermann* vorgestellten ABC-Analyse von Ersatzteilen erfolgen [Bie-2008, S. 62]. Experten zufolge sind Normbauteile mit vorgeschriebenen Eigenschaften und Maßen anbieterübergreifend identisch erhältlich. Die Einordnung in die Kategorie Standardteil besagt nach Aussagen der Gesprächspartner, dass ein Bauteil im Sortiment eines bestimmten Anbieters aktuell erhältlich ist. Eine Einstufung in eine dieser zwei Kategorien ist normalerweise gleichbedeutend mit einer guten Verfügbarkeit der Ersatzteile. Diese äußert sich bei Kriterium k_2 in einem Abzug von keinem bzw. 2 Punkten. Wird ein Teil hingegen individuell vom Anbieter für das Unternehmen angefertigt, erfolgt die Einordnung in die Kategorie Spezialteil. Laut Experten geht damit einher, dass das Angebot auf dem Markt für dieses Ersatzteil begrenzt und die Abhängigkeit gegenüber dem Produzenten dieses Bauteils häufig groß ist. Hier werden 5 Punkte abgezogen.

3) Abkündigung des Bauteils

An dieser Stelle erfolgt die Betrachtung, ob ein Bauteil vom Hersteller abgekündigt ist oder nicht. Da aus den Expertengesprächen hervorgeht, dass eine Abkündigung von Ersatzteilen der häufigste Auslöser für Retrofits ist, kommt diesem Schritt eine besonders hohe Bedeutung zu [vgl. Kapitel 5.3]. Eine Abkündigung von Ersatzteilen ist oft

gleichbedeutend mit einer drastischen Verschlechterung der Ersatzteilverfügbarkeit. In Folge von Abkündigungen sind Beschaffungsmöglichkeiten abgekündigter Ersatzteile nicht gegeben, während der Bedarf nach diesen weiter bestehen kann [Luc-2004, S. 53f.] Dieser Einschnitt in der Ersatzteilverfügbarkeit als Folge von Abkündigungen schlägt sich in dem Bewertungsmodell nieder. Kriterium k_3 wird durch den Abzug von 15 Punkten erfasst, wenn eine Ersatzteilabkündigung vorliegt. Keine Abkündigung des betrachteten Bauteils ist gleichbedeutend mit einem Abzug von 0 Punkten. Bei Angebot eines kompatiblen Folgebauteils durch den Hersteller kann die Situation nach der Abkündigung entschärft werden. Eine weitere Zwischenskalierung wäre dafür denkbar.

4) Aufwand der Wiederbeschaffung

Kriterium k_4 bewertet den Aufwand für die Wiederbeschaffung von Ersatzteilen. Um diesen zu erfassen, wird das Zusammenwirken von drei unterschiedlichen Faktoren betrachtet: Suchaufwand, Preis des Ersatzteils und Lieferzeit. **Ersatzteilpreise** sind als vergleichsweise hoch anzusehen [Bie-2008, S. 102]. Als **Suchaufwand** kann die Zeit verstanden werden, welcher es bedarf, um ein adäquates Ersatzteil zu finden. Die **Lieferzeit** stellt den Zeitraum zwischen der Bestellung und dem Liefertermin dar [Bic-2017, S. 138]. Damit all diese Aspekte berücksichtigt werden, wird zur Erfassung des Aufwands eine Nutzwertanalyse angewandt [vgl. Kapitel 3.2.3]. Diese fasst die drei verschiedenen Kriterien als Zielsystem zusammen. Im Zuge der Nutzwertanalyse wird für jedes Einzelziel jeweils ein Wirksamkeitsmaß für die Quantifizierung genutzt.

Tabelle 6-21: Methode - Wirksamkeitsmaße für die Wiederbeschaffungskosten

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß
Preis	Preisveränderung in %
Suchaufwand	Zeit in Stunden
Lieferzeit	Zeit in Wochen

Beim Teilziel Preis wird die Bewertung durch die relative Preisveränderung gegenüber dem Ersteinkauf vorgenommen. Die Wirksamkeitsmaße von Suchaufwand und Lieferzeit sind Zeiteinheiten. Diese werden in Stunden bzw. Wochen erfasst.

In der Folge wird eine einheitliche Bewertungsskala festgelegt, welche die Zielerträge in Zielerfüllungsgrade von -5 bis 0 umwandelt. Anschließend werden die einzelnen Teilaspekte gewichtet und miteinander verrechnet, um einen Gesamtnutzwert für den

Wiederbeschaffungsaufwand zu erhalten. Um den berechneten Nutzwert für den Aufwand der Wiederbeschaffung in die Ersatzteilanalyse einbauen zu können, erfolgt eine Umrechnung der Skala von -5 bis 0 auf eine Bewertung von -20 bis 0. Diese geschieht durch die Multiplikation mit dem Faktor 4. Alternativ können die Zielerträge auch direkt auf eine Skala von -20 bis 0 übertragen werden.

5) Ersatzteilbevorratung

Im letzten Schritt der Ersatzteilanalyse wird ermittelt, ob das Ersatzteil beim Betreiber vorrätig ist oder nicht. Findet eine Bevorratung statt, verändert sich die Dringlichkeitsbewertung nicht. Eine fehlende Bevorratung geht mit der Addition von -5 Punkten durch den Parameter k_5 einher.

Zusammenfassend lässt sich die Ersatzteilverfügbarkeit durch den Verfügbarkeitsfaktor k_{ges} beschreiben. Dieser ist durch die Addition der Einzelkriterien zu ermitteln.

$$k_{ges} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 \quad (6-10)$$

Um die Ersatzteilverfügbarkeit als Teilziel in die Methode zur Dringlichkeitsbewertung einzubeziehen, muss der Verfügbarkeitsfaktor k_{ges} abschließend auf die Bewertungsskala übertragen werden. Beispielhaft zeigt Tabelle 6-22 die Umrechnungsskala aus Kapitel 6.2 [vgl. Kapitel 6.2, S. 84].

Tabelle 6-22: Methode - Einordnung Ersatzteilverfügbarkeit

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Zielerfüllungsgrade									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
		<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>	<i>bis</i>
		-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0

6.3.2 Anwendung der Methode zur Ersatzteilanalyse

Das folgende Beispiel dient der Veranschaulichung der Methode. Dazu wird die Bewertung des kritischsten Bauteils von Alternative 1 aus dem in Kapitel 6.2 vorgestellten Beispiel erklärt. Die Kriterien werden sukzessive überprüft und je nach Einstufung Punkte aufaddiert. Durch die Angabe in Klammern lässt sich die Gesamtbewertung des Verfügbarkeitsfaktors nach dem jeweiligen Schritt nachvollziehen.

1-3) Einordnung des Bauteils

Das betrachtete Bauteil ist ein für das System kritisches Teil (-5). Es wird vom Hersteller speziell für den Betreiber produziert und kann daher als Spezialteil eingestuft werden (-10). Angenommen wird, dass das Bauteil bereits abgekündigt wurde (-25).

4) Aufwand der Wiederbeschaffung

Zur Analyse der Wiederbeschaffung wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Tabelle 6-23 zeigt die Zielerträge der Wiederbeschaffungskosten. Preis, Suchaufwand und Lieferzeit sind jeweils operationalisiert dargestellt.

Tabelle 6-23: Methode Beispiel - Zielerträge für die Wiederbeschaffungskosten

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Zielertrag
Preis	Preisveränderung in %	140
Suchaufwand	Zeit in Stunden	0,75
Lieferzeit	Zeit in Wochen	1,5

Der Ersatzteilpreis liegt bei 140% über dem ursprünglichen Anschaffungspreis, während der Suchaufwand für das Ersatzteil mit einer Dreiviertelstunde bemessen wird. Die Lieferzeit beträgt anderthalb Wochen.

Diese Werte müssen auf eine Skala von -5 bis 0 übertragen werden. Dazu wird die in Tabelle 6-24 gezeigte Bewertungsskala genutzt.

Tabelle 6-24: Methode Beispiel - Umrechnungsskala für die Wiederbeschaffungskosten

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	-5	-4	-3	-2	-1	0
Preis	Preisveränderung in %	> 250	250 - 200	200 - 150	150 - 100	100 - 50	50 - 0
Suchaufwand	Zeit in Stunden	> 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0
Lieferzeit	Zeit in Wochen	> 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0

Beim Preis ist der Spielraum von größer als 250% bis 0% auf die Skala von -5 bis 0 zu übertragen. Suchaufwand und Lieferzeit werden in Zeiteinheiten gemessen. Werte von unter einer halben Stunde bzw. Woche bis länger als 4 Stunden bzw. Wochen werden auf die Skala von 0 bis -5 skaliert.

Tabelle 6-25 zeigt die Ermittlung von Teilnutzwerten unter Verwendung einer individuellen Gewichtung.

Tabelle 6-25: Methode Beispiel - Nutzwertanalyse der Wiederbeschaffungskosten

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Gewichtung	Zielertrag	Zielerfüllung	Teilnutzen
Preis	Preis in % mehr als Original	0,6	140	-2	$-2 \cdot 0,6$
Suchaufwand	Zeit in Stunden	0,2	0,75	-1	$-1 \cdot 0,2$
Lieferzeit	Zeit in Wochen	0,2	1,5	-2	$-2 \cdot 0,2$
GESAMT		1			-1,8

Der Nutzer gewichtet in diesem Fall den Preis mit 0,6 als wichtigsten Aspekt. Suchaufwand und Lieferzeit sind mit einer Gewichtung von jeweils 0,2 von gleich großer Relevanz. Eine Preissteigerung von 140% verglichen mit dem ursprünglichen Preis des Bauteils sind gleichbedeutend mit einem Zielerfüllungsgrad von -2. Der Suchaufwand beträgt eine Dreiviertelstunde, was einen Zielerfüllungsgrad von -1 nach sich zieht. Die Lieferzeit fällt mit 1,5 Wochen in die Kategorie -2. Unter Berücksichtigung der Gewichtung ergibt sich daraus ein Gesamtnutzwert von -1,8.

Um den Nutzwert in die Methode zur Ersatzteilanalyse zu übertragen, erfolgt eine Skalierung auf ein Punktesystem von -20 bis 0 Punkten. Dazu wird der errechnete Nutzwert für den Wiederbeschaffungsaufwand mit dem Faktor 4 verrechnet.

$$-1,8 \cdot 4 = -7,2$$

Die ermittelte Punktzahl von -7,2 fließt als Bewertung von Kriterium k_4 in den Verfügbarkeitsfaktor ein.

Tabelle 6-26: Methode Beispiel - Aufwand Wiederbeschaffung

k_4	Aufwand der Wiederbeschaffung		
	Hoch	Mittel	Niedrig
	-20	-10	-7,2
			0

Diese Einordnung bewirkt eine Addition von -7,2 Punkten (-32,2).

5) Ersatzteilbevorratung

Das Ersatzteil befindet sich nicht vorrätig im Lager des Unternehmens. Daher werden weitere 5 Punkte abgezogen.

Zusammenfassend ergibt sich die folgende Bewertung der Ersatzteilverfügbarkeit.

$$k_{ges} = -5 - 5 - 15 - 7,2 - 5 = -37,2$$

Abschließend wird die Punktzahl im Rahmen der Zielertragsanalyse in das Bewertungssystem der Methode zur Dringlichkeitsbewertung übertragen. Tabelle 6-27 zeigt einordnend die Umrechnung [vgl. Kapitel 6.2, S. 84].

Tabelle 6-27: Methode Beispiel - Einordnung der Ersatzteilverfügbarkeit

Zielsystem	Wirksamkeitsmaß	Zielerfüllungsgrade									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ersatzteilverfügbarkeit	Verfügbarkeitsfaktor	-50	-45	-40	-35	-30	-15	-20	-15	-10	-5
		bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis
		-45	-40	-35	30	-25	-20	-15	-10	-5	0

Eine Bewertung durch den Verfügbarkeitsfaktor von -37,2 ist gleichbedeutend mit einem Zielerfüllungsgrad von 3 in der Methode zur Dringlichkeitsbewertung.

6.4 Sensitivitätsanalyse

6.4.1 Verschiedene Kostenprognosen

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse kann untersucht werden, welchen Einfluss verschiedene Parameter auf das Ergebnis der Methode haben. Dazu wird angenommen,

dass alle anderen Faktoren unverändert bleiben. In der Folge wird untersucht, welche Auswirkungen die Wahl des Prognosemodells und die Veränderung des Zeitpunkts der Modernisierungsmaßnahmen auf die Dringlichkeitsbewertung hat.

Bei Annahme, dass die Nutzenbetrachtung unverändert bleibt, wird die Kostenseite genauer analysiert. Abbildung 6-3 zeigt den Verlauf jährlich anfallender Ausfallkosten bei der Alternative ohne Retrofit nach drei verschiedenen Prognosemodellen.

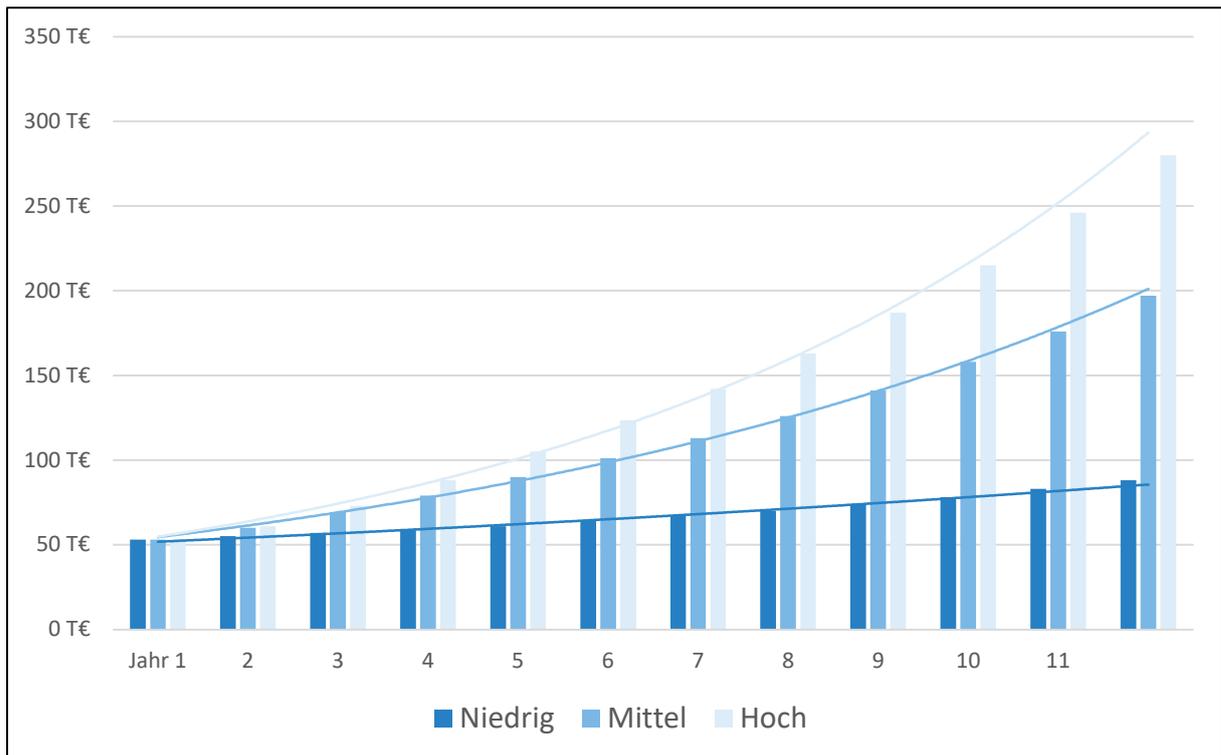


Abbildung 6-3: Kostenverlauf ohne Retrofit

In den drei Szenarien werden unterschiedliche Kostenverläufe gezeigt. Das Szenario „Mittel“ ist der Kostenverlauf aus dem in Kapitel 6.2 vorgestellten Beispiel. Die Kurve „Niedrig“ beschreibt die Situation, dass die Ausfallhäufigkeiten und -kosten relativ konstant sind und nur geringfügig steigen. Bei Szenario „Hoch“ nehmen die Kosten eine starke exponentielle Entwicklung.

Durch Kumulation der anfallenden Jahreskosten über einen bestimmten Zeitraum können wie in der Beispielrechnung aus Kapitel 6.2 die variablen Gesamtkosten der verschiedenen Alternativen ermittelt werden. Als Betrachtungszeitraum werden weiter 5 Jahre angenommen. In der Folge werden analog zur Kostenwirksamkeit der Alternative „Mittel“ aus Kapitel 6.2 die Kostenwirksamkeiten unter Gebrauch der anderen Prognosemodelle berechnet. Tabelle 6-28 fasst diese Werte zusammen und stellt sie

der Kostenwirksamkeit der Alternative „Retrofit“ gegenüber. Diese stammt ebenfalls aus dem Anwendungsbeispiel aus Kapitel 6.2.

Tabelle 6-28: Kostenwirksamkeiten bei unterschiedlichen Prognosemodellen

	Niedrig	Mittel	Hoch
Alternative 1 kein Retrofit	$\frac{3,86}{2,85} = 1,3544$	$\frac{3,86}{3,51} = 1,0997$	$\frac{3,86}{3,85} = 1,0026$
Alternative 2 Retrofit	$\frac{7,48}{6,23} = 1,2006$		
Entscheidung	Kein Retrofit	Retrofit	Retrofit

Abbildung 6-4 visualisiert die Kostenwirksamkeiten im Vergleich zueinander.

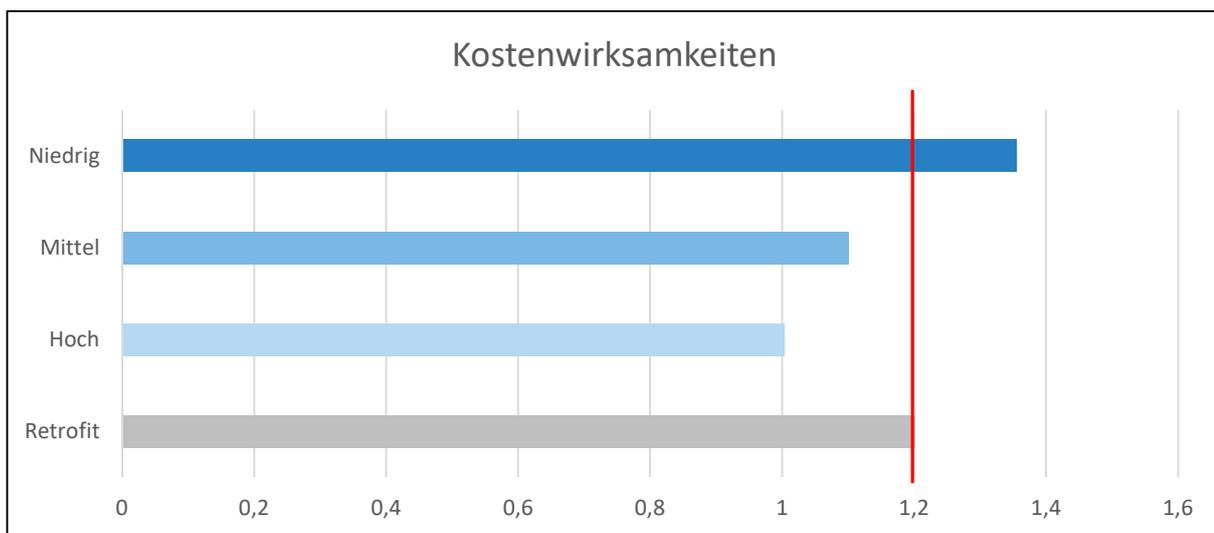


Abbildung 6-4: Vergleich verschiedener Kostenwirksamkeiten mit und ohne Retrofit

Abhängig von den gewählten Prognosemodellen ergeben sich unterschiedliche Kostenwirksamkeiten. Diese bringen verschiedene Entscheidungsempfehlungen mit sich. So ist die Kostenwirksamkeit der Alternativen, kein Retrofit durchzuführen, bei den Prognosen „Mittel“ und „Hoch“ geringer als die der Retrofit-Alternative. Bei Verwendung eines konstant geringen Ausfallverlaufs ist die Kostenwirksamkeit ohne Retrofit größer.

6.4.2 Verschiedene Zeitpunkte

Basierend auf Ausfallhäufigkeiten aus der Vergangenheit kann der Verlauf der jährlichen Ausfallkosten für die Zukunft prognostiziert werden. Das Kostenniveau verändert sich durch die Retrofit-Maßnahme signifikant. Dazu zeigt Abbildung 6-5 beispielhaft den Verlauf der Ausfallkosten pro Jahr mit und ohne Durchführung einer potenziellen Modernisierungsmaßnahme ab dem Jahr der Veränderung.

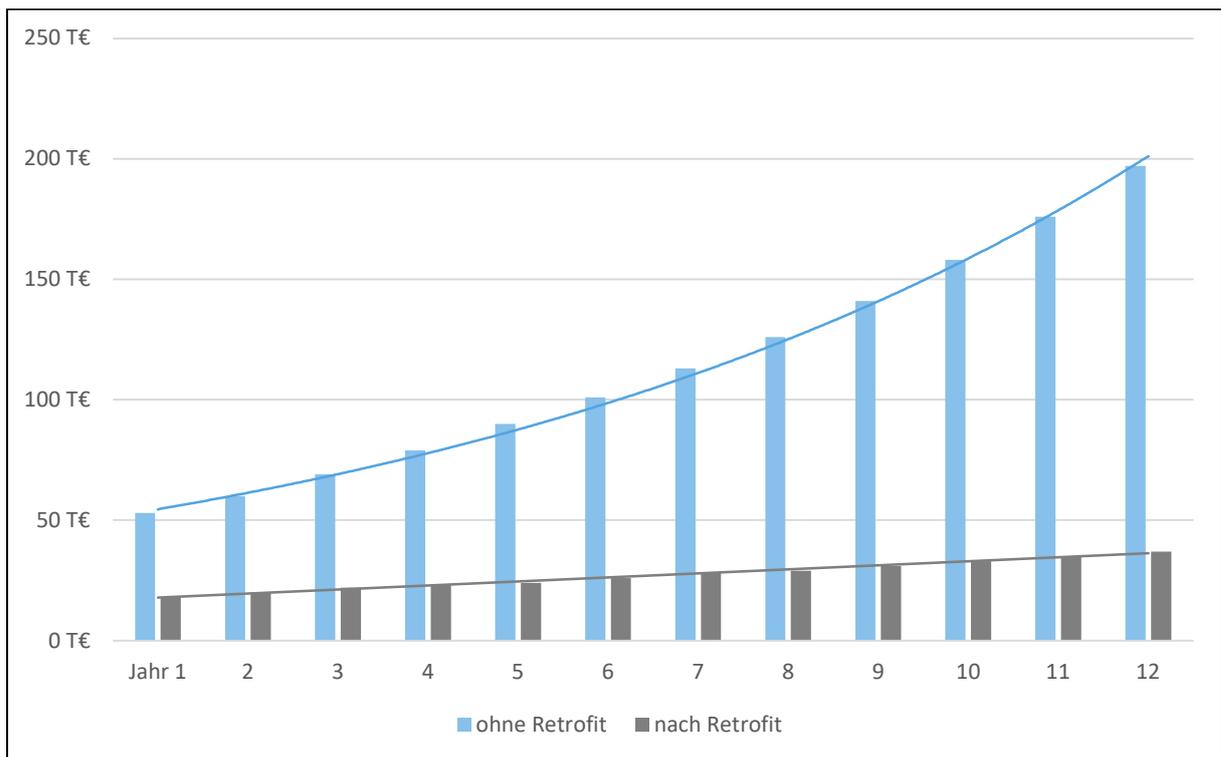


Abbildung 6-5: Prognostizierter Kostenverlauf mit und ohne Retrofit

Die Methode zur Dringlichkeitsbewertung ermöglicht einen Vergleich vom Betreiben der Anlage ohne Modernisierung mit der Situation, eine Retrofit-Maßnahme durchzuführen zu *einem* bestimmten Zeitpunkt. Um die Methode dynamischer zu gestalten, können verschiedene Zeitpunkte für die Retrofit-Entscheidungen dargestellt werden. Die Auswirkungen der Zeitpunktwahl wird in der Folge verdeutlicht.

Abbildung 6-6 zeigt drei Szenarien. Der prognostizierte Trend bei Verzicht auf Retrofit-Maßnahmen wird durch Szenario 1 erfasst. Szenario 2 und 3 beschreiben den Verlauf der Kosten unter der Annahme, dass sich die Maßnahmen nach 3 bzw. 8 Jahren auf den Kostenverlauf auswirken. Dabei werden entsprechend zu dem Zeitpunkt hohe Investitionskosten als Fixkostenanteil addiert. In der Praxis verändern sich mit der Zeit auch die Preise für Retrofit-Projekte. Das Beispiel nimmt vereinfachend an, dass die Kosten für Retrofit-Maßnahmen zu jedem Zeitpunkt unverändert bleiben.

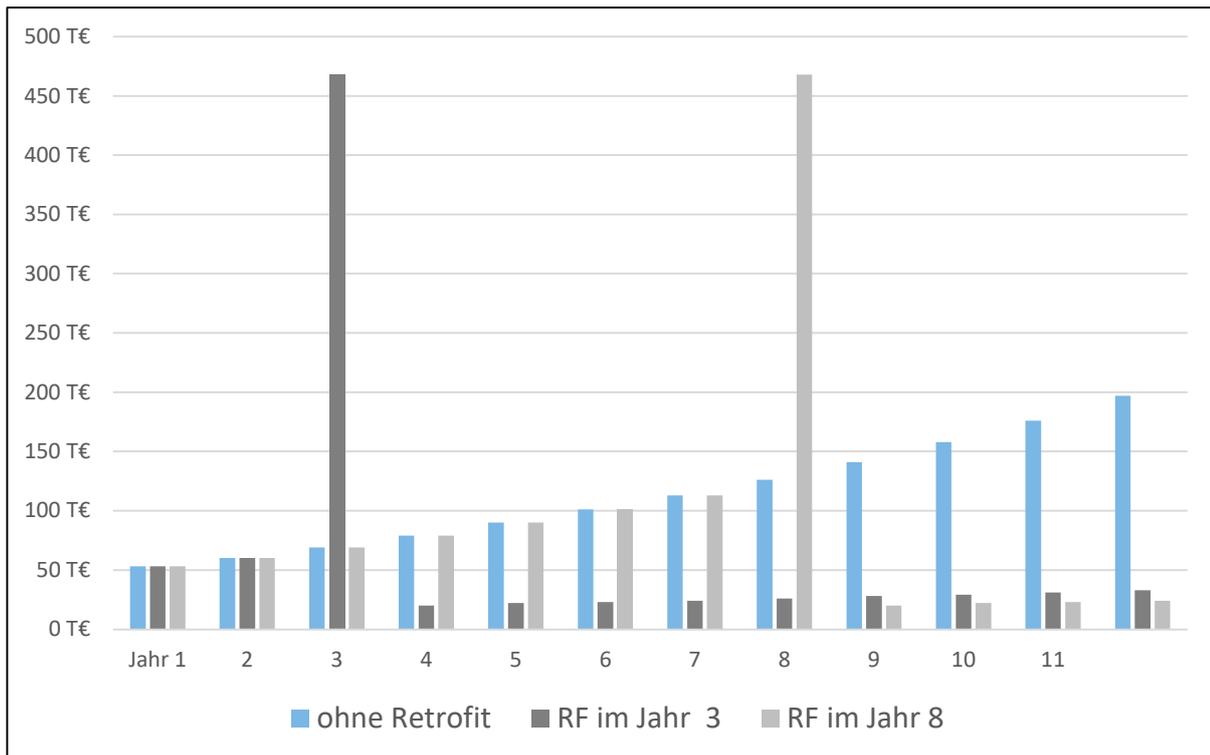


Abbildung 6-6: Exemplarischer Verlauf jährlicher Kosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten

Die allgemeine Tendenz der Kosten ist steigend. Auffällig sind die Jahre, in welchen Retrofit-Investitionen getätigt werden. Hier fallen einmalig hohe Kosten für die Durchführung dieser Maßnahmen an, in den Folgejahren sind die variablen Kosten deutlich geringer.

Die Abbildungen 6-7 und 6-8 visualisieren den Verlauf der kumulierten Gesamtkosten. Dazu werden die Kosten der vorherigen Jahre auf die neu anfallenden aufaddiert. Durch die eingezeichneten senkrechten, grünen Pfeile werden die Kostendifferenzen der Alternative „Kein Retrofit“ gegenüber den anderen Szenarien dargestellt. Die waagerechten, gelben Pfeile repräsentieren den Zeitraum bis zum Angleichen des kumulierten Kostenniveaus der Alternative „Kein Retrofit“ zu den Retrofit-Alternativen nach der Investition.

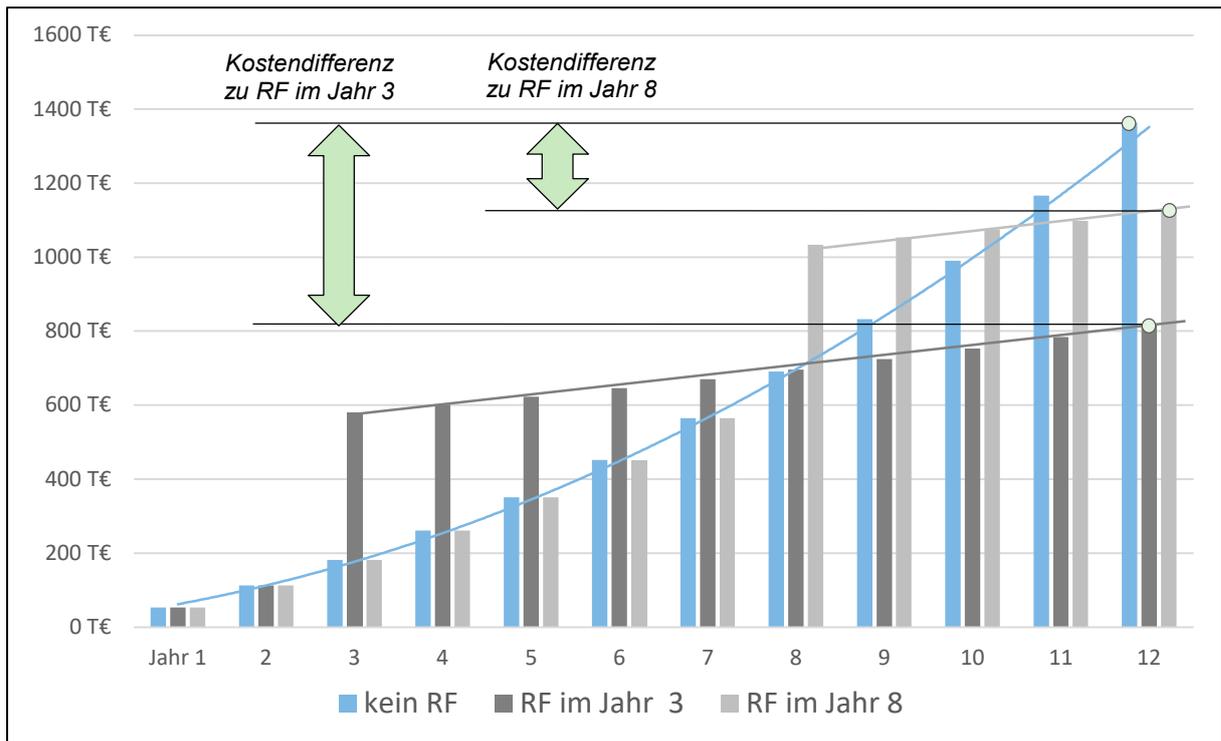


Abbildung 6-7: Verlauf der Gesamtkosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten

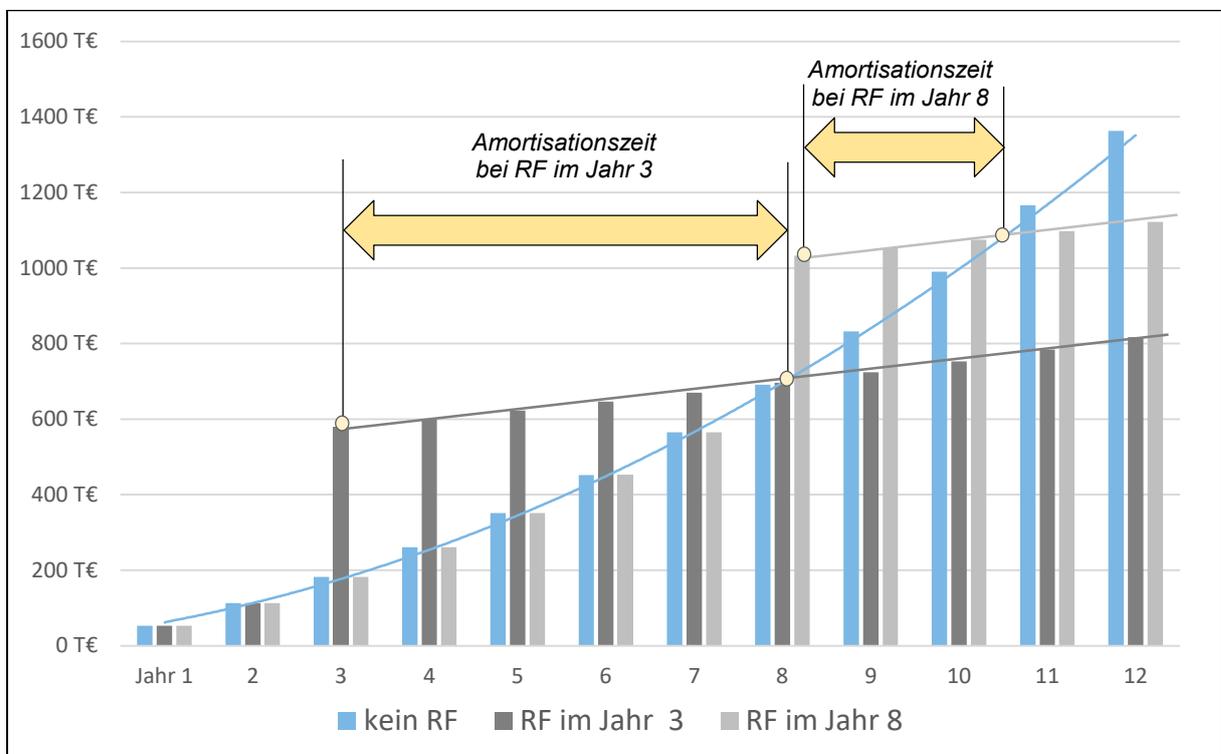


Abbildung 6-8: Verlauf der Gesamtkosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten

In der Praxis werden intern konkurrierende Investitionsprojekte häufig durch Kostenvergleiche oder Amortisationszeiten gegeneinander bewertet [vgl. Kapitel 1.1, S. 2]. Bei Bewertung von Investitionen mit gleichen oder nicht messbaren Erlösen wählt die **Kostenvergleichsrechnung** die Alternative mit den geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten pro Periode [Erm-2016, S. 37]. In Abbildung 6-7 ist zu erkennen, dass die kumulierten Kosten beim früheren Modernisierungszeitpunkt über den betrachteten Zeitraum am geringsten sind. Im Rahmen eines reinen Kostenvergleichs ist hier also ein *früherer* Zeitpunkt für die Retrofit-Maßnahme einem späterem vorzuziehen.

Abbildung 6-8 zeigt, dass der Zeitpunkt, an welchem das kumulierte Kostenniveau der Alternative ohne Retrofit das Gesamtkostenniveau der Alternative mit Retrofit erreicht, vom Zeitpunkt der Modernisierungsmaßnahmen abhängig ist. Je früher die Maßnahme durchgeführt wird, desto mehr Zeit vergeht, bis die Kostenniveaus beider Alternativen angeglichen sind. Unter Einbezug von Diskontierung der Zahlungsströme kann das beschriebene „Einholen“ der Gesamtkosten durch die Alternative ohne Retrofit mit der Amortisationsdauer gleichgesetzt werden. Als **Amortisationszeit** oder -dauer wird der Zeitraum bezeichnet, in welchem Einzahlungsüberschüsse eines Investitionsprojekts unter Einbezug von Zinsen und Zinseszinsen größer als die ursprüngliche Investition sind [Sch-2017, S. 121f.]. Gemäß Sicherheitsstreben von Investoren wird die Alternative bevorzugt, die den Rückfluss eingesetzter Mittel innerhalb kürzester Zeit gewährleistet [Erm-2016, S. 34]. Wird nur die Amortisationszeit ohne Nutzenbetrachtung als Bewertungsmaßstab genutzt, kann es folglich unter der Annahme konstanter Preise für die Investitionsprojekte zu der Entscheidung kommen, Retrofit-Maßnahmen zu einem *späteren* Zeitpunkt durchzuführen.

Die vorgestellte Methode zur Dringlichkeitsbewertung betrachtet zusätzlich den Nutzen in einem detaillierten Ausmaß. Dadurch wird die Gefahr einer einseitigen Bewertung durch einen einzigen Bewertungsmaßstab oder eine reine Kostenbetrachtung verringert.

6.5 Bewertung der Anwendbarkeit

Die Entscheidung über Retrofit-Maßnahmen erfolgt aus einem langwierigen Prozess, an dem interne und externe Interessensgruppen beteiligt sind. Betreiber und Anbieter stehen dabei miteinander im Austausch. Die entwickelte Methode bietet die Grundlage, eine strukturierte Dringlichkeitsanalyse für Modernisierungsmaßnahmen von Regalbediengeräten durchzuführen. Sie fundiert auf der Expertise möglichst aller Gruppen und unterstützt dadurch eine gesicherte Entscheidungsfindung. Abbildung 6-9 zeigt die Einbindung der Methode in den aktuellen Entscheidungsprozess.

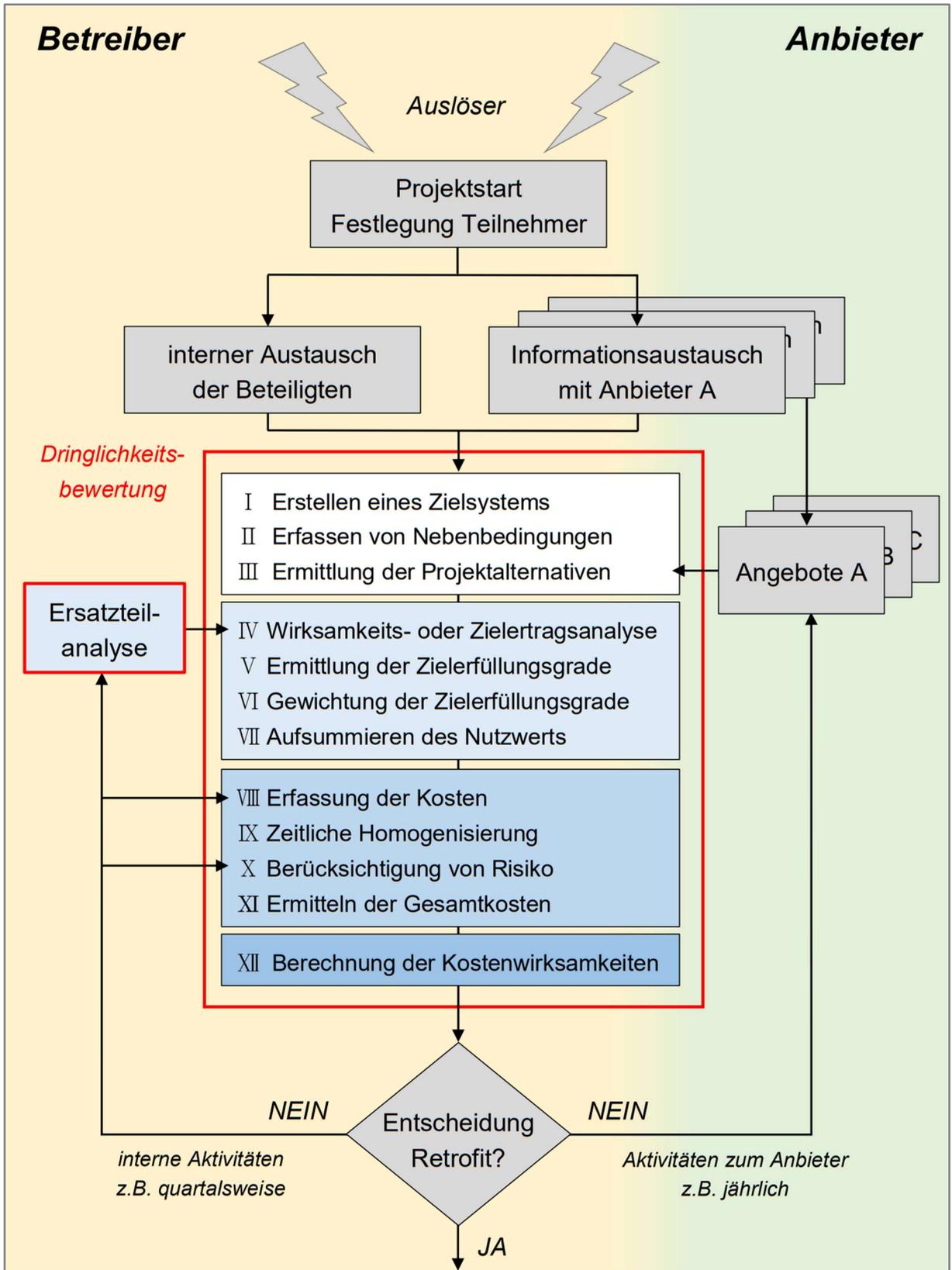


Abbildung 6-9: Einbindung der Methode in den Gesamtprozess

Nach einem auslösenden Ereignis und dem Beginn konkreter Retrofit-Überlegungen finden in der Regel ein erster interner Austausch und gegebenenfalls Gespräche mit externen Anbietern statt. Konkrete Angebote der Anbieter fließen als mögliche Projektalternativen in die Bewertung ein. Folgend ermöglicht die Methode eine detaillierte Kosten-Nutzen-Abwägung, welche in einer Entscheidungsempfehlung mündet.

Nach Berechnung der Kostenwirksamkeiten und einer davon abhängigen Entscheidung endet die Methode nicht. Vielmehr ist das Vorgehen als kontinuierlicher Prozess zu verstehen. Zur Berücksichtigung von Veränderungen sollten zeitabhängige Faktoren fortlaufend von Betreibern der Lager geprüft und bei Bedarf angepasst werden. Dazu zählen die folgenden Größen.

- Ersatzteilsituation (insbesondere Ersatzteilverfügbarkeit)
- Ausfallhäufigkeit
- Ausfalldauer
- Anlagenverfügbarkeit
- Kosten (Löhne, Strafzahlungen, usw.)

Hier bietet sich eine quartalsweise erfolgende Analyse durch Aktualisierung der Werte an. Die Erfassung des Ist-Zustands ist aufwendig, kann aber bei wiederholter Durchführung und sich einspielender Routine deutlich beschleunigt und verbessert werden. Auch Anbieter können durch Anpassung der Angebote auf die Situation die Dringlichkeitsbewertung verändern.

Wie dargestellt sind Betreiber und Anbieter gemeinsam an der Durchführung von Retrofit-Maßnahmen beteiligt. In welchem Umfang Anbieter bei Anwendung der Methode einbezogen werden, ist unternehmens- und projektabhängig zu entscheiden. Dazu könnten z.B. die mehrfach im Jahr stattfindenden Wartungstätigkeiten genutzt werden [vgl. Kapitel 5.2, S. 60].

Neben der Berücksichtigung von externen Einflüssen bezieht die Methode die Interessen von verschiedenen Abteilungen innerhalb der Firma mit ein [vgl. Kapitel 5.2, S. 61f.]. In dem Vorgehen können beispielsweise alle beteiligten Personen eigene Gewichtungen und Skalierungen durchführen, welche danach gemittelt werden. Dadurch werden die Interessen der beteiligten Gruppen in der Bewertung berücksichtigt und gewährleistet, dass technische Aspekte gleichermaßen wie betriebswirtschaftliche Interessen auf die Entscheidung einwirken.

Um der Heterogenität in Bezug auf Größe, Branche und Struktur der Unternehmen gerecht zu werden, ist die Methode vom Betreiber anpassbar. Dazu sind bewusst mehrere Stellen in der Methode eingebaut, an denen der Anwender individuell die für sein Unternehmen passenden Vorgaben eintragen kann. Konkret bieten folgende Stellen die Möglichkeit zur individuellen Anpassung.

- Die Skalierung der Bewertungsskalen können an die quantitativen Dimensionen der einzelnen Unternehmen angepasst werden.
- Der Anwender kann durch unterschiedlich starke Gewichtung eine Priorisierung der Einflussfaktoren vornehmen.
- Zur Berechnung der Ausfallkosten können Einflussfaktoren wie Pufferzeiten oder Löhne unternehmensspezifisch eingetragen werden.
- Der Betreiber kann anlagenspezifische Prognosemodelle zur Erfassung der Ausfallwahrscheinlichkeiten anwenden.

Durch die Variabilität der Methode sind Sensitivitätsanalysen möglich. Diese verdeutlichen den Einfluss der Veränderung einzelner Werte auf die gesamte Dringlichkeitsbewertung.

Wie vorgestellt ist die Methode zur Dringlichkeitsbewertung bei einer Entscheidung gegen eine Retrofit-Maßnahme als kontinuierlicher Loop anzuwenden. Auch wenn die Methode zur Entscheidung führt, die Modernisierung durchzuführen, ist es sinnvoll, die Erfassung von Werten weiter fortzuführen. Die detaillierte Auswertung entsprechender Werte über einen längeren Zeitraum kann zu Einführung und Verbesserung von Prognosemodellen genutzt werden.

7 Zusammenfassung und Fazit

Kapitel 7.1 beinhaltet eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit. In Abschnitt 7.2 wird ein kurzer Ausblick gegeben, an welchen Stellen Folgearbeiten inhaltlich anknüpfen können.

7.1 Zusammenfassung

Aufgrund der großen Vielfalt komplexer Einflussgrößen und unterschiedlicher Interessen beteiligter Personen ist es schwierig, die Dringlichkeit von Modernisierungsentscheidungen in der Intralogistik zu bewerten. Eine Tendenz aus der Praxis zeigt, dass Retrofit-Maßnahmen von Regalbediengeräten oft als zu spät empfunden werden [vgl. Kapitel 5.2, S. 62]. Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Methode zur Dringlichkeitsbewertung von Modernisierungsmaßnahmen von Regalbediengeräten zu entwickeln. Diese soll die Expertise von Betreibern intralogistischer Anlagen und Anbietern von Retrofit-Maßnahmen vereinen, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Zur Generierung theoretischer und praxisbezogener Inhalte wurden neben der Literaturrecherche telefonische Expertengespräche durchgeführt. Aufgrund der Teilnehmerzahl von zehn Experten erlaubt die Untersuchung zwar keine generalisierten Aussagen, jedoch ermöglicht sie die Generierung neuer Thesen.

Im Rahmen der Aufgabenstellung sollte zunächst ein Überblick über mögliche Bewertungsmethoden erstellt werden. Weitreichende Investitionsentscheidungen mit unsicheren Parametern können durch den Einsatz von Wirtschaftlichkeitsanalysen bewertet werden. Zum Vergleich von Alternativen werden Kosten-Nutzen-Abwägungen in monetärer oder nicht-monetärer Form eingesetzt. Bei Retrofit-Maßnahmen von RBG lässt sich der Nutzen in Punkten quantifizieren, Ausfallkosten können monetär bewertet werden. Daher ist die Kostenwirksamkeitsanalyse für die Bewertung am besten geeignet. [Gla-2014, S. 160].

Um den Nutzen bewerten zu können, sollten Einflussfaktoren einer Modernisierungsmaßnahme sowie deren Relevanz für die Entscheidung untersucht werden. Aussagen fast aller befragten Experten besagen, dass Modernisierungsentscheidungen stark von der Verfügbarkeit von Ersatzteilen abhängen. Diese wird in einem zusätzlichen Verfahren unter Einbezug ersatzteilspezifischer Einflussgrößen bewertet. Neben einflussreichen Aspekten wie der Anlageverfügbarkeit oder der Leistung des Systems

bieten Nebeneffekte wie die potenzielle Entlastung von Mitarbeitern einen weiteren Vorteil.

Zur Bewertung der Kostenseite wurde herausgearbeitet, welche Kosten bei ungeplanten Ausfällen entstehen und wovon diese abhängig sind. Expertenaussagen zum Auftreten und zu der Erfassung von Ausfallkosten fallen sehr unterschiedlich aus. Je nach Größe und Struktur der Anlage haben Ausfälle unterschiedliche Auswirkungen. Während kürzere Ausfälle geringe wirtschaftliche Relevanz haben und deshalb kostentechnisch kaum erfasst werden, können Ausfälle mit Lieferverzügen erhebliche ökonomische Schäden anrichten.

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen wurde eine Methode entwickelt, welche über einen fest definierten Zeitraum die aktuelle Situation der Anlage mit dem hypothetischen Fall einer durchgeführten Retrofit-Maßnahme vergleicht.

Zur Nutzenbewertung wird der Zustand des Lagers durch die aus Expertengesprächen gesammelten Einflussfaktoren quantifiziert und bewertet. Ein anfänglich vom Betreiber dimensionierter Umrechnungsschlüssel überträgt die Einflussgrößen in ein einheitliches Bewertungssystem. In der Methode können Betreiber die Einflussfaktoren individuell gewichten. Durch Verrechnung von Gewichtung und Bewertung kann als quantitative Nutzenbewertung für beide Alternativen der Nutzwert ermittelt werden.

Die Berechnung der Ausfallkosten ist komplex und kann nur vereinfacht dargestellt werden. Zur Berechnung der Ausfallkosten über einen bestimmten Zeitraum gibt der Betreiber individuelle Werte wie Stundenlohn für Instandhaltungspersonal oder Pufferzeiten des Lagers an. Abhängig von der Ausfallzeit können so die Kosten für *einen* Ausfall errechnet werden. Anhand von Ausfallprognosen für ein Jahr werden dann die jährlichen Ausfallkosten ermittelt. Durch Addition der Jahreskosten über den gesamten Betrachtungszeitraum können die gesamten Ausfallkosten berechnet werden. Abschließend werden die Investitionskosten als fixe Kosten für die Retrofit-Alternative aufaddiert.

Zur finalen Bewertung können Nutzwert und Kosten ins Verhältnis gesetzt werden. Das Ergebnis ist die Kostenwirksamkeit. Diese ermöglicht einen Vergleich der Alternativen, kann Empfehlungen über den Zeitpunkt von Retrofit-Maßnahmen unterstützen und bewertet die Dringlichkeit von Modernisierungen.

7.2 Ausblick

Die erarbeitete Methode fasst einen weitreichenden Themenkomplex zusammen. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Teilgebieten werden an einigen Stellen vereinfachende Annahmen getroffen. Diese bieten Ansatzpunkte für mögliche Folgearbeiten.

- Erfassung von praxisnahen Werten für die einzelnen Einflussfaktoren zur Vereinheitlichung der Bewertungsskalen und Sicherung der Objektivität (z.B. durch statistische Auswertungen verschiedener Lager und Retrofit-Maßnahmen)

In der Arbeit ist die Zielertragsskalierung aufgrund der großen Unternehmensunterschiede bewusst offengehalten. Der Betreiber trägt die Skalierung bei erster Anwendung ein. Durch die Erfassung zielsystemrelevanter Daten von weiteren Unternehmen könnte eine Vereinheitlichung der Übertragungsskala entwickelt werden. Denkbar wäre eine Kategorisierung nach Größe oder Branche der Unternehmen.

Die Arbeit zeigt die große Bedeutung der Ersatzteilverfügbarkeit in Zusammenhang mit Retrofit-Entscheidungen. Daher könnten sich weitere Arbeiten mit dem folgenden Thema befassen.

- Eine umfassende Analyse der Ersatzteilbeschaffung unter Berücksichtigung von Abkündigungen und Kapitalbindungskosten durch Vorratshaltung (Weiterführung von Kapitel 6.3)

Der Abschnitt zur Analyse der Ersatzteilsituation beinhaltet bereits eine mögliche Bewertungsmethode. Diese kann durch qualitative Forschungsarbeiten noch detaillierter ausgearbeitet werden. Denkbar wäre die Einordnung konkreter Ersatzteile eines RBG in Ersatzteilgruppen abhängig von der Marktsituation.

Eine wichtige Annahme der Arbeit ist die Verwendung von Prognosemodellen. Wie die Interviews zeigen, werden diese in der Praxis nicht genutzt [vgl. Kapitel 5.2, S. 61]. Weitere Arbeiten können das anschließende Thema untersuchen.

- Analysieren der Ausfallentwicklungen mit Alterung von Anlagen mit dem Ziel der Erstellung von Prognosemodellen für Ausfallzeit und -häufigkeit

Durch Auswertung von Ausfallzeiten aus der Vergangenheit lassen sich Prognosemodelle für die Zukunft erarbeiten. Für die hierfür notwendige detaillierte Erfassung der

Kosten kann das in der Arbeit vorgestellte Verfahren genutzt werden. Ausfallhäufigkeiten und -zeiten lassen sich in Form von Risikomatrizen festhalten [Lei-2017, S. 27f.]. So könnte eine lagerspezifische Kategorisierung z.B. getrennt nach Einzelkomponenten über die Wichtigkeit von Ausfallzeiten vorgenommen werden.

Es ist anzunehmen, dass Globalisierung und Digitalisierung in der Zukunft weiter zunehmen werden. Bei stetig wachsender globaler Konkurrenz steigt unverändert der Kostendruck auf alle Unternehmen, was die Anforderungen an die Verfügbarkeit und Flexibilität der Lieferkette ebenso erhöht. Gleichzeitig eröffnet technischer Fortschritt branchenübergreifend fortlaufend neue Lösungsansätze, um die stetig neuen Herausforderungen zu bewältigen. [Sin-2020, S. 1; Sch-2003, S. 1261]

Durch den Wechsel zur digitalen Gestaltung von Produktion und Logistik werden Modernisierungen in Zukunft voraussichtlich noch häufiger durchgeführt. Vor diesem Hintergrund wird die Bedeutung von strukturierten Untersuchungen zu Modernisierungsmaßnahmen weiter zunehmen. Die ausgearbeitete Methode zur Dringlichkeitsbewertung bietet eine Grundlage zu systematischen Analysen von Modernisierungsentscheidungen. Werden die für die Untersuchung von Regalbediengeräten spezifischen Parameter angepasst, ist es möglich, die vorgestellte Methode auf andere Modernisierungsprojekte in der Intralogistik zu übertragen. Bei Anpassung des Zielsystems kann die Methode grundsätzlich auch bei Investitionsentscheidungen für weitere Betriebsmittel genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [Arn-2019] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Aue-2013] Auer, B. R.; Holland, H.; Kamps, U.; Lübbecke, M.; Rottmann, H. (Hrsg.): Kompakt-Lexikon Wirtschaftsmathematik und Statistik – 750 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [Bar-1998] Barkovic, D.: Programmierungsmethoden beim Treffen von Investitionsentscheidungen. In: Runzheimer, B. (Hrsg.): Investitionsentscheidungen in der Praxis. Gabler, Wiesbaden, 1998, S. 1–22.
- [Bic-2017] Bichler, K.; Krohn, R.; Philippi, P.; Schneiderei, F.: Kompakt-Lexikon Logistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Bie-2008] Biedermann, H.: Ersatzteilmanagement – Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen. Springer, Berlin, 2008.
- [Bie-2017] Bienefeld, M.; Gausling, P.: Themenfindung und Fragestellung für empirische Forschungsprojekte. In: Burger, T.; Miceli, N. (Hrsg.): Empirische Forschung im Kontext Schule. Springer VS, Wiesbaden, 2017, S. 9–27.
- [Bog-2014] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Brü-2008] Brüsemeister, T.: Qualitative Forschung – Ein Überblick. VS Verl. für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2008.
- [Bus-2015] Busse von Colbe, W.; Lassmann, G.; Witte, F.: Investitionstheorie und Investitionsrechnung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Col-2010] Collin, M.: In zwölf Schritten einfach besser werden – Praxisleitfaden zur Unternehmensoptimierung. Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [DIN-13306] Deutsches Institut für Normung e.V.: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017. DIN EN Nr. 13306:2018-02, 2018.

- [DIN-15147] Deutsches Institut für Normung e.V.: Palette - Flachpaletten aus Holz - Gütebedingungen. DIN Nr. 15147:2017-05, 2017.
- [DIN-15201] Deutsches Institut für Normung e.V.: Stetigförderer. DIN Nr. 15201:1994-04, 1994.
- [DIN-24420] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ersatzteillisten. DIN Nr. 24420 Teil 1:1976-09, 1976.
- [DIN-30781] Deutsches Institut für Normung e.V.: Transportkette. DIN Nr. 30781 Teil 1:1989-05, 1989.
- [DIN-31051] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen der Instandhaltung. DIN Nr. 31051:2019-06, 2019.
- [DIN-445] Deutsches Institut für Normung e.V.: Paletten für die Handhabung von Gütern - Begriffe (ISO 445:2013). DIN EN ISO Nr. 445:2013-08, 2013.
- [DIN-528] Deutsches Institut für Normung e.V.: Regalbediengeräte - Sicherheitsanforderungen; Deutsche Fassung EN 528:2008. DIN EN Nr. 528:2009-02, 2009.
- [DIN-9241-220] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 220: Prozesse zur Ermöglichung, Durchführung und Bewertung menschenzentrierter Gestaltung für interaktive Systeme in Hersteller- und Betreiberorganisationen (ISO 9241-220:2019). DIN EN ISO:2020-07 Nr. 9241-220:2020-07, 2020.
- [Ebe-2014] Eberlin, S.; Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme – Eine Einführung in die Praxis. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Erm-2016] Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H.: Investition und Finanzierung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Fel-2010] Feldhorst, S.; Libert, S.: Software-Methoden für die Automatisierung. In: Günthner, W. A.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer, Berlin, 2010, S. 29–40.
- [FEM-9.101] Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik: Terminologie - Regalbediengerät - Definition. FEM-Richtlinie Nr. 9.101, 2016.

- [FEM-9.851] Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM Nr. 9.851, 2012.
- [Fis-2004] Fischer, W.; Dittrich, L.: Materialfluß und Logistik – Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [Gan-1997] Gans, O.; Marggraf, R.: Wohlfahrtsmessung und betriebswirtschaftliche Investitionskriterien. Springer, Berlin, 1997.
- [Gla-2014] Glatte, T.: Entwicklung betrieblicher Immobilien – Beschaffung und Verwertung von Immobilien im Corporate Real Estate Management. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2014.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Han-2011] Hanusch, H.: Nutzen-Kosten-Analyse. Vahlen, München, 2011.
- [Har-2019] Hartel, D. H.: Vorgehensweise in der Projektarbeit. In: Hartel, D. H. (Hrsg.): Projektmanagement in Logistik und Supply Chain Management. Springer Gabler, Wiesbaden, 2019, S. 47–92.
- [Her-2015] Hering, E.: Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [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, s.l., 2018, S. 135–152.
- [Hom-2011] Hompel, M. ten; Heidenblut, V. (Hrsg.): Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Springer, Berlin, 2011.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Kas-2020] Kasper, C.: Alternative: Retrofit oder Instandhaltung. – Erweiterte Lebensdauer für Lagersysteme und Sägeanlagen. In: Retrofit & Maintenance 2020 - Grundlagen, Projekte, Unternehmen (2020), S. 20–23.
- [Kir-2019] Kirchheim, A.; Dibbern, P.: Flurförderzeuge. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik. Springer Vieweg, Berlin, 2019, S. 41–61.

- [Kle-2010] Klein, A.: Projektmanagement für Kulturmanager. VS Verl. für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2010.
- [Lau-1999] Lauber, R.; Göhner, P.: Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Springer, Berlin, 1999.
- [Lau-2003] Laux, H.: Entscheidungstheorie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2003.
- [Leh-2016] Lehmann, W.: Globale Supply Chain – Technischer Fortschritt, Transformation und Circular Economy. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [Lei-2017] Leidinger, B.: Wertorientierte Instandhaltung – Kosten senken, Verfügbarkeit erhalten. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Lub-2018] Luber, D.-I. S.: Was ist Retrofit? <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-retrofit-a-775551/>, Aufruf am 15.11.2020.
- [Luc-2004] Luczak, H.; Stich, V.: Betriebsorganisation im Unternehmen der Zukunft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2004.
- [Mar-2016] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [May-2020] Mayring, P.: Qualitative Forschungsdesigns. In: Mey, G.; Mruck, K. (Hrsg.): Designs und Verfahren. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020, S. 3–17.
- [Mes-2011] Messmer, H.; Hitzler, S.: Interaktion und Kommunikation in der Sozialen Arbeit. Fallstudien zum Hilfeplangespräch. In: Oelerich, G. (Hrsg.): Empirische Forschung und soziale Arbeit. VS Verl. für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2011, S. 51–64.
- [Mey-2020] Mey, G.; Mruck, K.: Qualitative Interviews. In: Mey, G.; Mruck, K. (Hrsg.): Designs und Verfahren. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020, S. 315–335.

- [Muc-2018] Muchna, C.; Brandenburg, H.; Fottner, J.; Gutermuth, J.: Grundlagen der Logistik – Begriffe, Strukturen und Prozesse. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Müh-2015] Mühlenkamp, H.: Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor – Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2015.
- [Mül-1990] Müller, K.: Management für Ingenieure – Grundlagen, Techniken, Instrumente. Springer, Berlin, 1990.
- [Paw-2016] Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik – Vorgehensweisen, Methoden, Tools. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Pér-2020] Pérez-Manglano García, J. M.: Analysis of the Modernization Process of Automated Storage and Retrieval Systems. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, Garching, 2020.
- [Rue-2018] Rücker, A.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, Garching, 2018.
- [Ryl-2010] Ryll, D.-I. F.; Freund, D.-I. C.: Grundlagen der Instandhaltung. In: Schenk, M. (Hrsg.): Instandhaltung technischer Systeme. Springer, Berlin, 2010, S. 23–101.
- [Sch-1996] Schaltegger, S.; Kubat, R.; Hilber, C.; Vaterlaus, S.: Innovatives Management staatlicher Umweltpolitik – Das Konzept des New Public Environmental Management. Birkhäuser Basel, Basel, s.l., 1996.
- [Sch-2003] Schmidt, A.; Kiefer, C.: Kooperationen zwischen mittelständischen Unternehmen. In: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D. (Hrsg.): Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 2003, S. 1260–1281.
- [Sch-2004] Schaefer, C.: Steuerung und Kontrolle von Investitionsprozessen – Theoretischer Ansatz und Konkretisierung für das öffentliche Beteiligungscontrolling. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2004.

- [Sch-2006] Schröter, M.: Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains – Ein systemdynamischer Ansatz. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2006.
- [Sch-2014] Schuh, G.; Schmidt, C.; Adema, J.: Auftragsmanagement. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Springer Vieweg, Berlin, 2014, S. 109–149.
- [Sch-2015] Schuster, T.; Rüdert von Collenberg, L.: Finanzierung: Finanzberichte, -kennzahlen, -planung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Sch-2017] Schuster, T.; Rüdert von Collenberg, L.: Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Sch-2019a] Schmalen, H.; Pechtl, H.: Grundlagen und Probleme der Betriebswirtschaft. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2019.
- [Sch-2019b] Schmidt, T.; Hahn-Woernle, P.; Heptner, F.: Lagersysteme für Stückgut. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik. Springer Vieweg, Berlin, 2019, S. 73-112.
- [Sin-2020] Sinsel, A.: Das Internet der Dinge in der Produktion – Smart Manufacturing für Anwender und Lösungsanbieter. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [VDI-2681] Verein Deutscher Ingenieure: Steuerungen für Regalbediengeräte. VDI-Richtlinie Nr. 2681, 1993.
- [VDI-3423] Verein Deutscher Ingenieure: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. VDI-Richtlinie Nr. 3423, 2011.
- [VDI-3561a] Verein Deutscher Ingenieure: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. VDI-Richtlinie Nr. 3561 Blatt 1, 1973.
- [VDI-3561b] Verein Deutscher Ingenieure: Spielzeitermittlung von regalgangunabhängigen Regalbediengeräten. VDI-Richtlinie Nr. 3561 Blatt 2, 2019.
- [VDI-3564] Verein Deutscher Ingenieure: Brandschutz. VDI-Richtlinie Nr. 3564 Blatt 1, 2017.

- [VDI-3580] Verein Deutscher Ingenieure: Grundlagen zur Erfassung von Störungen an Hochregalanlagen. VDI-Richtlinie Nr. 3580, 1995.
- [VDI-3581] Verein Deutscher Ingenieure: Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. VDI-Richtlinie Nr. 3581, 2004.
- [VDI-3649] Verein Deutscher Ingenieure: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. VDI-Richtlinie Nr. 3649, 1992.
- [VDI-3978] Verein Deutscher Ingenieure: Durchsatz und Spielzeitberechnungen in Stückgut-Fördersystemen. VDI-Richtlinie Nr. 3978, 2018.
- [VDI-4403] Verein Deutscher Ingenieure: Modernisierung und Erweiterung förder technischer Anlagen und logistischer Systeme bei laufendem Betrieb. VDI-Richtlinie Nr. 4403, 2011.
- [VDI-4480] Verein Deutscher Ingenieure: Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen. VDI-Richtlinie Nr. 4480, 1998.
- [VDI-4486] Verein Deutscher Ingenieure: Zuverlässigkeit in der Intralogistik. VDI-Richtlinie Nr. 4486, 2012.
- [Wes-2012] Wessler, M.: Entscheidungstheorie – Von der klassischen Spieltheorie zur Anwendung kooperativer Konzepte. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Aufbau eines Hochregallagers [Hom-2011, S. 126]	8
Abbildung 2-2: Technischer Aufbau eines Regalbediengeräts	10
Abbildung 2-3: Ein- und Zweimast-RBG [Hom-2018, S. 199ff.]	11
Abbildung 2-4: Bewegungsrichtungen eines Regalbediengeräts [FEM-9.101]	12
Abbildung 2-5: Veranschaulichung der Arbeitsspiele von Regalbediengeräten	13
Abbildung 2-6: Serielle und parallele Anlagenstruktur [VDI-3581]	16
Abbildung 2-7: Zusammenhang von Anlagenstruktur und Anlagenverfügbarkeit [Arn-2019, S. 325]	17
Abbildung 2-8: Instandhaltungsarten angelehnt an DIN 13306 [DIN-13306]	19
Abbildung 2-9: Kritikalitätsmatrix angelehnt an DIN 13306 [DIN-13306]	20
Abbildung 2-10: Ausfallverlauf nach der Badewannenkurve angelehnt an Pawelleck [Paw-2016, S. 70]	21
Abbildung 2-11: Zusammenhang von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung von Risiken angelehnt an Leidinger [Lei-2017, S. 27f.]	22
Abbildung 2-12: Qualitativer Störungsverlauf bei ungeplanten Ausfällen [VDI-4403]	26
Abbildung 2-13: ABC-Verteilung	28
Abbildung 2-14: Gesamtkosten der Ersatzteilwirtschaft angelehnt an Pawelleck [Paw-2016, S. 294]	29
Abbildung 2-15: Auswirkungen von Modernisierungen auf die Verfügbarkeit angelehnt an VDI 4403 [VDI-4403]	32
Abbildung 3-1: Übersicht von Bewertungsmethoden angelehnt an Glatte [Gla-2014, S. 133]	34
Abbildung 3-2: Übersicht von nicht-monetären Bewertungsmethoden angelehnt an Glatte [Gla-2014, S. 134]	36
Abbildung 4-1: Qualitatives Forschungsdesign angelehnt an Mayring [May-2020, S. 7]	48
Abbildung 5-1: Auswertung 2 - Anzahl Wartungen pro Jahr	60
Abbildung 5-2: Auswertung 2 - Dokumentation von Ausfällen	61
Abbildung 5-3: Auswertung 2 - Auslöser von Retrofits	61
Abbildung 5-4: Auswertung 4 - Redundante Anlagenstruktur	65
Abbildung 5-5: Auswertung 4 - Pufferzeiten der Anlagenbetreiber	65
Abbildung 5-6: Auswertung 4 - Erfassung primärer Ausfallkosten	66

Abbildung 5-7: Auswertung 4 - Nutzen von Alternativlagern	67
Abbildung 5-8: Auswertung 4 - Priorisierung von Aufträgen	68
Abbildung 5-9: Auswertung 4 - Erfassung sekundärer Ausfallkosten	69
Abbildung 6-1: Methode - Zusammensetzung variabler Kosten	77
Abbildung 6-2: Methode - Zusammenfassung der Kostenberechnung	81
Abbildung 6-3: Kostenverlauf ohne Retrofit	103
Abbildung 6-4: Vergleich verschiedener Kostenwirksamkeiten mit und ohne Retrofit	104
Abbildung 6-5: Prognostizierter Kostenverlauf mit und ohne Retrofit	105
Abbildung 6-6: Exemplarischer Verlauf jährlicher Kosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten	106
Abbildung 6-7: Verlauf der Gesamtkosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten	107
Abbildung 6-8: Verlauf der Gesamtkosten bei unterschiedlichen Retrofit-Zeitpunkten	107
Abbildung 6-9: Einbindung der Methode in den Gesamtprozess	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Wahrscheinlichkeitsklassen angelehnt an Leidinger [Lei-2017, S. 27f.]	23
Tabelle 2-2:	Exemplarische Risikomatrix für Regalbediengeräte	24
Tabelle 2-3:	Gründe für Modernisierungen in der Intralogistik nach VDI 4403	31
Tabelle 3-1:	Übersicht der Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse	36
Tabelle 3-2:	Methodik der Nutzwertanalyse nach Hanusch	37
Tabelle 3-3:	Exemplarische Umrechnungsskala der Zielerfüllungsgrade	39
Tabelle 3-4:	Exemplarische Nutzwertmatrix einer NWA nach Hanusch [Han-2011, S. 181]	40
Tabelle 3-5:	Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse nach Hanusch	41
Tabelle 3-6:	Exemplarische Kosten-Nutzen-Matrix nach Glatte	43
Tabelle 3-7:	Methodik der Kostenwirksamkeitsanalyse	44
Tabelle 4-1:	Leitfaden 1 - Kategorisierung	51
Tabelle 4-2:	Leitfaden 2 - Aktueller Entscheidungsprozess	52
Tabelle 4-3:	Leitfaden 3 - Instandhaltung	53
Tabelle 4-4:	Leitfaden 4 - Folgen ungeplanter Ausfälle	55
Tabelle 4-5:	Leitfaden 5 - Einflussfaktoren auf die Modernisierungsentscheidung	56
Tabelle 5-1:	Auswertung 1 - Kategorisierung der Unternehmen	57
Tabelle 5-2:	Auswertung 1 - Übersicht Lagerstruktur	58
Tabelle 5-3:	Auswertung 3 - Einflussfaktoren auf die Dringlichkeitsbewertung	63
Tabelle 6-1:	Methode - Übersicht Methodik	71
Tabelle 6-2:	Methode - Zielsystem	72
Tabelle 6-3:	Methode - Wirksamkeitsmaße für die Einzelziele	73
Tabelle 6-4:	Methode - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 1	77
Tabelle 6-5:	Methode - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 2	78
Tabelle 6-6:	Methode Beispiel - Zielertragsanalyse	82
Tabelle 6-7:	Methode Beispiel - Umrechnungsskala für die Einzelziele	84
Tabelle 6-8:	Methode Beispiel - Zielerfüllungsgrade	85
Tabelle 6-9:	Methode Beispiel - Gewichtung der Einzelziele	86
Tabelle 6-10:	Methode Beispiel - Berechnung der Teilnutzwerte	87

Tabelle 6-11:	Methode Beispiel - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 1	88
Tabelle 6-12:	Methode Beispiel - Ausfallkosten der Ausfallkategorie 2	89
Tabelle 6-13:	Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit	90
Tabelle 6-14:	Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit	90
Tabelle 6-15:	Methode Beispiel - Prognostizierte jährliche Ausfallkosten abhängig von der Ausfallzeit	91
Tabelle 6-16:	Methode Beispiel - Risikomatrix	92
Tabelle 6-17:	Methode Beispiel - Verlauf der variablen Kosten	93
Tabelle 6-18:	Methode Beispiel - Berechnung der Kostenwirksamkeiten	94
Tabelle 6-19:	Methode - Einordnung der Ersatzteilsituation	95
Tabelle 6-20:	Methode - Analyse der Ersatzteilsituation	96
Tabelle 6-21:	Methode - Wirksamkeitsmaße für die Wiederbeschaffungskosten	98
Tabelle 6-22:	Methode - Einordnung Ersatzteilverfügbarkeit	99
Tabelle 6-23:	Methode Beispiel - Zielerträge für die Wiederbeschaffungskosten	100
Tabelle 6-24:	Methode Beispiel - Umrechnungsskala für die Wiederbeschaffungskosten	100
Tabelle 6-25:	Methode Beispiel - Nutzwertanalyse der Wiederbeschaffungskosten	101
Tabelle 6-26:	Methode Beispiel - Aufwand Wiederbeschaffung	102
Tabelle 6-27:	Methode Beispiel - Einordnung der Ersatzteilverfügbarkeit	102
Tabelle 6-28:	Kostenwirksamkeiten bei unterschiedlichen Prognosemodellen	104

