



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

LCC-basierte Untersuchung von Rillenschienenweichen

LCC-based analysis of grooved rail switches

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Norbert Ostermann

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ.Ass. Dipl.-Ing Dr.techn. Bernhard Rürger

am

Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Matthias Waibel

0125552

Döblinger Hauptstraße 56/2a

1190 Wien

Wien, im Juni 2008

Matthias Waibel

Kurzfassung

Matthias Waibel

LCC-basierte Untersuchung von Rillenschienenweichen

Die Straßenbahninfrastruktur zeichnet sich durch hohe Investitionskosten aus, was für die Wiener Linien GmbH & Co KG erhebliche jährliche Abschreibungen zur Folge hat. Die Rillenschienenweichen stellen aufgrund ihrer Verschleißanfälligkeit im Zungen- und Herzstückbereich sowie bei den elektrischen Anlagen einen entscheidenden Kostenfaktor im Straßenbahn-Oberbau dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit einer **LCC (Life Cycle Costs)** - Analyse versucht, etwaige Kostentreiber einer Rillenschienenweiche zu identifizieren und Optimierungspotentiale aufzuzeigen.

Die Analyse zeigt, dass eine LCC-Betrachtung einer Rillenschienenweiche der Wiener Linien nur sehr begrenzt durchführbar ist. Eine ständige Kontrolle der **RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)** - Performance sowie eine damit verbundene laufende Überwachung der Systemleistung sind bei den Wiener Linien noch nicht vollständig implementiert. Eine Ermittlung des Aufwands zu Aufrechterhaltung des gewünschten Leistungsniveaus ist deshalb nur auf Basis von Schätzungen möglich. Aus Mangel an strukturierten Daten, die eine objektbezogene Zuordnung der Kosten ermöglichen, konnte lediglich eine grobe Darstellung der Kostenströme erreicht werden.

Um zukünftig genauere Analysen durchführen zu können, muss eine genauere Datenerfassung und Datenpflege in die Prozesse der Wiener Linien integriert werden.

Abstract

Matthias Waibel

LCC-based analysis of grooved rail switches

The tramway-infrastructure is characterised by high investment costs, which cause significant annual depreciations for the Wiener Linien GmbH & Co KG. As a result of the sensibility of the switch blade, the frog and the electrical elements, the grooved rail switches represent an essential cost factor in the tramway track-system. Within the scope of this master's thesis an **LCC (Life Cycle Costs)** – Analysis is conducted in order to determine any cost drivers of grooved rail switches and identify possible optimisation potentials.

The analysis shows that an efficient LCC-Approach to grooved rail switches of the Wiener Linien is not feasible. A continuous monitoring of the **RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)** – Performance as well as an associated collateral surveillance of the system performance are not included into the processes of the Wiener Linien yet. The evaluation of the expenses to maintain the required performance level is only based on estimations. For lack of structured data, which enable a material-related allocation of costs, only an approximate statement of the future costs can be submitted.

In order to be in a position to conduct a prospective analysis, the Wiener Linien have to integrate a more detailed data collection and data administration into their operational sequences.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Anhangsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einführung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Inhalt und Zieldefinition der Arbeit.....	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 RAMS	4
2.1.1 Normative Grundlagen - Die RAMS-Spezifikation	5
2.1.2 RAMS für Bahnanlagen	5
2.1.3 Zuverlässigkeit	7
2.1.4 Verfügbarkeit.....	9
2.1.5 Instandhaltbarkeit	11
2.1.6 Sicherheit	12
2.2 Instandhaltung.....	15
2.2.1 Ziele der Instandhaltung	16
2.2.2 Instandhaltungsstrategien	17
2.2.2.1 Ausfallbehebung	19
2.2.2.2 Zeitgesteuerte periodische Instandhaltung	19
2.2.2.3 Zustandsorientierte Instandhaltung	20
2.2.2.4 Vorausschauende Instandhaltung.....	21
2.3 Life Cycle Costing	23
2.3.1 Normative Grundlagen	24
2.3.2 Phasen des Lebenszyklus	25
2.3.3 Das LCC – Modell.....	26
2.3.3.1 Modellstruktur	28
2.3.3.2 Abschätzungsverfahren von Kostenelementen	29
2.3.3.3 Berechnungsgrundlagen	30

2.3.3.4	Prozess der LCC-Betrachtung.....	34
2.3.4	Zusammenhang zwischen LCC und RAMS.....	35
2.4	Das LCC/RAMS-Konzept.....	37
2.4.1	Einschränkungen in der Anwendbarkeit des LCC/RAMS - Konzepts.....	38
2.4.1.1	Bewertung der Sicherheit.....	38
2.4.1.2	Stand der Technik.....	39
2.4.1.3	Kundenempfinden und Image.....	39
2.4.1.4	Finanzrisiko.....	40
2.4.1.5	Rechtsrisiko.....	41
2.4.1.6	Mangelnde Transparenz der Prozesse.....	42
2.4.1.7	Politischer Einfluss.....	42
3	Plan der LCC-Analyse.....	43
3.1	Zieldefinition.....	43
3.2	Anlagenbeschreibung.....	44
3.2.1	Allgemein.....	44
3.2.1.1	Konstruktive Merkmale.....	44
3.2.1.2	Geometrie.....	45
3.2.1.3	Verzweigungsweiche.....	46
3.2.1.4	Vereinigungsweiche.....	46
3.2.2	Verwendete Anlagen.....	47
3.2.2.1	Anlage 09-03/I-VI - Einbauphase, Betriebsphase I.....	47
3.2.2.2	Anlage 13-21/8-13 - Betriebsphase II.....	47
3.2.2.3	Anlage 18-04/42-47 - Betriebsphase III.....	48
3.2.2.4	Anlage 20-04/35-40 - Betriebsphase IV, Ausbauphase.....	49
3.3	Randbedingungen.....	50
3.3.1	Unternehmerische Randbedingungen.....	50
3.3.1.1	Ausgliederung und ÖPNV-Vertrag.....	50
3.3.1.2	Unternehmenszahlen.....	52
3.3.1.3	Organisationsstruktur des Unternehmens.....	52
3.3.1.4	Verpflichtung gegenüber dem Kunden.....	53
3.3.2	Betriebliche Randbedingungen.....	55
3.3.2.1	Abteilung B63 „Bahnbau“.....	55

3.3.2.2	Abteilung B64 „Oberbau und Geodäsie“	56
3.3.2.3	Abteilung B68 „Elektro- und Maschinentechnik“	57
3.3.2.4	Beanspruchung der Weichen.....	57
3.3.2.5	Örtliche Gegebenheiten.....	60
4	Erstellung des LCC-Modells	62
4.1	Lebenszyklusphasen einer Rillenschienenweiche	62
4.1.1	Vorbereitungsphase	63
4.1.2	Einbauphase.....	64
4.1.3	Betriebsphase.....	64
4.1.4	Ausbauphase.....	64
4.2	Produktstruktur einer Rillenschienenweiche	65
4.2.1	Befahrbare Oberbauelemente	65
4.2.1.1	Zungenvorrichtungen	65
4.2.1.2	Schienen	67
4.2.1.3	Herzstück.....	67
4.2.2	Schienenbefestigung/Eindeckung.....	68
4.2.2.1	Spurstangen	68
4.2.2.2	Niederhalter	68
4.2.2.3	Unterkonstruktion	68
4.2.2.4	Eindeckung.....	69
4.2.2.5	Spitzeinlagen.....	69
4.2.3	Stellvorrichtung	69
4.2.4	Weichenheizung	71
4.2.5	Hilfsstoffe	72
4.2.6	Betriebsstoffe.....	72
4.3	Kostenaufgliederung einer Rillenschienenweiche.....	73
4.3.1	Planung/Vermessung.....	73
4.3.2	Weichenfertigung im Werk	73
4.3.3	Bau.....	74
4.3.3.1	Ausbau.....	74
4.3.3.2	Einbau	74
4.3.3.3	Abnahme	75

4.3.4	Technische Überwachung	75
4.3.4.1	Streckenbegehung	75
4.3.4.2	Weichen- und Kreuzungsprüfung	75
4.3.4.3	Gleismesswagen	75
4.3.5	Wartung	76
4.3.5.1	Schmieren/Reinigen	76
4.3.5.2	Reinigung der Entwässerung	77
4.3.5.3	Vegetationskontrolle	77
4.3.5.4	Winterdienst	77
4.3.6	Planmäßige Instandsetzung	78
4.3.6.1	Reprofilierung	78
4.3.6.1	Aufschweißung	78
4.3.6.2	Zungentausch	79
4.3.6.3	Instandsetzung der Weichensteuerung	79
4.3.6.4	Tausch der Stellvorrichtung	79
4.3.6.5	Tausch der Weichenheizung	80
4.3.7	Störungsbehebung	80
4.3.8	Erneuerung	81
4.3.9	Nichtverfügbarkeit / Störungen	81
4.4	Kostenelemente und deren Abschätzungsverfahren	82
4.5	Datenquellen	82
4.6	Umgang mit Unsicherheiten	82
5	Analyse des LCC-Modells	84
5.1	Entwicklung von Kostenschätzungen	84
5.2	Darstellung der Ergebnisse	87
5.2.1	Rillenschienenweiche mit einer Liegedauer von 15 Jahren	87
5.2.2	Rillenschienenweiche mit einer Liegedauer von 20 Jahren	88
5.2.3	Zusammenhang zwischen Kosten und Liegedauer	89
5.3	Bewertung der Ergebnisse	91
6	Zusammenfassung	95
7	Literaturverzeichnis	97
8	Anhang	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtungszeitraum.....	2
Abbildung 2: Zusammenhänge der RAMS-Elemente [4, S. 10].....	6
Abbildung 3: Badewannenkurve [7, S. 7]	8
Abbildung 4: Instandhaltungsstrategien [11, S. 13]	18
Abbildung 5: Verminderung des Nutzungsvorrats; PF-Kurve [8, S. 17,193].....	21
Abbildung 6: Festlegung, Entstehung und Beeinflussbarkeit der Kosten [13, S. 22, 123].	23
Abbildung 7: Phasen im Lebenszyklus eines Produktes [17, S. 33 f.].....	25
Abbildung 8: Dreidimensionale LCC-Matrix am Beispiel einer Rillenschienenweiche	28
Abbildung 9: Einfluss des Zeitpunktes einer Zahlung auf den Barwert [16, S. 23].....	31
Abbildung 10: NPV als Summe der Barwerte [16, S. 23].....	32
Abbildung 11: Umrechnung der LCC in betragsgleiche Zahlungen [16, S. 24].....	33
Abbildung 12: Vereinfachter Zusammenhang zwischen LCC und RAMS [3, S. 7].....	36
Abbildung 13: Aufgliederung der Fahrwegkomponenten [2, S. 58].....	43
Abbildung 14: Arten von Weichen.....	44
Abbildung 15: 6-Punkte-Anlage.....	45
Abbildung 16: Lageplan der Anlage 09-03/I-VI [28]	47
Abbildung 17: Lageplan der Anlage 13-21/8-13 [28].....	48
Abbildung 18: Lageplan der Anlage 18-04/42-47 [28].....	48
Abbildung 19: Lageplan der Anlage 20-04/35-40 [28].....	49
Abbildung 20: Modal Split in Wien, Stand 2004 [34]	52
Abbildung 21: Dienstleistungs-Qualitätskreis [30].....	53
Abbildung 22: Die Großstrecken der B63 [36]	55
Abbildung 23: Lebenszyklusphasen einer Rillenschienenweiche.....	62
Abbildung 24: Prozess-Kreislauf einer Ersatzinvestition.....	63
Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zungenbereichs	65
Abbildung 26: angeschweißte Federzungenvorrichtung	66
Abbildung 27: Federzunge mit Keilvorrichtung der VAE [43, S. 4]	66
Abbildung 28: Rillenschienenherzstück [43, S. 6].....	67
Abbildung 29: Umstelleinheit VS-20 [46, S. 4 f.].....	70
Abbildung 30: Weichenantrieb VS-60 [46, S. 11, 15]	71

Abbildung 31: Darstellung der Zahlungsströme über die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 15 Jahren	87
Abbildung 32: Darstellung der Kostenverteilung auf die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 15 Jahren	87
Abbildung 33: Darstellung der Zahlungsströme über die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 20 Jahren	88
Abbildung 34: Darstellung der Kostenverteilung auf die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 20 Jahren	89
Abbildung 35: Annuitäten bei unterschiedlichen Liegezeiten	89
Abbildung 36: Verteilung der LCC auf die Abteilungen der Wiener Linien	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausfallkategorien nach DIN EN 50126 [4, S. 16].....	10
Tabelle 2: Beispiel einer Risikobewertung [4, S. 19].....	14
Tabelle 3: Beispiel für Einfluss des Zinssatzes auf den Kapitalwert	41
Tabelle 4: Matrixorganisation Abteilung B63 „Bahnba“ [36, S. 4].....	56
Tabelle 5: Inflationswerte 2003 bis 2008	84
Tabelle 6: Interner Zinssatz und Inflation für die LCC-Analyse	84

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Organigramm Wiener Stadtwerke Holding AG [50].....	102
Anhang 2: Organigramm Wiener Linien GmbH & Co KG	103
Anhang 3: Induktive Weichensteuerung	104
Anhang 4: Regelschienenprofile 63Ri (Ri210/95+80a) [44]	105

Abkürzungsverzeichnis

A	Verfügbarkeit (Availability)
ABW	Außenbogenweiche
Aufl.	Auflage
BEK	Betrieberschwerniskosten
bzw.	beziehungsweise
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
CELENEC	Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
CER	Cost Estimating Relationship
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dt.	Deutsche
EN	Europäische Norm
EW	Einfache Weiche
e.V.	eingetragener Verein
F	Ausfallzeitpunkt
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GAMAB	Globalement Au Moins Aussi Bon
ggf.	gegebenfalls
Hrsg.	Herausgeber
IBW	Innenbogenweiche
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
inkl.	inklusive
KCS	Kompetenzzentrum der Wiener Linien
KORE	Kostenrechnung
LCC	Life Cycle Costs
M	Instandhaltbarkeit (Maintainability)
MDBF	Mean Distance Between Failures
MDBM	Mean Distance Between Maintenance
MDT	Mean Down Time

MDTF	Mean Distance To Failure
MEM	Minimum Endogenous Mortality
MTBF	Mean Time Between Failures
MTBM	Mean Time Between Maintenance
MTTF	Mean Time To Failure
MTTM	Mean Time To Maintain
MTTPM	Mean Time To Preventive Maintenance
MTTR	Mean Time To Repair
MUT	Mean Up Time
NPV	Net Present Value
o.a.	oben angeführt
o.g.	oben genannt
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P	Zeitpunkt des Eintretens einer potentiellen Störung
PA	Pauschale
PA	Punkt-Verfügbarkeit
QM	Qualitätsmanagement
R	Zuverlässigkeit (Reliability)
RAMS	Begriffspaket „Reliability, Availability, Maintainability, Safety“
resp.	respektive
RCM	Reliability-centred Maintenance
S	Sicherheit (Safety)
S.	Seite
Stk.	Stück
SAP	Systeme, Anwendungen, Produkte in der Datenverarbeitung
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
TCO	Total Cost Of Ownership
TPM	Total Productive Maintenance
usw.	und so weiter
Übers.	Übersetzung
Verl.	Verlag
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
λ	Ausfallsrate

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Durch die Wandlung vieler Infrastrukturbetreiber (so auch der Wiener Linien) zu einem privatwirtschaftlich orientierten Unternehmen ist die Analyse und Optimierung der Wirtschaftlichkeit aller Prozesse zu einer Notwendigkeit geworden [1, S. 46]. Der Fahrweg verursacht für den Bahnbetreiber aufgrund der hohen Investitionskosten erhebliche jährliche Abschreibungen, welche im Prinzip nur durch eine Verlängerung der Lebensdauer vermindert werden können. Speziell die Weichen nehmen im Oberbau aufgrund ihrer konstruktiven Ausbildung und der damit verbundenen Verschleißanfälligkeit eine Sonderstellung ein [2, S. 58].

Durch eine Analyse der **LCC (Life Cycle Costs)**, welche eine Anlage von der Idee über die Fertigung, den Einbau und den Betrieb bis hin zur Außerbetriebnahme und Entsorgung betrachtet, kann eine bessere Vergleichbarkeit der Wirtschaftlichkeit erfolgen, als dies mit einem reinen Investitionskostenvergleich möglich wäre. Die Kosten die während der Betriebsphase durch Inspektion, Wartung und Instandsetzung für den Bahnbetreiber anfallen, können im Vergleich zu den Investitionskosten beträchtlich hoch sein, und müssen deshalb schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung in die Überlegungen mit einbezogen werden. Infrastrukturbetreiber streben, wie jedes andere private Unternehmen, nach einer Minimierung der Gesamtkosten, jedoch ohne die Bedürfnisse des Kunden in Bezug auf Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit zu vernachlässigen. Die Definition von **RAMS-Zielen (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)** ist für eine Kostenoptimierung entscheidend, da eine Bewertung und Kontrolle von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit und Instandhaltbarkeit über alle Lebensphasen möglich ist.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird mittels einer LCC-Analyse versucht, mögliche Optimierungspotenziale bei Rillenschienenweichen der Wiener Linien aufzuzeigen und zu quantifizieren.

1.2 Inhalt und Zieldefinition der Arbeit

Um die elementaren Ansätze und Verfahren des LCC/RAMS-Konzepts, welches als Basis für diese Arbeit verwendet wird, zu erläutern, werden in Abschnitt 2 zunächst die theoretischen Grundlagen der Begriffe RAMS, Instandhaltung und LCC sowie deren Interaktion näher definiert.

Anschließend wird basierend auf der Norm DIN IEC 60300-3-3:1999-03 „Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3: Anwendungsleitfaden – Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten“ [3] der Prozess der Betrachtung der Lebenszykluskosten auf die Rillenschienenweichen der Wiener Linien angewandt.

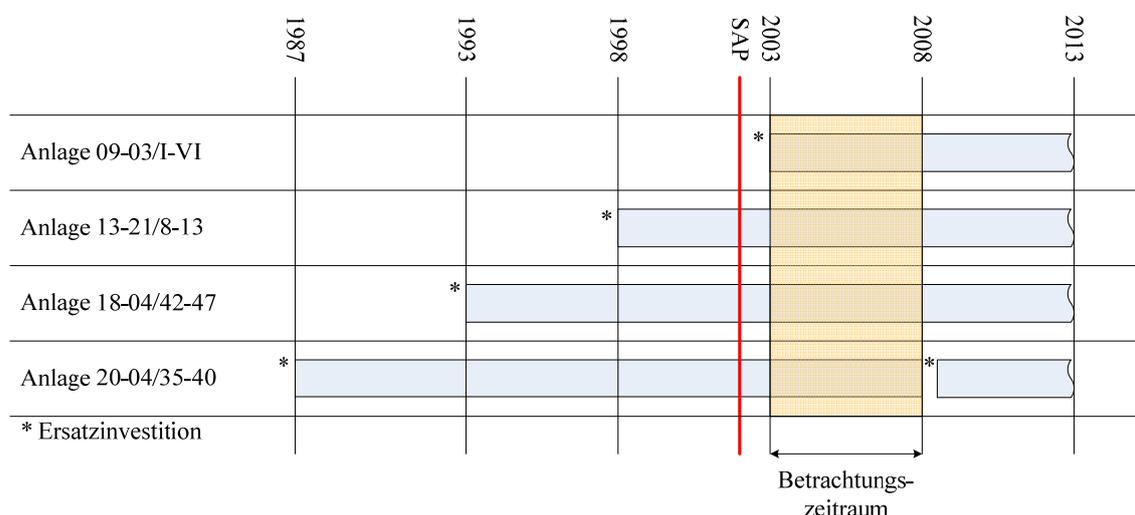


Abbildung 1: Betrachtungszeitraum

Für die Untersuchung der ersten Lebensphasen wurde eine Anlage gewählt, welche im Jahr 2003 eingebaut wurde. Es wurde deshalb eine so „junge“ Weiche für die Analyse herangezogen, weil die Wiener Linien seit 2002 ein SAP-System eingeführt haben, was es ermöglicht eine genauere Aufschlüsselung der Kosten durchzuführen als in den Jahren davor. Um die Daten über alle Lebensphasen der Weiche zu erhalten, werden auch Daten ähnlicher, schon länger liegender Weichen mit vergleichbarer Geometrie verwendet, um nicht 15-20 Jahre auf die Daten dieser spezifischen Weiche warten zu müssen (siehe Abbildung 1).

Es wird ein Plan für die LCC-Analyse erstellt in welchem jene Rahmenbedingungen genauer definiert werden, die einen Einfluss auf die LCC haben.

Im nächsten Abschnitt wird das LCC-Modell für die Rillenschienenweiche erstellt. Es erfolgt die Definition der Lebenszyklusphasen, der Produktstruktur und der einzelnen Kostengrößen über die gesamte technische Lebensdauer der Anlage. Im Rahmen der eigentlichen Analyse werden dann die Kosten ermittelt und alternative Handlungsweisen und Prozesse gegeneinander abgewogen.

Das Ziel der LCC-Analyse ist es, die Gesamtkosten einer Rillenschienenweiche über die gesamte Lebensdauer zu ermitteln, etwaige Optimierungspotentiale zu definieren und dadurch die Möglichkeit zu schaffen, die Gesamtkosten zu verringern.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 RAMS

Der Begriff RAMS vereint die Eigenschaften Zuverlässigkeit (Reliability), Verfügbarkeit (Availability), Instandhaltbarkeit (Maintainability) und Sicherheit (Safety) und wird in der DIN 50126 [4, S. 10] als „*Charakteristik für das Langzeitbetriebsverhalten*“ eines Systems definiert. Das RAMS-System ermöglicht eine quantitative als auch qualitative Beschreibung des Grades der spezifikationsgemäßen Funktionalität der Systeme, Subsysteme und Komponenten unter Einhaltung der RAMS-Bedingungen während allen Lebenszyklusphasen [4, S. 10]. Es werden Prozesse und Methoden angewandt, die es ermöglichen, potentielle Fehler schon in frühen Projektphasen zu erkennen und zu vermeiden.

Da Verlässlichkeit und Instandhaltbarkeit Systemeigenschaften sind, die sich nachträglich wirtschaftlich nicht mehr verwirklichen lassen, kommt der Planungsphase eine maßgebliche Rolle zu [5, S. 10]. Es ist von entscheidender Bedeutung die RAMS-Definition basierend auf möglichst genauen, empirisch ermittelten Werten zu erstellen, da die später erforderliche/gewünschte RAMS-Performance (Erfüllungsgrad der RAMS-Werte) und letztlich auch die Life Cycle Costs davon abhängen. Diese wichtigen Daten sollten aus der betriebsinternen Dokumentation des Systems, den Erfahrungen des täglichen Betriebes, sowie unter Einbeziehung der bekannten Risiken ermittelt werden. Unrealistische Anforderungen an das System im Bezug auf die Instandhaltungsintervalle würden unweigerlich zu enormen Anschaffungskosten führen, und somit auch die LCC vervielfachen. Es soll stets eine Ausgewogenheit zwischen Minimierung der Instandhaltungstätigkeiten und Minimierung der Anschaffungskosten angestrebt werden. Das Ziel ist nicht, das System so gut und sicher wie nur möglich auszustatten, sondern vielmehr so gut und sicher wie notwendig zu planen und herzustellen [5, S. 11].

Die Definition von RAMS-Zielen ermöglicht eine realistische Prognose der anfallenden Wartungszyklen und Störungen in jeder Lebenszyklusphase und stellt somit eine Methodik zur Abschätzung eines Systems dar, welche bei Neuanschaffungen und Änderungen in bestehenden Systemen am frühest möglichen Zeitpunkt angewandt werden sollte.

2.1.1 Normative Grundlagen - Die RAMS-Spezifikation

Grundlage für das RAMS-Programm ist die *DIN EN 50126:1999 – „Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)“*. Diese Norm geht auf die Besonderheiten des Bahnbetriebes ein, und ist sowohl für neue Systeme, für Änderungen an existierenden Systemen, als auch für neue Systeme, die in bestehende Systeme eingefügt werden, anwendbar [4, S. 6]. Nach CELENEC ist eine lückenlose Darstellung aller Handlungen über alle Lebenszyklusphasen eines Systems möglich [5, S. 10]. Es werden keine RAMS-Ziele festgelegt und auch keine quantitativen Größen angegeben, da Untersuchungsrahmen und Detaillierung an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden müssen [5, S. 10]. In Abschnitt 6 [4, S. 30 ff.] werden die Prozesse, Verifikationen und Validierungen der einzelnen Lebenszyklusphasen dargestellt, welche in der Praxis meist in Pflichten-Lasten-Heften festgehalten werden.

Es wird eine Betrachtung der RAMS in Verbindung mit den LCC nahegelegt [4, S. 21]. Die gleichzeitige Betrachtung von RAMS und LCC ist notwendig, da die Lebenszykluskosten, auch TCO (Total Cost of Ownership) genannt [6, S. 3], neben den Anschaffungs-, Entsorgungs- und Betriebskosten auch die Instandhaltungskosten umfassen, welche für die Einhaltung der RAMS aufgebracht werden müssen. Auf den folgenden Seiten werden die aus der Sicht des Autors für diese Arbeit relevanten Punkte dieser Norm dargestellt und erläutert.

2.1.2 RAMS für Bahnanlagen

Die Sicherstellung eines bestimmten Grades der Sicherheit, sowie die Aufrechterhaltung eines bestimmten Levels of Service für den Kunden, ist das oberste Ziel eines Bahnsystems [4, S. 10]. Fortschreitende Automatisierung und immer höher werdende Leistungsanforderungen bei der Bahn fordern verlässliche Systeme, was die Installation eines RAMS-Programms zu einer Notwendigkeit werden lässt [5, S. 14]. RAMS ist für alle Arten von Bahnanlagen gleichermaßen geeignet und ermöglicht dem Bahnunternehmen eine qualitative Steigerung sowohl im betrieblichen Bereich als auch im Dienstleistungsbereich. Neben RAMS wird die Qualität auch von anderen Faktoren,

welche auf die Funktionalität und Leistungsfähigkeit einen Einfluss haben, bestimmt. Als Beispiele seien hier die Regelmäßigkeit der Dienstleistung und die Tarifstruktur genannt. Die Anforderungen an Sicherheit und Verfügbarkeit sind nur dann zu erfüllen, wenn eine konstante Einhaltung und Überwachung der Zuverlässigkeits- und Instandhaltbarkeitsansprüche gegeben ist [4, S. 9 f.].

Die hierarchischen Zusammenhänge sind in Abbildung 2 veranschaulicht.

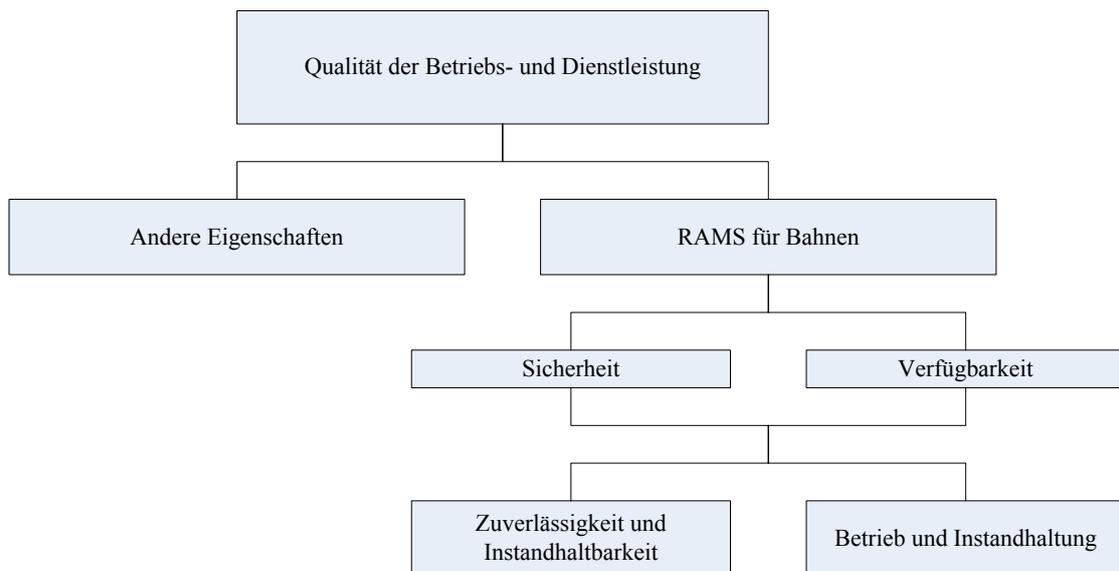


Abbildung 2: Zusammenhänge der RAMS-Elemente [4, S. 10]

Die Verwirklichung eines verlässlichen und sicheren Bahnsystems kann nur mit Kenntnis über die einzelnen RAMS-Elemente und deren Zusammenwirken innerhalb des Systems durchgeführt werden [4, S. 11].

Die Norm DIN EN 50126 [4, S. 12] definiert drei Arten von Faktoren, die RAMS beeinflussen:

- *Systembedingungen*: systematische Fehlerquellen, welche über die gesamte Lebensdauer des Systems auftreten können
- *Betriebsbedingungen*: Störeinflüsse während des Betriebes
- *Instandhaltungsbedingungen*: Störeinflüsse während der Instandhaltungsarbeiten

Die Identifizierung dieser Faktoren und deren Wirkung ist entscheidend um ein zuverlässiges System zu realisieren, und ihre Auswirkungen über die Lebensdauer zu

kontrollieren. Da Bahnanwendungen typischerweise einen großen Bereich von Personengruppen betreffen, und somit der Mensch potentiell einen großen Einfluss haben kann, fordert die Norm auch eine Analyse der menschlichen Einflussfaktoren im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die RAMS-Eigenschaften [4, S. 14].

In Abschnitt 5 der DIN EN 50126 [4, S. 21ff.] wird ein RAMS-Management-Prozess definiert, welcher die Beherrschung/Kontrolle der bahnspezifischen Faktoren ermöglicht. Auf Grundlage der Systemlebenszyklen werden durch diesen Prozess folgende Aktivitäten unterstützt:

- Definition der RAMS-Anforderungen in der Entwicklungsphase
- Identifizierung der negativen Einflüsse auf die RAMS-Eigenschaften und deren Vermeidung
- Planung und Implementierung der RAMS-Aktivitäten
- Nachweis der RAMS-Performance
- Begleitende Überwachung über den gesamten Lebenszyklus

Die Norm verlangt die genaue Zuordnung der Verantwortlichkeiten für die Phasen des Lebenszyklus. Eine typische Anordnung der Verantwortlichkeiten kann der DIN EN 50126 Anhang E [4, S. 60] entnommen werden.

2.1.3 Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit „R“ versteht man die Eigenschaft einer Einheit oder eines Systems eine spezifische, ihr/ihm zugeteilte Funktion über eine bestimmte Zeitspanne T unter den vorherrschenden Bedingungen zu erfüllen [4, S. 8].

Sie gibt somit die Wahrscheinlichkeit an, dass in einer Betrachtungseinheit während des Betrachtungszeitraums T kein Ausfall auftreten wird, der die geforderte Funktion beeinträchtigt. Der Ausfall eines redundanten Teiles ist somit ohne Einfluss auf die Zuverlässigkeit. Als Betrachtungseinheit wird eine beliebige Anordnung definiert, welche für Analysen als Einheit angesehen wird [7, S. 241]. Um die Zuverlässigkeit einer Einheit

angeben zu können, müssen neben dem numerischen Wert (zwischen 0 und 1) auch die Funktion, die Betriebsbedingungen, sowie die Dauer festgelegt werden [7, S. 9-10].

Die Angabe der Zuverlässigkeit erfolgt meistens in quantitativer Form durch die mittlere ausfallfreie Arbeitszeit MTBF (Mean Time Between Failures) bzw. MTTF (Mean Time To Failure). Beide Werte können auch analog auf die mittlere, ausfallfrei zurückgelegte Distanz bezogen, und dann mit MDBF (Mean Distance Between Failures) bzw. MDTF (Mean Distance To Failure) bezeichnet [4, S. 55] werden.

MTBF bzw. MDBF werden nur bei reparierbaren Betrachtungseinheiten angewandt und sind bei zeitunabhängiger Ausfallrate der reziproke Wert der Ausfallsrate λ [7, S. 6].

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

Versuche haben gezeigt, dass die Ausfallsrate statistisch identer Betrachtungseinheiten in drei charakteristische Phasen eingeteilt werden kann.

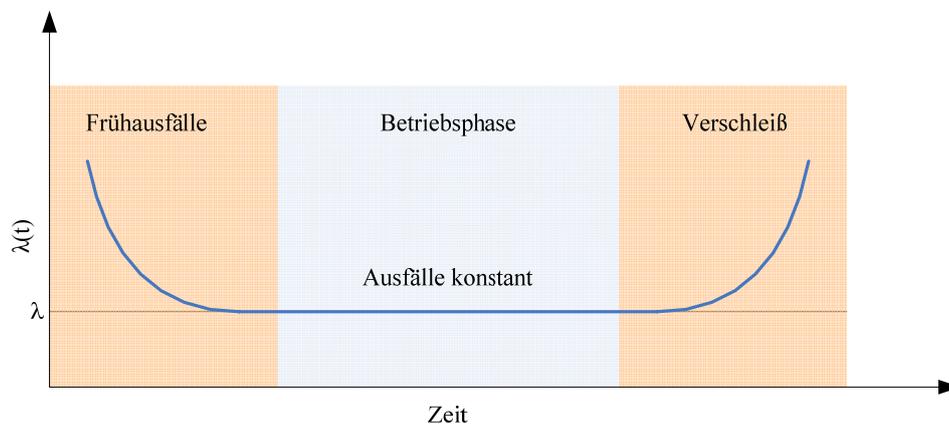


Abbildung 3: Badewannenkurve [7, S. 7]

Die erste Phase der Frühhausfälle zeichnet sich durch ein hohes, aber rasch abnehmendes $\lambda(t)$ aus, und ist auf Materialschwächen und Fertigungsungenauigkeiten zurückzuführen. Sie kann zwischen praktisch nicht vorhanden bis hin zu wenigen tausend Betriebsstunden andauern [5, S. 12]. Die Betriebsphase verläuft typischerweise mit näherungsweise

konstantem $\lambda(t)$, welches λ entspricht. In der Verschleißphase steigt die Ausfallrate mit der Betriebszeit immer steiler an. Die Ausfälle sind auf Ermüdung, Alterung und Verschleiß zurückzuführen [8, S. 24].

Der Verlauf der Ausfallrate über die Lebensdauer, auf Grund der Form auch Badewannenkurve genannt, ist in Abbildung 3 ersichtlich.

2.1.4 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit „A“ wird von Birolini [7, S. 8] als die Wahrscheinlichkeit definiert, *„dass die Betrachtungseinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen ausführt, unabhängig davon, ob sie bis zu diesem Zeitpunkt bereits ausgefallen ist oder nicht.“*

Die DIN EN 50126 [4, S. 11] setzt die Kenntnis folgender Punkte für die Erstellung eines technischen Konzeptes für die Verfügbarkeit eines Systems voraus:

- **Zuverlässigkeit:** Alle möglichen Ausfälle des Systems, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie deren Folgen auf die Funktionalität des Systems
- **Instandhaltbarkeit:** Die Dauer einer geplanten Instandhaltung. Die Zeit für das Finden und Lokalisieren eines Fehlers, sowie der Zeitraum zur Rekonstruktion der Funktionsbereitschaft bei einem unerwartetem Systemausfall
- **Betriebsführung und Instandhaltung:** Alle möglichen Betriebsarten und Instandhaltungstätigkeiten sowie den „Faktor Mensch“

Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung der Verfügbarkeit ist die möglichst exakte Definition der Übergänge zwischen Regelbetrieb (uneingeschränkte Funktionalität), Funktionsstörung (behinderte Funktionalität) und Ausfall.

In Tabelle 1 werden die drei nach DIN EN 50126 [4, S. 16] für die Instandhaltungstätigkeiten relevanten RAM-Ausfallkategorien beschrieben. Die Ausfallkategorien, deren Ursachen, und die Möglichkeiten ihrer Vermeidung werden im Abschnitt 2.1.5 behandelt.

	Definition	Charakteristik	Beispiel
Signifikant	Die Weiterfahrt des Zuges wird verhindert, und/oder es werden Kosten und/oder Verspätung verursacht die einen festgelegten Grenzwert überschreiten.	Betriebsstillstand	Entgleisung, Kollision
Kritisch	Der Ausfall muss behoben werden um die geforderte Leistung wiederherzustellen. Es werden keine Kosten und/oder Verspätung verursacht die einen festgelegten Grenzwert überschreiten.	betriebsrelevanter Ausfall	Instandhaltungsarbeiten, Signalausfall
Unkritisch	Die geforderte Leistung des Systems wird nicht beeinträchtigt und die Kriterien für die o.a. Kategorien werden nicht erfüllt.	komfort-einschränkend	Ausfall der Heizung, quietschende Bremsen

Tabelle 1: Ausfallkategorien nach DIN EN 50126 [4, S. 16]

Zur Ermittlung der Verfügbarkeit wird die Summe der Betriebszeiten MUT (Mean Up Time) der Summe der Stillzeiten MDT (Mean Down Time) gegenübergestellt. Die Berechnung der Verfügbarkeit ist sehr kompliziert, da neben der Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit auch menschliche Faktoren und das logistische Umfeld mit einbezogen werden müssen. Wenn man nun von einer Idealisierung der logistischen Unterstützung sowie der menschlichen Faktoren ausgeht, und somit die Verfügbarkeit als eine Funktion der Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit darstellt, konvergiert die Punkt-Verfügbarkeit im Falle eines Dauerbetriebs (Betriebsstillstand nur aufgrund von Reparaturarbeiten auf Ebene Betrachtungseinheit) gegen den Ausdruck

$$PA = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad \text{bzw.} \quad PA = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2)$$

wobei $MTTR$ (Mean Time To Repair) den Zeitraum vom Eintreten des Ausfalles bis zur Wiederinbetriebnahme bezeichnet. Unter logistischer Unterstützung werden jene Aktivitäten verstanden, deren Ziel es ist, eine funktionale und wirtschaftliche Verwendung einer Betrachtungseinheit während der Nutzungsphase zu ermöglichen [7, S. 8].

Nach Matyas [8, S. 5] hat die Logistik dafür zu sorgen, „*dass die richtigen Produkte in den richtigen Mengen im richtigen Zustand zu den richtigen Zeitpunkten auf möglichst wirtschaftliche Weise an den richtigen Ort gelangen*“. Bei der Instandsetzung von

Bahnanlagen zählen hierzu das Vorhalten von Ersatzteilen sowie die Gewährleistung der Verfügbarkeit von Arbeitskräften, Material und Maschinen bei unerwarteten Ausfällen.

Es ist ersichtlich, dass unter Dauerbetrieb die Down-Zeiten einen maßgeblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit haben und diese somit jene Stellgröße darstellen, mit welcher eine Steigerung der Verfügbarkeit erreicht werden kann. Eine Optimierung der Zeitspanne zwischen Ausfall und Wiederinbetriebnahme bzw. die Vermeidung von Down-Zeiten kann durch effiziente logistische Unterstützung sowie schnelle Ausfalllokalisierung und prozessorientierte System- und Gerätestrukturierung verwirklicht werden [5, S. 11].

2.1.5 Instandhaltbarkeit

Die Instandhaltbarkeit „M“ einer Betrachtungseinheit wird durch die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, dass der Zeitaufwand für eine Instandhaltungsmaßnahme, die unter *„definierten materiellen und personellen Bedingungen“* erfolgt, kleiner als eine gegebene Zeitspanne t ist [7, S. 7].

Wie schon in Abschnitt 2.1.4 erwähnt, wird der Mittelwert der Reparaturzeiten mit MTTR (Mean Time To Repair) oder MTTM (Mean Time To Maintain) angegeben. Der Mittelwert für die Zeiten für eine Wartung ist ein weiterer wichtiger Faktor und ist mit MTTPM (Mean Time To Preventive Maintenance) definiert. Das Zeitintervall zwischen zwei Instandhaltungstätigkeiten wird mit MTBM (Mean Time Between Maintenance), bzw. falls das Intervall auf die zurückgelegte Strecke bezogen wird, mit MDBM (Mean Distance Between Maintenance), bezeichnet. Da die Instandhaltbarkeit einen direkten Einfluss auf die Verfügbarkeit hat, muss sie in ein System durch ein Instandhaltungskonzept während der Entwicklungsphase hineinentwickelt, und nach der geforderten Verfügbarkeit ausgerichtet werden. Die Instandhaltbarkeit im Betrieb hängt auch von der Organisation des Systems sowie der Organisation, Ausrüstung und Ausbildung des Instandhaltungspersonals ab. Sie erlangt aufgrund der starken Zunahme der Instandhaltungskosten der immer komplexer werdenden Systeme immer mehr an Bedeutung [7, S. 7].

Die Wahl einer geeigneten Instandhaltungsstrategie ist entscheidend und wird in Abschnitt 2.2.2 erläutert.

2.1.6 Sicherheit

Die Sicherheit „S“ bezeichnet die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, *„weder Menschen, Sachen noch Umwelt zu gefährden“* [7, S. 8] sowie auch *„das Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadensrisikos“* [4, S. 9].

Bei der Untersuchung muss zwischen der Sicherheit bei korrekt funktionierender Betrachtungseinheit und der Sicherheit bei teilweise oder komplett ausgefallener Betrachtungseinheit unterschieden werden. Der erste Aspekt wird durch die Unfallverhütung abgedeckt, welche, über den durch die gesetzlichen Vorschriften geregelten Rahmen hinausgehend, als sicherheitspolitische Maßnahme angesehen werden kann [7, S. 8 f.].

In einfachen Systemen wird das seit Anbeginn der Eisenbahn erfolgreich angewandte **„Fail-Safe-Konzept“** verwendet, um im Falle eines Ausfalls die Anwendung in einen sicheren Zustand zu bringen. Da bei komplexeren Systemen die Anzahl der möglichen Ausfallkombinationen zu hoch wird, ist die deterministische Vorgehensweise nicht mehr praktikabel und es kommen probabilistische Methoden zum Einsatz [4, S. 21].

Der zweite Aspekt ist als technische Sicherheit definiert und muss unter Berücksichtigung möglicher äußerer Einflüsse (Katastrophe, Sabotage usw.) mit den Methoden der Zuverlässigkeitstheorie untersucht werden (**„Safety Integrity Konzept“**). Safety Integrity definiert die Wahrscheinlichkeit, *„dass ein System die festgelegten Sicherheitsanforderungen unter allen festgelegten Bedingungen innerhalb einer definierten Zeitspanne erfüllt“* [4, S. 9].

Die Wechselwirkungen zwischen den RAMS-Elementen sind stets zu beachten. Eine Erhöhung der Sicherheit (z.B. eine automatische Stilllegung einer Anlage bei Gefahrenmeldung) kann zu einem RAMS-Konflikt führen und infolgedessen eine Verschlechterung der Zuverlässigkeit oder der Verfügbarkeit verursachen [7, S. 9].

Während alle Ausfälle negativ auf die Zuverlässigkeit des Systems einwirken, werden nur spezifische Ausfälle negative Auswirkungen auf die Sicherheit haben. Die Begriffe Risiko und Risikoakzeptanz sind nach Birolini [7, S. 9] eng mit der technischen Sicherheit verknüpft.

Die DIN EN 50126 [4, S. 11] setzt die Kenntnis folgender Punkte für die Erstellung eines technischen Konzeptes für die Sicherheit eines Systems voraus:

- Alle möglichen Gefahrenzustände des Systems in allen Betriebs- und Instandhaltungszuständen sowie die Schwere ihrer Konsequenzen
- Alle Ausfälle und Ausfallkombinationen die einen Gefahrenzustand herbeiführen, sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Leichtigkeit mit der sicherheitsrelevante Teile instandgehalten werden können
- Zeit für die Wiederherstellung eines sicheren Zustandes
- „Faktor Mensch“ bei Bau und Instandhaltung von sicherheitsrelevanten Teilen

In Abschnitt 4.6 der Norm [4, S. 17 ff.] werden im Rahmen der Risikoanalyse die Gefahrenzustände zufolge ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten exemplarisch in sechs Kategorien von „häufig“ bis „unvorstellbar“ eingeteilt. Mittels einer Konsequenzen-Analyse werden die möglichen Auswirkungen der Gefahrenzustände abgeschätzt. Es wird eine Einteilung der Gefahrenstufen von „katastrophal“ bis „unbedeutend“, inkl. der zugehörigen Konsequenzen für Personen oder Umwelt, zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe einer „Häufigkeit-Konsequenz“-Matrix kann einem spezifischen Gefahrenzustand eine Risikokategorie zugeteilt werden, welche die Grundlage für Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung sowie für die Akzeptanz von Risiken darstellt.

Für die Bewertung der Akzeptanz von Risiken stehen diverse Methoden zur Verfügung. Nachfolgend werden die in der Norm [4, S. 18] angeführten Beispiele kurz erläutert.

- Das **ALARP-Prinzip** (As Low As Reasonably Practicable – so niedrig wie vernünftigerweise ausführbar) wird in Großbritannien verwendet und basiert darauf, dass Risiken im ALARP-Bereich nur dann für zulässig erklärt werden, wenn eine Minderung unmöglich ist bzw. die anfallenden Kosten in keiner Relation zur erzielten Verbesserung stehen.
- Das **GAMAB-Prinzip** (Globalement Au Moins Aussi Bon – global mindestens genauso gut) wird vor allem in Frankreich verwendet und berücksichtigt alles, was bereits unternommen wurde, und fordert mit „mindestens“ indirekt eine Weiterentwicklung des Sicherheits-Levels.

- Das **MEM-Prinzip** (Minimum Endogenous Mortality – minimale endogene Sterblichkeit) wird gelegentlich in Deutschland angewandt und besagt, dass die Gefahren, die auf ein neues System zurückzuführen sind, die MEM nicht nennenswert erhöhen.

Das in Tabelle 2 veranschaulichte Beispiel einer Risikobewertung und Risikominderung für die Akzeptanz von Risiken ist der Norm [4, S. 19] entnommen.

Häufigkeit eines Gefahrenfalles	Gefahrenstufen			
	unbedeutend	marginal	kritisch	katastrophal
häufig	unerwünscht	intolerabel	intolerabel	intolerabel
wahrscheinlich	tolerabel	unerwünscht	intolerabel	intolerabel
gelegentlich	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht	intolerabel
selten	vernachlässigbar	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht
unwahrscheinlich	vernachlässigbar	vernachlässigbar	tolerabel	tolerabel
unvorstellbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar

Risikokategorien

intolerabel

unerwünscht

tolerabel

vernachlässigbar

Risikominderung/ -überwachung

muss ausgeschlossen werden

darf unter Zustimmung der Aufsichtsbehörde akzeptiert werden, wenn praktisch keine Risikominderung durchführbar ist

akzeptierbar bei geeigneter Überwachung

akzeptierbar ohne Zustimmung der Aufsichtsbehörde

Tabelle 2: Beispiel einer Risikobewertung [4, S. 19]

2.2 Instandhaltung

Nach DIN 31051 [9, S. 3] wird die Instandhaltung als „*Gesamtheit der Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes, sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes*“ definiert und in die vier Grundmaßnahmen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung gegliedert.

Unter **Inspektion** werden alle Maßnahmen verstanden, „*die zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit, einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung (...)*“ [9, S. 3], durchgeführt werden. Die Inspektion sollte stets unter konstanten Betriebsbedingungen durchgeführt werden, und einen ständigen Soll/Ist-Vergleich ermöglichen [8, S. 17].

Der Begriff **Wartung** definiert alle „*Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes von technischen Einrichtungen und Systemen*“ [8, S. 16] sowie „*alle Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats*“ [9, S. 3]. Korrekte Wartung durch Reinigung, Schmierung, Nachstellung, usw. ermöglicht es, die Lebensdauer eines Systems entscheidend zu verlängern.

Als **Instandsetzung** werden Maßnahmen bezeichnet, die zur *Wiederherstellung des Sollzustandes* [8, S. 16] bzw. zur *Rückführung der Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand, mit Ausnahme von Verbesserungen* [9, S. 4], führen. Instandsetzungsmaßnahmen können in die zwei Teilmaßnahmen *Ausbessern* (Instandsetzen durch Bearbeiten) und *Austauschen* (Instandsetzung durch Ersetzen) gegliedert werden. Ebenfalls zu unterscheiden sind geplante und unvorhergesehene Instandsetzung. Erstere wird auf Basis von Erfahrungswerten intervallmäßig oder zustandsabhängig durchgeführt, um Ausfälle zu verhindern, und ist in Zeit, Art und Umfang genau definiert. Bei der unvorhergesehenen Instandsetzung ist weder Art, Zeitpunkt noch Umfang bekannt [8, S. 21].

Verbesserung wird durch die DIN 31051 [9, S. 4] als „*die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements*“ definiert, „*die zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern*“, durchgeführt werden.

Die Aufgaben der Instandhaltung sind neben der „Sicherstellung einer möglichst langen Lebensdauer der Anlagen“ auch die „Gewährleistung einer hohen technischen Verfügbarkeit“ [8, S. 13]. Die Stillstandzeiten müssen möglichst minimiert, und deren Einfluss auf den laufenden Betrieb gering gehalten werden. Die reibungslose Versorgung mit Ersatzteilen, welche für die Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit evident ist, ist ebenfalls als Teil der Instandhaltung zu sehen [8, S. 13]. Ausfälle von einzelnen, redundanten Systemen wirken sich zwar nicht direkt auf den Betrieb aus, es wird jedoch mit längeren Wiederherstellungszeiten die Wahrscheinlichkeit eines Zweitfehlers, welcher zum Ausfall der Funktionseinheit führt, erhöht [10, S. 30].

Aufgrund der steigenden Komplexität der Anlagen und deren Automatisierung wurde die Instandhaltung in den letzten Jahrzehnten ein immer wichtigerer Kostenfaktor, und der Trend hält weiter an [8, S. 10]. Nach Oster und Scharner [10, S. 31] kann die Instandhaltung als Haupt-Kostentreiber der LCC im Bahnbetrieb angesehen werden, weshalb der Einsatz der zur Verfügung stehenden Ressourcen in technischer und wirtschaftlicher Weise zu optimieren ist.

2.2.1 Ziele der Instandhaltung

Matyas [8, S. 14] nennt mit „Zuverlässigkeits- und Sicherheitsmaximierung“ und „Kostenminimierung bzw. Gewinnmaximierung“ die zwei Hauptziele der Instandhaltung. Er definiert, dass die Instandhaltung, ebenso wie alle anderen Unternehmensbereiche, zur Minimierung der betrieblichen Gesamtkosten beitragen muss. Eine Vergrößerung der Instandhaltungsintervalle ermöglicht zwar einerseits die Verringerung der Kosten, die unvorhergesehene Behebung der dadurch entstehenden zusätzlichen Ausfälle ist jedoch wiederum kostenintensiv. Es ist also notwendig, mit Hilfe einer geeigneten Instandhaltungsstrategie, ein Optimum zwischen den Kosten der vorbeugenden Instandhaltung und den Kosten von Ausfällen (unter Berücksichtigung von Qualität, Kundenakzeptanz, usw.) zu finden. Diese Instandhaltungsstrategien müssen dem jeweiligen Ausfallverhalten angepasst werden [8, S. 13 f.].

Der charakteristische Verlauf der Ausfallrate über die Betriebszeit ist in Abschnitt 2.1.3 - Abbildung 3 (Seite 6) dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Frühausfällen aufgrund von Material- und Fertigungsfehlern kann mit einer Vorbelastung bzw. einer Testphase (Environmental Stress Screening) vermindert werden [5, S. 12]. Diese Art von Ausfällen ist für die Instandhaltung wenig relevant. Die in der Betriebsphase auftretenden Zufallsausfälle, die durch Zusammenwirken nicht bekannter Einzelursachen entstehen, können nur durch eine zustandsabhängige Instandhaltung verhindert werden. Dies ist jedoch auch nur dann möglich, *„wenn die Zustandsverschlechterung durch Inspektion und Diagnose rechtzeitig erkannt wird, und sich so langsam ausbreitet, dass noch Zeit für die entsprechenden Maßnahmen bleibt“* [8, S. 24].

Bei den o.g. Ausfällen führt eine vorbeugende Instandhaltung nicht zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit, sondern steigert lediglich die Instandsetzungskosten. Die in der Verschleißphase auftretenden Altersausfälle können durch vorbeugende Instandhaltung verhindert werden, falls die Ausfallursachen bekannt sind. Es müssen jedoch immer die Kosten der vorbeugenden Instandsetzung den Kosten eines Ausfalls inkl. seiner Behebung gegenübergestellt werden, um eine Kostenoptimierung zu garantieren [8, S. 24 ff.].

2.2.2 Instandhaltungsstrategien

„Instandhaltungsstrategien sind Regeln, die angeben, zu welchen Zeitpunkten welche Aktionen an welchen Aggregaten bzw. Bauteilen vorgenommen werden sollen“ [8, S. 100]. Um maximale Verfügbarkeit der Anlagen und gleichzeitig minimale Kosten der Produktion und Instandhaltung zu erreichen, wurden viele Strategien entwickelt, um den optimalen Zeitpunkt der Inspektions-, Wartungs-, und Instandsetzungsmaßnahmen zu ermitteln. Die Wahl einer geeigneten Instandhaltungsstrategie ist letztendlich Sache des einzelnen Unternehmens [11, S. 13], wobei oft verschiedene Strategien für die Gesamtheit aller technischen Komponenten angewandt werden [8, S. 100].

Neben umfangreichen Analysen gibt Matyas [8, S. 110] weitere Zielgrößen an, welche in Abhängigkeit von der Art der Anlage für die Optimierung der Instandhaltungsstrategien entscheidend sein können.

- Die **Minimierung der Stillstandzeit** ist für hochproduktive und annähernd unter Dauerbelastung stehende Anlagen von entscheidender Bedeutung.

- Eine **Maximierung der Dauerverfügbarkeit** wird durch ein Instandsetzungsintervall erreicht, welches zu minimalen instandsetzungsbedingten Stillstandzeiten führt.
- Die **geringste Anzahl von Instandhaltungsmaßnahmen** ist für Systeme entscheidend, die sich durch einen kontinuierlich ablaufenden Prozess auszeichnen, bei dem durch Stilllegung und Wiederinbetriebnahme große zusätzliche Aufwendungen erforderlich sind.
- Die **Minimierung des Arbeitszeitaufwands für die Instandhaltung**, gleichbedeutend mit der Maximierung der Betriebsdauer zwischen zwei geplanten Instandhaltungen, ist dort anzuwenden, wo die Kapazitäten für andere Zielgrößen nicht vorhanden sind.
- **Optimierung der Intervalle** der vorbeugenden Instandhaltung um die Instandhaltungskosten zu minimieren.
- Die **Minimierung der Gesamtkosten** als wichtigste Zielgröße des Instandhaltungsprozesses.

Die vier grundlegenden Strategien werden in Abbildung 4 dargestellt und anschließend erläutert. Auf das TPM-System (Total Productive Maintenance) wird nicht gesondert eingegangen und auf weiterführende Literatur [8, S. 129 ff.] verwiesen.

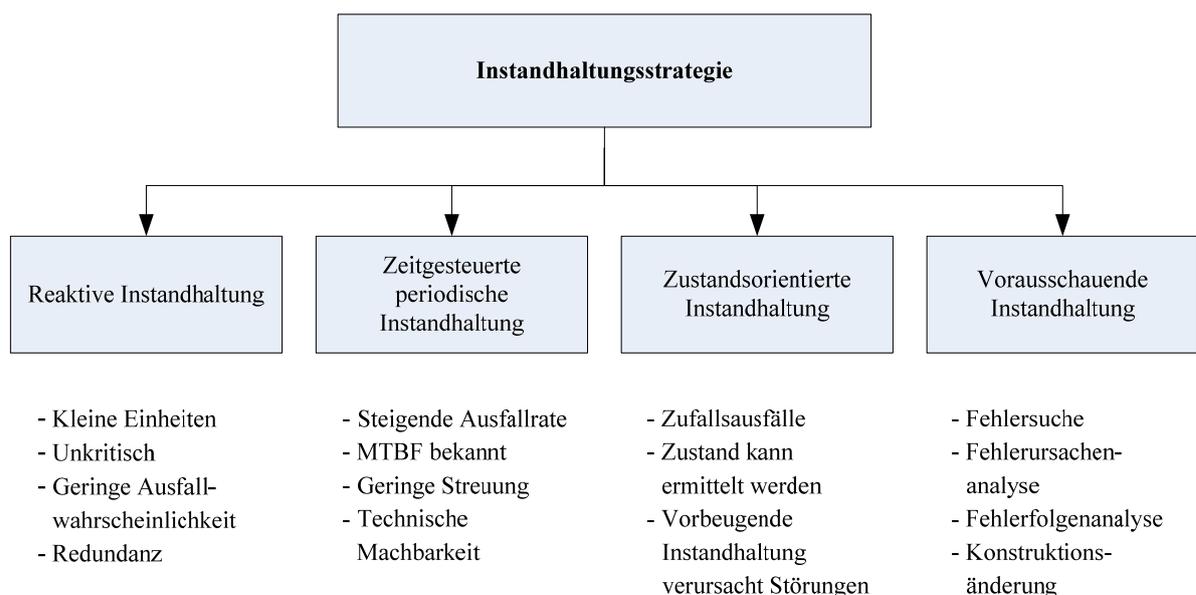


Abbildung 4: Instandhaltungsstrategien [11, S. 13]

2.2.2.1 Ausfallbehebung

Diese Strategie wird in der Literatur auch als „*ausfallorientierte Instandhaltung*“ bzw. „*reaktive Instandhaltung*“ [8, S. 101] bezeichnet. Die Betriebsdauer der Anlagen wird bei dieser Methode zu 100% ausgeschöpft, da sie ohne Instandhaltungsaktionen bis zum Ausfall betrieben wird. Es erfolgt keine Inspektion oder Wartung. Da der Betreiber somit keinen Einfluss auf den Zeitpunkt des Schadenfalls hat, ist eine Planung der Instandsetzung unmöglich. Jeder Ausfall erfolgt zufällig und erzeugt durch mangelnde Vorbereitung deutlich längere Stillstandzeiten als dies bei geplanten Instandhaltungsmaßnahmen der Fall ist. Dieses Konzept kann nur dann sinnvoll angewandt werden, wenn die „*betreffenden Maschinen entweder redundant vorhanden, oder für den Produktionsprozess von untergeordneter Bedeutung sind*“ [11, S. 14].

Ein verbreiteter Anwendungsbereich dieser Strategie sind Kleinmaschinen von geringem Wert, deren Instandsetzung im Vergleich zu den Ausfallfolgekosten unwirtschaftlich wäre [8, S. 101 ff.].

2.2.2.2 Zeitgesteuerte periodische Instandhaltung

Unter der auch als **präventiver Instandhaltung** bekannten Strategie versteht man das Festlegen bestimmter Intervalle von Instandhaltungsmaßnahmen zur Vermeidung von Ausfällen. Nach Erreichen eines bestimmten Alters eines Bauteils wird dieser, unabhängig vom Ist-Zustand, überholt bzw. ausgetauscht. Sie kommt dann zur Anwendung, wenn die Lebensdauer und das Ausfallverhalten der Komponente ungefähr bekannt sind, oder wenn ein Ausfall ein Sicherheits- oder Umweltrisiko darstellt [11, S. 14].

Um eine optimale Ausnutzung der Anlagenteile zu gewährleisten, ist die Anpassung der Intervalle an den Abnutzungsvorrat des Elements entscheidend, um dieses erst kurz vor dem Ausfall austauschen zu können, ohne dessen Nutzungsvorrat zu verschwenden. Da die Betriebszeiten bis zum Schadensfall aber eine Streuung aufweisen, muss das Intervall auf die minimale Lebensdauer des Elements abgestimmt werden, um die Möglichkeit eines Ausfalls und dessen Folgen für andere Teile bzw. den Betrieb zu verhindern [8, S. 169]. Aufgrund des hohen Instandhaltungsaufwandes kann diese Strategie nur bei Systemen

angewandt werden, deren Ausfallkosten die Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen bei weitem übersteigen. Obwohl die geplanten Instandhaltungsaktionen aufgrund des geringeren Zeitaufwands billiger sind, ist diese Methode meist unwirtschaftlich, da Anlagenteile vor dem Erreichen ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden.

2.2.2.3 Zustandsorientierte Instandhaltung

Ziel ist es, die bei der präventiven Instandhaltung erläuterte Problematik bei der Definition der Instandhaltungsintervalle, und der damit verbundenen Unwirtschaftlichkeit in Bezug auf den Nutzungsvorrat, zu entgehen. Die Instandhaltungsmaßnahmen bei der zustandsorientierten Instandhaltung orientieren sich möglichst genau am **tatsächlichen Istzustand** des betrachteten Systems. Die konstante Ermittlung des Abnutzungszustandes wird durch geeignete Überwachungseinrichtungen und Diagnoseprogramme realisiert, welche Abweichungen von der geforderten Leistungsfähigkeit erfassen.

Nach Matyas [8, S. 193] kann davon ausgegangen werden, „*dass die meisten Ausfälle nicht schlagartig auftreten, sondern sich über einen gewissen Zeitraum entwickeln und sich durch bestimmte Warnsignale ankündigen. Diese Signale werden potentielle Störungen genannt.*“

In Abbildung 5 ist eine sogenannte PF-Kurve dargestellt. Es werden die Verminderung des Nutzungsvorrats sowie die für die zustandsabhängige Instandhaltung wesentlichen Punkte P (potentielle Störung) und F (Ausfall) visualisiert. Der Beginn der Ausbildung einer Störung ist meistens unbekannt. In Punkt P wird die potentielle Störung durch die zustandsbedingten Maßnahmen (Diagnosesysteme) erfasst und es können Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden, um zu verhindern, dass aus der potentiellen eine effektive Störung wird (gestrichelte Linie). Die Zeitspanne zwischen P und F wird als Vorwarnzeit definiert und gibt jene Zeitreserve an, die zur Durchführung von Gegenmaßnahmen zu Verfügung steht, um eine Funktionsstörung zu verhindern. Die Schwierigkeit bei dieser Strategie besteht darin, die Störungen möglichst früh zu erkennen und damit die Vorwarnzeit zu maximieren [8, S. 193].

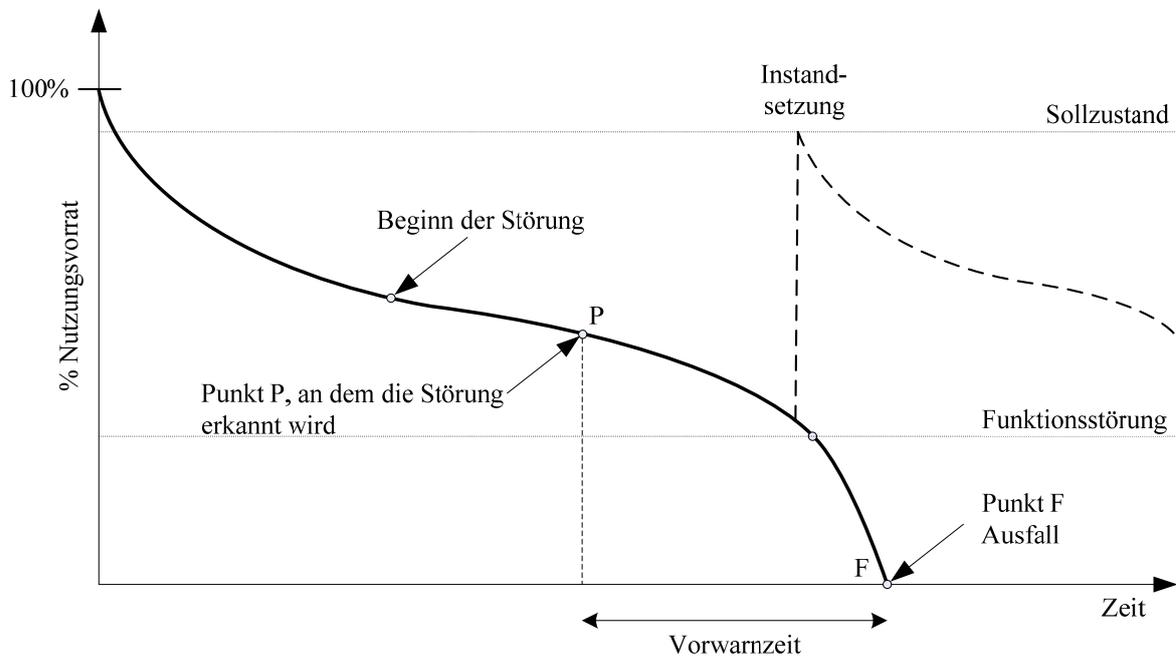


Abbildung 5: Verminderung des Nutzungsvorrats; PF-Kurve [8, S. 17,193]

2.2.2.4 Vorausschauende Instandhaltung

Da verdeckte Störungen von Diagnosesystemen nicht erfasst werden können, stößt die zustandsorientierte Instandhaltung dort an ihre Grenzen. Die Wahrscheinlichkeit eines eventuell vorhandenen Umwelt- bzw. Sicherheitsrisikos muss jedoch mittels einer geeigneten Strategie auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Die vorausschauende Instandhaltung versucht Störungen vor ihrem Eintritt zu verhindern. Es muss jedoch bei jeder vorausschauenden Instandhaltungsmaßnahme die technische Machbarkeit und die Kosteneffizienz geprüft werden [11, S. 15].

Mit der allgemein anwendbaren Methode **RCM** (Reliability-centred Maintenance) hat John Moubray [12, S. 19] einen zuverlässigkeitsorientierten Prozess vorgestellt, der bestimmt, „was getan werden muss, um sicherzustellen, dass eine beliebige materielle Komponente weiterhin ihre vorgesehene Funktion erfüllt unter den gegebenen Betriebsbedingungen.“

Durch die Beantwortung der folgenden sieben Grundfragen des RCM-Verfahrens erfolgt eine Analyse jeder Komponente eines Systems [12, S. 20].

- Welche Funktionen und damit verbundenen Leistungsnormen gibt es für die Anlagenkomponente unter Berücksichtigung der momentanen Betriebsbedingungen?
- Wie versagt eine Anlagenkomponente bei der Ausführung ihrer Funktion?
- Welche Ursachen hat die Funktionsstörung?
- Was geschieht, wenn die Anlagenkomponente versagt?
- Auf welche Weise stört das Versagen?
- Was kann getan werden, um der Störung vorzubeugen?
- Was sollte unternommen werden, wenn keine annehmbare vorbeugende Lösung gefunden werden kann?

Nach der Analyse der möglichen Störungsarten und deren Ursachen müssen die Störungsfolgen untersucht werden, um zu entscheiden, welcher Aufwand für die Ursachenforschung gerechtfertigt ist. Im Falle einer schwerwiegenden Folge müssen auch bei sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit intensive Nachforschungen eingeleitet werden. Mit Hilfe dieser Daten kann nun jede Störung entsprechend eingestuft, und wenn überhaupt erforderlich, den passenden Instandhaltungsaktivitäten zugeteilt werden. Es entsteht ein individueller Mix der verschiedenen Instandhaltungskonzepte [11, S. 16].

Ist es nicht möglich in diesem Entscheidungsprozess eine geeignete Instandhaltungs-Strategie für eine Komponente zu finden (z.B. Diagnose technisch nicht machbar, zu kostenintensiv, MTBF nicht bekannt) stellen die Installation einer redundanten Parallelanlage bzw. die konstruktive Änderung der betreffenden Komponente weitere Optionen dar [12, S. 187 ff.].

2.3 Life Cycle Costing

Die Betrachtung der Lebenszykluskosten (LCC) eines Produktes oder einer Anlage stellt eine betriebswirtschaftliche Methodik dar, die Gesamtheit aller Kosten von Beschaffung, über Benutzung, bis hin zur Außerbetriebnahme zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Analyse liefern sowohl dem Hersteller als auch dem Benutzer/Betreiber wichtige Eingabedaten. Auf der Herstellerseite können aufgrund der gewonnenen Daten Entwürfe hinsichtlich der Kosten optimiert und weiterentwickelt werden. Durch die Identifikation von sogenannten Kostentreibern (LCC-Elementen mit maßgeblichem Einfluss auf die Lebenszykluskosten [3, S. 4]) können durch Konstruktionsänderungen kostenwirksame Verbesserungen erzielt werden. Für den Betreiber stellen die LCC-Ergebnisse eine fundierte Grundlage zur Bewertung von Alternativen dar, und ermöglichen somit eine langfristige Kostenoptimierung [3, S. 5].

Die Effizienz dieses Optimierungsprozesses hängt vom Beginn der LCC-Betrachtung ab. Um die Kosten des gesamten Lebenszyklus einbeziehen zu können, sollte die Untersuchung wenn möglich schon in den frühen Entwurfsphasen des Produktlebens eingebunden werden. Entwurfsentscheidungen, sowie Anforderungsprofile an Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) in den frühen Phasen bestimmen den Kostenverlauf über die gesamte Lebensdauer maßgeblich.

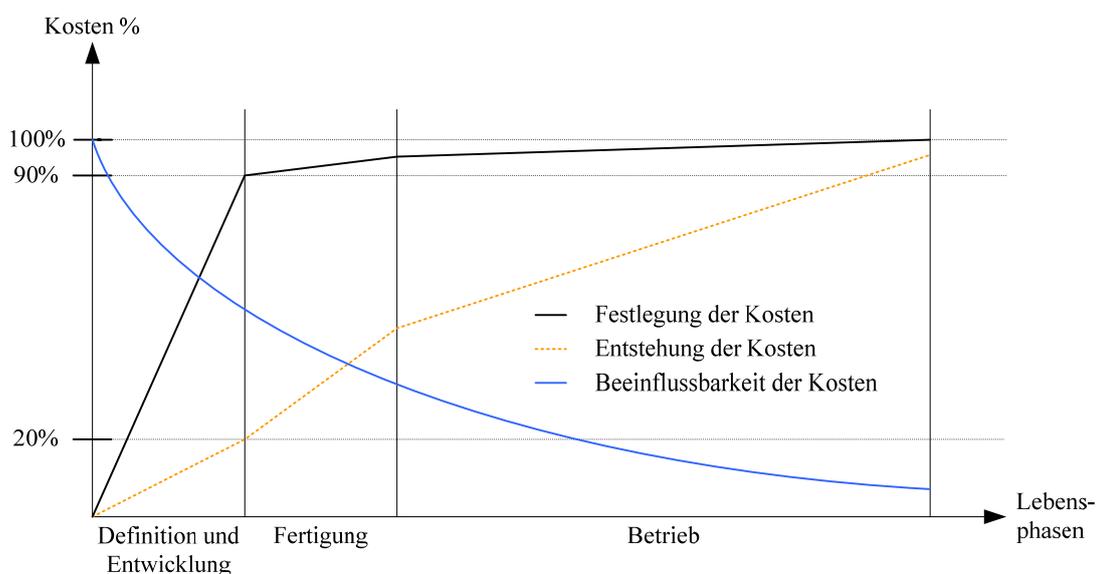


Abbildung 6: Festlegung, Entstehung und Beeinflussbarkeit der Kosten [13, S. 22, 123]

In Abbildung 6 ist der Zusammenhang zwischen Festlegung, Entstehung und Beeinflussbarkeit der Kosten dargestellt. Es ist evident, dass Änderungen in der Entwurfsphase einfacher durchzuführen sind und größere Auswirkungen auf die LCC haben können, als solche in späteren Lebenszyklen, bei denen die Leichtigkeit der Änderung eventuell nicht mehr gegeben ist [13, S. 123]. Mehr als die Hälfte der Gesamtkosten werden mit der Grobplanung festgelegt. Nach der genaueren **Definition und Entwicklung** sind bereits **bis zu 90% der späteren Kosten determiniert** [14, S. 169].

Nach Wübbenhorst [13, S. 121 ff.] liegt die charakteristische Problematik des Life Cycle Costings im Wissensdefizit zu den entscheidenden Zeitpunkten. Die Informationen über Kosten, Leistung und Lebensdauer eines Produkts sind in der Anfangsphase unvollständig, *„mithin genau dann, wenn die Entscheidungen mit den weitreichendsten Konsequenzen fallen“* [13, S. 122].

2.3.1 Normative Grundlagen

Die Grundlagen für die Betrachtung der Lebenszykluskosten werden in der DIN IEC 60300-3-3:1999-03 *„Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3: Anwendungsleitfaden – Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten“* [3] definiert. Die Norm ist sowohl für Benutzer als auch für Hersteller von Produkten oder Produktsystemen geeignet und gibt neben Zweck und Nutzen der LCC-Analyse auch die allgemeine Vorgehensweise an. Die Norm stellt mit Anhang A [3, S. 14 f.] eine Liste mit typischen kostenverursachende Tätigkeiten in den Lebenszyklusphasen eines Produktsystems zur Verfügung. In Annex D [3, S. 53 ff.] wird die Gliederung der Kostenelemente noch weiter detailliert und in Annex E [3, S. 61 ff.] wird ein exemplarisches Beispiel anhand eines Eisenbahnfahrzeugs veranschaulicht.

Es werden in den folgenden Abschnitten die für den Autor in Bezug auf diese Arbeit relevanten Überlegungen und Herangehensweisen zur Methodik des Life Cycle Costings dargestellt.

2.3.2 Phasen des Lebenszyklus

Das Lebenszyklusmodell beruht nach Wübbenhorst [13, S. 50 zitiert nach Pinnekamp] im Prinzip auf der Annahme, dass Produkte und Systeme, ähnlich wie natürliche Organismen, „*einem Gesetz des Werdens und Vergehens unterliegen, und dabei bestimmte Entwicklungsstadien durchlaufen.*“

Für die LCC-Analyse ist die technische und nicht die bilanztechnische Lebensdauer entscheidend [15, S. 23]. Es ist wesentlich, die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus, sowie die zu diesen Phasen zugehörigen Tätigkeiten und deren Zusammenwirken mit den RAMS-Merkmalen, zu kennen [3, S. 5].

Wenn bei der Untersuchung vom Einkauf eines fertigen Produktes zu fixen Preisen ausgegangen wird, ist es zweckmäßig eine Einteilung des Lebenszyklus in drei Phasen vorzunehmen (z.B. Beschaffung und Inbetriebnahme, Betrieb und Unterhaltung, Außerbetriebnahme und Entsorgung [16, S. 21]). Für LCC-Analysen, welche im Rahmen einer Produktentwicklung durchgeführt werden, müssen die Beschaffungskosten weiter zerlegt werden, um die gewünschte Kostentransparenz zu erreichen [16, S. 21]. Die DIN EN 60300-2:2004-10 [17, S. 33 f.] definiert sechs Hauptphasen im Lebenszyklus eines neuen Produkts:



Abbildung 7: Phasen im Lebenszyklus eines Produktes [17, S. 33 f.]

Bei der Betrachtung eines Produkts oder Produktsystems können die Kosten im Wesentlichen in die drei Kostengruppen Beschaffungskosten, Besitzkosten und Entsorgungskosten unterteilt werden.

$$\text{LCC} = \text{Kosten}_{\text{Beschaffung}} + \text{Kosten}_{\text{Besitz}} + \text{Kosten}_{\text{Entsorgung}} \quad (3)$$

Die Beschaffungskosten, resp. die Einstandskosten (Beschaffung inkl. Einbau [18, S. 76]), fallen im Allgemeinen in den ersten vier Lebenszyklusphasen an, und sind vor einer

Entscheidung unmittelbar zu bewerten. Die Schwierigkeit liegt in der Abschätzung der anfallenden Nutzungskosten in den letzten drei Phasen des Lebenszyklus, die in manchen Fällen einen Hauptanteil der LCC ausmachen können [3, S. 5 f.].

Eine LCC-Analyse kann in jeder Phase bzw. für eine beliebige Anzahl von Phasen durchgeführt werden. Eine frühe Untersuchung ermöglicht die RAMS-Zielgrößen auf Grundlage der LCC-Ergebnisse zu überprüfen bzw. anzupassen. Eine spätere Analyse hat auf die Entscheidungen aus früheren Phasen keinen Einfluss mehr und die Flexibilität des Produkts im Hinblick auf korrektive Maßnahmen nimmt immer weiter ab [3, S. 6].

Es kann jedoch auch von Interesse sein, bestimmte Lebensphasen bzw. spezifische Tätigkeiten während einer Lebensphase gesondert mittels einer LCC-Analyse zu untersuchen. Da aber nur ein Teil der Kosten in die Untersuchung einfließt, ist eine Optimierung der Gesamt-LCC des Produktes auf diese Weise nicht möglich [3, S. 6].

Um verschiedene Instandhaltungsstrategien für ein Produkt zu vergleichen ist es beispielsweise ausreichend die Kostenunterschiede in der Betriebsphase (inkl. einer eventuellen Verlängerung der Lebensdauer) des Produkts zu betrachten. Auf Basis dieser Differenz-LCC kann die Instandhaltungsstrategie mit den geringsten Kosten detektiert werden [16, S. 21 f.].

2.3.3 Das LCC – Modell

Modelle sind stets vereinfachte Wiedergaben der Realität, welche für die verschiedensten Szenarien Anwendung finden. Ein LCC-Modell sollte, um realistisch zu sein, nach DIN IEC 60300-3-3 [3, S. 8] folgende Anforderungen erfüllen:

- die Merkmale des zu analysierenden Produkts inkl. der Umgebung, der Strategie zur Instandhaltung und des Betriebs, sowie alle anderen einschränkenden Randbedingungen enthalten
- umfassend genug sein, um alle für die LCC-Analyse wichtigen Daten zu enthalten
- einfach, leicht verständlich und bei Entscheidungen rechtzeitig einsetzbar sein
- eine spezifische Bewertung eines einzelnen Kostenelements zulassen

Die Kosten- und Produktstruktur des LCC-Modells muss die Wirklichkeit in jener Detaillierung wiedergeben, die für die Analyse notwendig ist. Bei der Durchführung einer Differenz-LCC-Analyse kann durch Vernachlässigung jener Elemente, die bei allen zu vergleichenden Produkten oder Systemen identisch sind, eine enorme Vereinfachung des Prozesses erreicht werden [16, S. 26].

Um das Verhalten einer Produktstruktur unter spezifischen Bedingungen in befriedigender Art und Weise prognostizieren zu können, ist die Identifikation der kostenrelevanten **Ursache-Wirkungszusammenhänge** in einem LCC-Modell unerlässlich. Historische Daten und Kosten von vergleichbaren Produkten können, sofern sie verfügbar sind, eine wichtige Grundlage für diese Prognosen darstellen.

Diese Datenerhebung stellt bei langlebigen Systemen oft ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar [19, S. 25], und ist vielfach aus folgenden Gründen nicht möglich [16, S. 26]:

- Aufgrund fehlender Langzeiterfahrung gibt es keine Informationen über das Verhalten des Produkts bzw. der Produktstruktur unter Betriebsbedingungen.
- Aufgrund mangelnder Dokumentation und Pflege der Daten ist die Auswertung nicht mehr möglich.
- Aufgrund der Vertraulichkeit der Unterlagen (insbesondere Kosten) bleibt der Zugang zu diesen Daten bzw. die Verwendung dieser Daten verwehrt.

Ist eine LCC-Analyse aus einem der oben genannten Gründe ohne Rohdaten zu erstellen, müssen durch Experten entsprechende theoretische Zusammenhänge erstellt, und diese dann als Grundlage für das Modell verwendet werden. Die sich dadurch ergebenden Unsicherheiten sind zu dokumentieren, und schließlich in einer **Sensitivitätsanalyse** auf ihre Auswirkungen auf das Ergebnis der LCC-Berechnung zu untersuchen [16, S. 26]. Um eine LCC-Analyse zu erstellen, muss aufgrund der langfristigen Kostenvorhersage immer mit Unsicherheiten gerechnet werden. Nach Zehbold [14, S. 150 zitiert nach Krönung] sollte *„die Ungewissheit (...) nicht als Störfaktor, sondern als zentraler Problemgegenstand von Planungsrechnungen angesehen werden“*.

Bevor ein LCC-Modell verwendet wird, sollte nach DIN IEC 60300-3-3 [3, S. 8] eine Validierung im Hinblick auf die Eignung des Modells, die Realität ausreichend abzubilden, durchgeführt werden.

2.3.3.1 Modellstruktur

Um die im Abschnitt 2.3.3 geforderte Möglichkeit der Betrachtung der LCC eines einzelnen Elements des LCC-Modells zu erfüllen, müssen die Gesamt-LCC in ihre Bestandteile zerlegt werden. Es sollte eine Aufgliederung der Produktstruktur in ihre „tieferen Gliederungsebenen, Kostenarten und Lebenszyklusphasen“ erfolgen [3, S. 8].

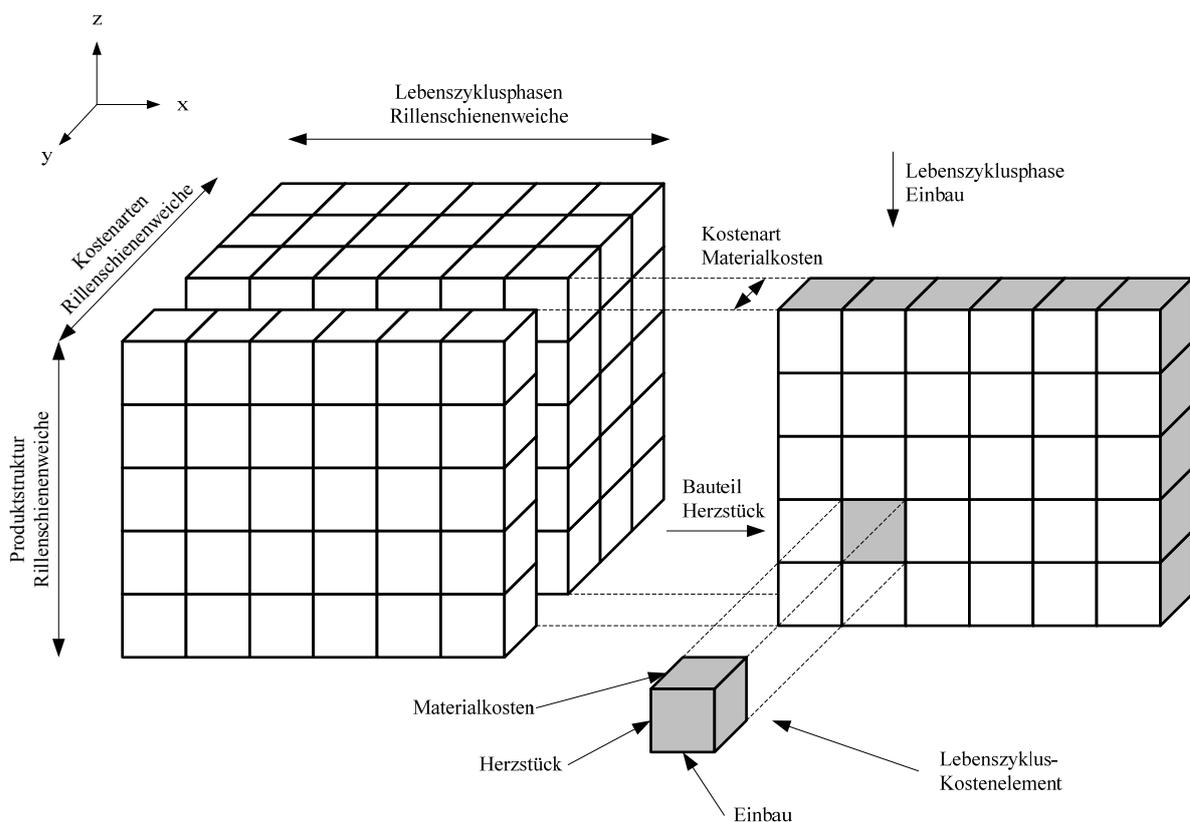


Abbildung 8: Dreidimensionale LCC-Matrix am Beispiel einer Rillenschienenweiche

Die so entstehende dreidimensionale Matrix ist ein leicht verständliches, transparentes System, das an den Umfang der LCC-Analyse angepasst werden kann (Abbildung 8). So ist es möglich jedes Element gesondert zu behandeln und dessen Lebenszykluskosten abzuschätzen [3, S. 8].

Die Einteilung in tiefere Gliederungsebenen (z-Achse) kann als die Betrachtung des Produktsystems in seinen Einzelheiten angesehen werden. Je nach Genauigkeitsgrad kann

diese Zerlegung bis herunter auf die kleinste austauschbare Einheit (z.B. Schraube) fortgeführt werden.

Die Gliederung der Kostenarten (y-Achse) stellt eine Kategorisierung der Kosten im betriebswirtschaftlichen Sinne dar. Die Norm [3, S. 8] führt als Beispiele Arbeitskosten, Sachkosten, Energiekosten, Gemeinkosten, Reisekosten, usw. an.

Der dritten Dimension der Matrix (x-Achse), den Lebenszyklen, kommt eine besondere Bedeutung zu. Die sorgfältige Definition eines entsprechend realistischen Lebenszyklus, sowie die Festlegung der Grenzen zwischen den Phasen, haben einen großen Einfluss auf die LCC, da durch diese Randbedingungen die Zeitpunkte der Zahlungsströme definiert werden. Die Auswirkungen des Zeitpunktes einer Zahlung werden in Abschnitt 2.3.3.3 behandelt.

2.3.3.2 Abschätzungsverfahren von Kostenelementen

Die Schätzung der spezifischen Kosten eines einzelnen Elements der Gesamt-LCC wird auf Basis von **Kostenschätzbeziehungen** durchgeführt. Es kommen neben „Faustregeln“ im Wesentlichen drei Verfahren zur Ermittlung dieser Kostenschätzbeziehungen, auch CERs (Cost Estimating Relationships) genannt, zum Einsatz:

- analytisches Kostenverfahren
- analoges Kostenverfahren
- parametrisches Kostenverfahren

Alle CERs haben gemein, dass auf Basis von Parametern zur Abschätzung der Preise und Umrechnungsfaktoren analytische Beziehungen zwischen den kostenverursachenden Tätigkeiten und den verschiedenen Kostenkategorien hergestellt werden. Die Kosten werden in Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaften des Produkts (Leistung, Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit) dargestellt [3, S. 9].

Beim **analytischen Verfahren** wird die Produktstruktur in ihre Einzelkomponenten zerlegt und jedes Kostenelement direkt geschätzt. Es kommen teilweise festgelegte Standard-Kostenfaktoren zum Einsatz. Alte Schätzwerte werden durch Auf- und Abzinsen bis zur Gegenwart fortgeschrieben [3, S. 9].

Das **analoge Verfahren** verwendet vergangene Kostenschätzungen ähnlicher Produkte und Erfahrungen mit ähnlichen Technologien als Grundlage. Es werden Anpassungen der Daten an die Preissteigerung und im Hinblick auf den Fortschritt in der Technologie durchgeführt [3, S. 9]. Durch die Verwendung historischer Daten und die Anlehnung an bereits durchgeführte Analysen ist dieses Verfahren das mit dem geringsten Zeitaufwand und der einfachsten Handhabung.

Werden die CERs mit Hilfe der **parametrischen Kostenschätzung** entwickelt, werden charakteristische Parameter und Variablen in Gleichungsform verwendet. Jeder Parameter ermöglicht die Umrechnung von einer Einheit in eine Andere. Somit können alle Daten, die beispielsweise als statistischer Durchschnittswert ermittelt wurden, in Kosten umgerechnet werden.

2.3.3.3 Berechnungsgrundlagen

Die LCC sind im Gegensatz zu den kurzfristigen und periodischen Berechnungen der klassischen Kostenrechnung (KORE) eine längerfristige Betrachtung der Gesamtkosten und der Gesamtrentabilität [14, S. 4].

Die Problematik des „Zeitwerts des Geldes“ verkompliziert den Prozess, und dem Faktor „Zeit“ kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Die Inflation (Prozess der ständigen Preisniveausteigerung [20, S. 851]), Opportunitätskosten (entgangener, in Geld bewerteter Ertrag oder Nutzen [21]) und Änderungen in der Besteuerung müssen unter Umständen in Rechnung gestellt werden [3, S. 10].

Da der Geldwert, wie oben erwähnt, über die Zeit veränderlich ist, müssen die Zeitpunkte der jeweiligen Zahlungen berücksichtigt werden. Bei der **Barwertmethode**, auch **Kapitalwertmethode** genannt, werden alle Einnahmen und Ausgaben auf einen bestimmten Bezugszeitpunkt, meist das aktuelle Jahr, abgezinst. Durch die Diskontierung (Abzinsung) wird der Gegenwartswert eines bestimmten Kapitals ermittelt [22, S. 6]. Die Vergleichbarkeit der Kosten ist somit möglich, da die Barwerte der verschiedenen Analysen direkt gegenübergestellt werden können [13, S. 214].

Es ist evident, dass ein heute zur Verfügung stehender Euro mehr wert ist, als ein in 20 Jahren verfügbarer. Der Einfluss des Zeitpunktes einer Zahlung ist in Abbildung 9

veranschaulicht. Der Verlauf der Kurve macht deutlich, dass ein Hinauszögern einer Zahlung in den ersten Jahren des Lebenszyklus einen weitaus größeren Nutzen bringt. In den späteren Jahren ist die Rentabilität des Hinauszögerns nicht mehr gegeben, da die Einsparungen infolge des Wertverfalls des Geldes die Mehrkosten aufgrund steigender Instandhaltungsmaßnahmen nicht mehr aufwiegen können [16, S. 22].

Dieser Zusammenhang soll in folgendem kurzen Beispiel erläutert werden:

Bei einem kalkulatorischen Zinssatz von 7% bewirkt das Hinauszögern einer Zahlung von 100,00 EUR vom Jahr 10 auf das Jahr 30 eine Verminderung des Barwerts um 37,70 EUR. Eine Verschiebung derselben Zahlung vom Jahr 30 auf das Jahr 50 bringt hingegen nur eine Reduzierung von 9,74 EUR.

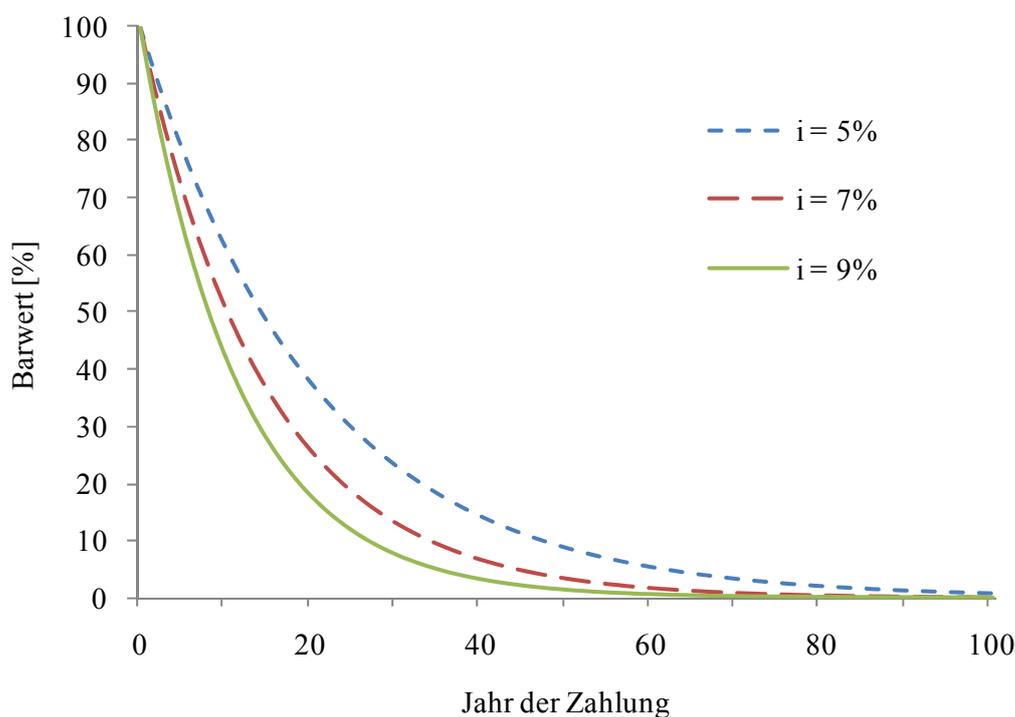


Abbildung 9: Einfluss des Zeitpunktes einer Zahlung auf den Barwert [16, S. 23]

Die Summe der Kosten aller Elemente über den gewählten Betrachtungszeitraum auf den Jetztzeitpunkt, d.h. aller auf den Jetztzeitpunkt abgezinster Zahlungen, ergeben den **NPV** (Net Present Value; Barwert) des Produkts (siehe Abbildung 10) [23, S. 38].

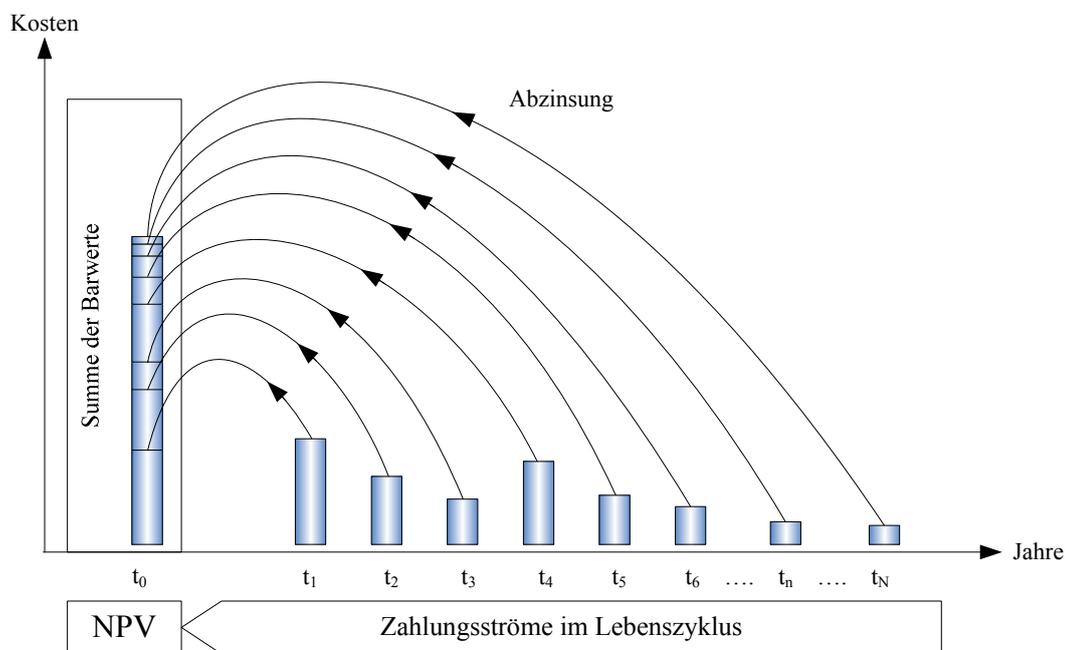


Abbildung 10: NPV als Summe der Barwerte [16, S. 23]

Die Berechnung des Barwerts erfolgt nach [23, S. 38] mit Hilfe der Formel:

$$NPV = \sum_{t=0}^n Z_t * (1 + i)^{-t} \quad (4)$$

mit: NPV: Net Present Value
 Z_t : Zahlungen im Jahr t
 n : Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums
 i : kalkulatorischer Zinssatz
 t : Jahr

Der Vergleich zweier Alternativen erfolgt durch die Gegenüberstellung der jeweiligen Barwerte. Die Differenz der Lebenszykluskosten entspricht der Differenz ihrer Barwertsummen [16, S. 39]:

$$\Delta LCC = NPV^A - NPV^B = \sum_{t=0}^n (Z_t^A - Z_t^B) * (1 + i)^{-t} \quad (5)$$

Die LCC-Differenz ΔLCC stellt zwar den Kostenunterschied der Alternativen dar, die womöglich unterschiedlichen Lebensdauern der zu vergleichenden Systeme bleiben jedoch unberücksichtigt.

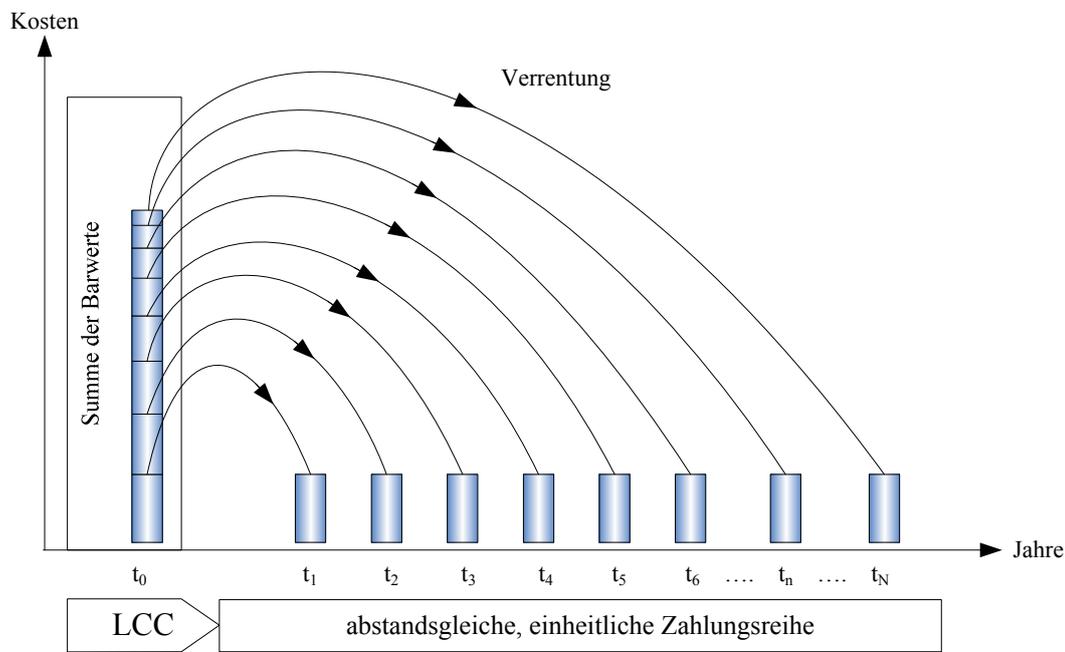


Abbildung 11: Umrechnung der LCC in betragsgleiche Zahlungen [16, S. 24]

Unter Verwendung der **Annuitätenmethode** (Verrentung) kann die Nutzungsdauer eines Produkts oder einer Anlage berücksichtigt werden (siehe Abbildung 11). Die LCC werden in Annuitäten („*jährliche Zahlung zur Tilgung und Verzinsung einer Schuld*“ [24, S. 62]) umgerechnet und stellen somit die, auf den Lebenszyklus bezogenen, jährlichen Kosten eines Produktes dar.

$$a_{LCC} = LCC * \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (6)$$

mit: a_{LCC} : Annuität, Rente
 LCC: Summe der Barwerte über den Lebenszyklus
 n: Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums
 i: kalkulatorischer Zinssatz

Diese Annuitäten werden auch oft Jahres-LCC genannt und sind insbesondere beim Vergleich verschiedener Instandhaltungsstrategien anwendbar, welche die Lebensdauer des Produkts verlängern [16, S. 24]. Als **Kapitalwert** kann der Barwert nur dann bezeichnet werden, wenn alle Zahlungsströme (Erlöse und Kosten) inkl. der Anfangsinvestitionen berücksichtigt werden. Dieser Kapitalwert gibt in Abhängigkeit vom gewählten Zinsfuß an, wie hoch der Gegenwartswert eines Zahlungsstroms ist [23, S. 38]:

- Ist der Kapitalwert **größer Null**, so ist die Investition vorteilhaft. Es wird ein Überschuss über die gewählte Mindestverzinsung hinaus erwirtschaftet.
- Ist der Kapitalwert **gleich Null**, so werden die eingesetzten Mittel wieder gewonnen und mit dem kalkulatorischen Zinssatz verzinst.
- Ist der Kapitalwert **kleiner Null**, so ist die Investition unwirtschaftlich, da die angesetzte Mindestverzinsung nicht erreicht wird.

Der Kapitalwert kann ebenso wie der Barwert in Annuitäten (siehe Formel 6) umgerechnet werden. Bei einer Differenz-LCC können, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, jene Kosten, die für alle Alternativen konstant sind, weggelassen werden. So kann beispielsweise ermittelt werden, ob höhere finanzielle Aufwendungen bei der Instandhaltung über die betrachtete Lebensphase wirtschaftlich sind oder nicht [16, S. 25]. Da dies eine selektive Betrachtung der sich unterscheidenden Positionen ist, kann in diesem Fall über die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produkts keine Aussage gemacht werden.

2.3.3.4 Prozess der LCC-Betrachtung

Bei der Erstellung einer LCC-Analyse ist eine gut strukturierte und gut dokumentierte Form für die spätere Nachvollziehbarkeit und Kontrolle von entscheidender Bedeutung. Die Norm [3, S. 10 ff.] gibt folgenden Prozess zu Erstellung einer LCC-Analyse vor:

Im ersten Schritt, der Erstellung des **Plans für die LCC-Analyse**, werden der Zweck und der Umfang der Analyse festgelegt. Eine genaue Zieldefinition und ein Zeitplan müssen erstellt werden (Typische Zieldefinitionen sind die generelle Ermittlung der LCC um die Planung zu unterstützen, die Bewertung von alternativen Handlungsweisen sowie die Bestimmung von Kostentreibern, um mit den Optimierungsbemühungen an der richtigen

Stelle anzusetzen). Es werden die Randbedingungen (RAMS, siehe Abschnitt 2.1), Annahmen und Beschränkungen, welche Einfluss auf die LCC haben, ermittelt und aufgezeigt. Falls das Ziel der Untersuchung einen Vergleich mehrerer Alternativen beinhaltet, sind alle zu analysierenden Optionen aufzuzeigen.

Den nächsten Schritt stellt die **Entwicklung des LCC-Modells** dar. Es kann entweder von Analysen ähnlicher Produkte adaptiert, oder neu erstellt werden (siehe Abschnitt 2.3.3). Nach der Bestimmung der Datenquellen und der Auswahl der geeigneten Kostenschätzverfahren werden Informationen über Investitionskosten der Anlage sowie über Kosten für Personal, Betrieb und Energie gewonnen. Mit Hilfe einer Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) können die Arten von Systemausfällen definiert werden. Als Ergebnis liegen nun die technische Nichtverfügbarkeit sowie die Ausfallszenarien des Systems vor [25, S. 20].

Die **Analyse** umfasst die Datenbeschaffung, die Identifikation der Kostentreiber, den Alternativenvergleich (sofern in der Zieldefinition angeführt), eine Sensitivitätsanalyse zur Prüfung der Auswirkungen der Schätzungen und Annahmen, eine Quantifizierung der Unsicherheiten sowie eine abschließende Verifikation der Ergebnisse durch einen Vergleich mit den Zieldefinitionen des LCC-Plans.

Diese Schritte müssen ggf. iterativ durchgeführt werden, wenn sich während der Bearbeitung zeigt, dass Änderungen in früheren Stadien notwendig sind. Eine detaillierte **Dokumentation** ist maßgebend, um diese Iterationen, wenn nötig, zweckmäßig durchführen zu können bzw. um sachverständigen Dritten eine Kontrolle der Analyse zu ermöglichen [3, S. 10].

2.3.4 Zusammenhang zwischen LCC und RAMS

Wie schon in Abschnitt 2.1.1 angeführt, haben die RAMS-Eigenschaften eines Systems entscheidenden Einfluss auf die LCC. Mit höheren Investitionskosten bei der Beschaffung eines Produkts können Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit entsprechend erhöht werden. Überlegungen zu den RAMS-Eigenschaften sollten zu Beginn der LCC-Analyse einen integralen Bestandteil im Entwurfsprozess darstellen. In Abbildung 12 ist diese Verknüpfung vereinfacht dargestellt. Es ist ersichtlich das mit zunehmender

Produktqualität der Investition, resp. mit zunehmenden Investitionskosten, die Betriebskosten entsprechend sinken. Ein Kostenoptimum kann nur durch Überlagerung der gegenläufig verlaufenden Kurven ermittelt werden. Die **Nichtverfügbarkeit** eines Systems wird von den RAMS-Eigenschaften bestimmt. Die dadurch entstehenden Kosten der Instandhaltung, Folgekosten, usw. können beträchtlich sein, weshalb eine Optimierung der Funktionsfähigkeit des Systems erzielt werden muss. Bei Systemausfällen können unter Umständen auch **Gewährleistungskosten** sowie **Haftungskosten** entstehen, welche auch in der LCC-Analyse zu berücksichtigen sind [3, S. 8].

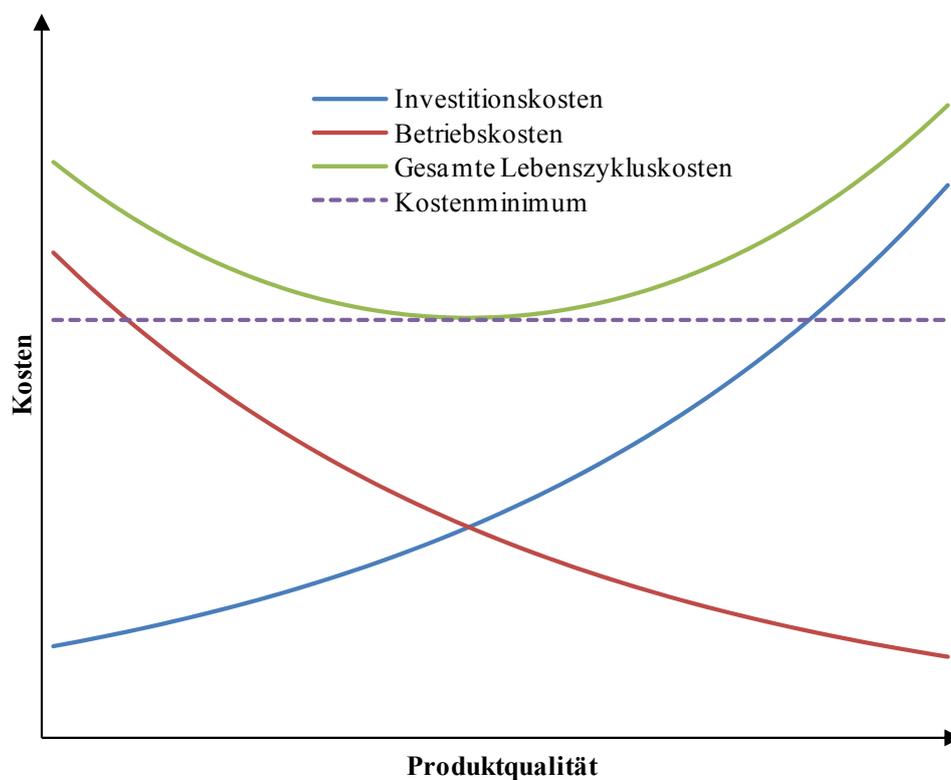


Abbildung 12: Vereinfachter Zusammenhang zwischen LCC und RAMS [3, S. 7]

2.4 Das LCC/RAMS-Konzept

Die Kombination von LCC und RAMS, wie sie in beiden grundlegenden Normen gefordert wird, ermöglicht eine quantitative und qualitative Beschreibung von Kosten-Leistungs-Relationen eines Systems oder eines Produktes. Mit der Definition von RAMS-Zielgrößen in der **Entwicklungsphase** werden die Leistungsanforderungen an das System zu jedem Zeitpunkt des Lebenszyklus festgelegt. Auf Basis dieser Leistungsanforderungen kann der Hersteller die Lebenszykluskosten eines Produkts prognostizieren.

Eine transparente Kostenstruktur sowie Zeitplan und Aufwand der Wartungs- und Instandsetzungstätigkeiten kann jedoch nur durch eine **enge Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Betreiber** gelingen, da der Hersteller auf die Daten des laufenden Betriebs angewiesen ist [25, S. 20].

In der **Betriebsphase** werden einerseits die RAMS-Ziele ständig verifiziert (RAMS-Performance) und andererseits die Kosten mittels eines Soll-Ist-Vergleichs ständig geprüft. Die so gewonnenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, Wartungs- und Instandsetzungsintervalle, Ausfallsverhalten und deren Kosten müssen durch eine permanente Datenfortschreibung dokumentiert werden [4, S. 45]. Diese Informationen ermöglichen, sofern sie dem Hersteller zugänglich gemacht werden, eine Optimierung der Prozesse und werden mit zunehmender Datendichte zukünftige Prognosen entscheidend erleichtern und verbessern. Aufgrund wettbewerblicher und personeller Gründe werden diese „Felddaten“ aber meist nur selektiv und auch nur während der Gewährleistungsfrist an die Hersteller weitergegeben [26, S. 26].

Die o.g. Prozessoptimierung kann zweierlei Ziele verfolgen. Einerseits die Verbesserung der Systemeigenschaften (RAMS-Performance) oder andererseits eine Minimierung der Gesamtkosten. Es kann sinnvoll sein die RAM-bezogenen Aktivitäten getrennt von den sicherheitsbezogenen Aktivitäten zu behandeln, da für erstere Kostenbetrachtungen als Hauptargument angesehen werden können, während für die Sicherheit das Vermeiden von Unfällen und Vorfällen oberste Priorität hat [4, S. 28].

2.4.1 Einschränkungen in der Anwendbarkeit des LCC/RAMS - Konzepts

Unter Umständen können die in Abschnitt 2 angeführten theoretischen Konzepte auf bestimmte Produkte und Produktsysteme nicht effizient oder gar nicht angewendet werden. Falls es nicht möglich ist die genauen **Abhängigkeiten zwischen Kosten und Leistung** herzustellen, die **Prozessleistung** nicht entsprechend überwacht und gemessen wird oder die **Definition der RAMS-Ziele** nicht möglich ist, kann keine LCC/RAMS-Optimierung durchgeführt werden. Es folgen Beispiele aus der Praxis bei denen nach der Ansicht des Autors die Anwendbarkeit von LCC/RAMS in Frage gestellt werden kann:

- die Bewertung der **Sicherheit**
- die Anpassung an den **Stand der Technik**
- die monetäre Bewertung des **Kundenempfindens** bzw. des **Images**
- das **Finanzrisiko**
- das **Rechtsrisiko**
- **mangelnde Transparenz** der Prozesse
- **politische Beeinflussung**

2.4.1.1 Bewertung der Sicherheit

Das Konzept von LCC/RAMS ermöglicht die effizienteste Nutzung der Ressourcen unter Einhaltung eines geforderten Sicherheitslevels. Basierend auf dem „Safety-Integrity-Konzept“ im laufenden Betrieb und dem „Fail-Safe-Konzept“ im Störfall (siehe Abschnitt 2.1.6) werden die Aufwendungen der zu bewertenden Alternativen miteinander verglichen. Die Alternative mit den geringsten Kosten bei Erfüllung des minimalen Sicherheitsstandards wird aufgrund der Wirtschaftlichkeit favorisiert. Ob kleine Änderungen oder Zusatzinstallationen von geringem Aufwand die Sicherheit entscheidend verbessern könnten, bleibt jedoch unberücksichtigt. Inwieweit Störungen mit Personenschaden (Tote und Verletzte) monetär bewertet und in diese Analyse mit eingerechnet werden können, muss in Frage gestellt werden. Des Weiteren können zusätzliche sicherheitspolitische Maßnahmen zum positiven Image des Unternehmens beitragen und für Werbezwecke verwendet werden. Der durch Unfälle entstandene

Imageverlust (siehe Abschnitt 2.4.1.3) kann schwerwiegende Folgen haben und ist im Vorhinein sehr schwer zu bewerten [3, S. 7].

2.4.1.2 Stand der Technik

Die zu erwartenden Lebensdauern der betrachteten Produkte und Systeme können unter Umständen sehr hoch sein. Im Fall von Bahnsystemen können diese planmäßigen Lebensdauern bis zu fünfzig Jahre betragen. In dieser Zeit werden Teile des betrachteten Systems entweder im Zuge von Instandsetzungsarbeiten ausgetauscht, oder durch eine Verbesserung dem Stand der Technik angepasst (siehe Abschnitt 2.2). Langlebige Systeme werden somit über ihre Lebensdauer ständig partiell erneuert womit sich Entscheidungen in der Entwurfsphase als Fehler herausstellen können.

Nehmen wir an ein Unternehmen entscheidet sich zum Kauf einer Maschine weil der Zeitaufwand resp. die Stillstandzeit für das wöchentliche Schmieren aufgrund der guten Zugänglichkeit minimal sind. Werden nun in Zukunft aufgrund neuer Technologien bessere und länger schmierende Öle entwickelt, welche das Schmier-Intervall auf mehrere Monate verlängern, ist der Vorteil der zum Kauf der Maschine geführt hat, verloren.

Innovationen können auch die Preise am Markt stark beeinflussen, wie in den letzten Jahren anhand von Mobiltelefonen anschaulich gezeigt wurde. Durch die Entwicklung von kleinformatischen Farbdisplays ist die Nachfrage für Mobiltelefone mit Schwarz-Weiß-Displays und somit auch deren Preis stark eingebrochen.

Eine weitere Unsicherheit stellt die Sicherstellung der Versorgung mit Ersatzteilen dar. Wird die Produktion eines veralteten Modells seitens des Herstellers eingestellt, so ist eine „Just In Time“-Lieferung des Ersatzteiles nicht mehr möglich. Hohe Lagerkosten können die Folge sein.

2.4.1.3 Kundenempfinden und Image

Bei Produktionsbetrieben sind die Ausfallkosten bzw. Stillstandskosten bei einer Störung leicht zu quantifizieren. Sie setzen aus den ständig anfallenden, produktionsunabhängigen

Kosten (Miete, kalkulatorische Abschreibung), den Opportunitätskosten (entgangener Gewinn) und den Kosten für das unproduktive Personal zusammen.

Im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) ist die Determinierung der entstandenen Kosten für eine Störung ungleich komplizierter. Die Kosten setzen sich aus den Betriebserschwerungskosten (BEK) und den Kosten für den entstandenen Imageverlust zusammen. Die BEK bestehen aus den Verspätungskosten durch Baustellenbetrieb, Kosten für Zugumleitungen, Kosten für Schienenersatzverkehr und externen Kosten zusammen und „*entstehen, sobald vom Regelbetrieb abgewichen wird*“ [2, S. 59].

Bei der Evaluierung des Imageverlustes spielen viele nicht kalkulierbare, zufällige Faktoren eine große Rolle. Beispielsweise ist der Imageverlust durch das entstehende Chaos, wenn gerade nach einem Fußball-Länderspiel beim Abtransport von tausenden Fans eine U-Bahn-Garnitur „liegen bleibt“ und es zu langen Verspätungen kommt, nur schwer in Zahlen auszudrücken. Wie sich die betroffenen Kunden im Störfall verhalten, ob sie beispielsweise auf andere öffentliche Verkehrsmittel ausweichen oder den motorisierten Individualverkehr bevorzugen, hängt von vielen Faktoren ab, und ist nicht prognostizierbar. Das Wetter, die Tageszeit und die örtlichen Gegebenheiten sind Beispiele für nicht beherrschbare Faktoren, die das Kundenverhalten beeinflussen.

2.4.1.4 Finanzrisiko

Die Prognose des Weltmarktes ist mit vielen Unsicherheiten behaftet. Die Entwicklung der Inflation ist kaum auf mehrere Jahre vorauszusehen. Die Wahl eines geeigneten internen Zinsfußes für die Kapitalwertmethode ist jedoch für eine korrekte Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Alternativen von entscheidender Bedeutung.

Wie in Abschnitt 2.3.3.3 angeführt ist eine Investition mit einem Kapitalwert größer Null vorteilhaft und jene mit einem Kapitalwert kleiner Null unwirtschaftlich. Anhand des folgenden stark vereinfachten Beispiels werden die Auswirkungen des Zinssatzes auf den Kapitalwert veranschaulicht.

Die Alternativen A und B charakterisieren sich durch folgende Zahlungsströme über ihre Lebensdauer von 4 Jahren:

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
A	-100	25	34	20	40
B	200	-15	30	-45	-233

Tabelle 3: Beispiel für Einfluss des Zinssatzes auf den Kapitalwert

Die Kapitalwerte errechnen sich mit (Formel 4) bei einem internen Zinsfuß von 5% zu

$$K_{0A} = -100 + 25/1,05 + 34/1,05^2 + 20/1,05^3 + 40/1,05^4 = \mathbf{+4,84}$$

$$K_{0B} = 200 - 15/1,05 + 30/1,05^2 - 45/1,05^3 - 233/1,05^4 = \mathbf{-17,64}$$

bei einem internen Zinsfuß von 8% hingegen zu

$$K_{0A} = -100 + 25/1,08 + 34/1,08^2 + 20/1,08^3 + 40/1,08^4 = \mathbf{-2,42}$$

$$K_{0B} = 200 - 15/1,08 + 30/1,08^2 - 45/1,08^3 - 233/1,08^4 = \mathbf{+4,85}$$

Ein unrealistisch gewählter Zinssatz kann somit zur Auswahl der unwirtschaftlicheren Variante führen!

Ebenso wie die Inflation sind an dieser Stelle noch der Energiepreis und der Stahlpreis zu erwähnen. Die Schwankungen bei den Energiekosten zufolge der momentanen weltpolitischen Lage sowie der Anstieg des Stahlpreises aufgrund der stark steigenden Nachfrage stellen eine weitere, sehr schwer zu quantifizierende Unsicherheit dar.

2.4.1.5 Rechtsrisiko

Änderungen in der Rechtsprechung können im freien Wettbewerb weitreichende Folgen haben. Es ist evident, dass wenn der Gesetzgeber durch die Auflage eines höheren Sicherheitsstandards ein Produkt vom Markt nimmt, der Hersteller die prognostizierten

Einnahmen nicht erwirtschaften wird können. Wenn diese Anpassung des Sicherheitsniveaus auch bereits gekaufte Anlagen betrifft, so müssen die Betreiber möglicherweise vor dem Erreichen der prognostizierten Lebensdauer in eine Neuanschaffung investieren. Durch neue Gesetze oder eine Modifikation der Besteuerung kann der Gesetzgeber stark **veränderte Rahmenbedingungen** schaffen, die in der LCC-Analyse nicht berücksichtigt wurden.

2.4.1.6 Mangelnde Transparenz der Prozesse

Die Herstellung von Zusammenhängen zwischen alternativen Handlungsweisen und deren Kosten ist für eine Analyse zwingend notwendig (siehe Abschnitt 2.4.1). Können die durch Änderungen erzielten Effekte auf die RAMS-Größen bzw. auf die Kosten nicht eindeutig zugeordnet und determiniert werden, ist eine Bewertung der Maßnahmen sehr schwierig. Mangelnde Detaillierung der Kostengrößen und mangelnde Datenpflege machen die Betrachtung eines spezifischen Teilprozesses unmöglich. Kostentransparenz und klare Prozessabläufe sind für eine LCC/RAMS-Analyse entscheidend.

2.4.1.7 Politischer Einfluss

Speziell für diese Arbeit darf der Einfluss der Politik auf die Zweckdienlichkeit einer LCC/RAMS-Analyse nicht vernachlässigt werden. Beispielsweise sind aufgrund der EU-Präsidentschaft Österreichs im Jahre 2006 bzw. der UEFA Fußball-Europameisterschaft EURO 2008 für die Wiener Linien neue Randbedingungen geschaffen worden, die eine LCC/RAMS-Betrachtung behindern, oder sogar unmöglich machen. Jegliche planmäßigen Instandsetzungsarbeiten an der Straßenbahn-Infrastruktur am Wiener Ring wurden untersagt, sofern es sich nicht um die Behebung von Störungen handelt. Wenn nun die LCC-Analyse einer Rillenschienenweiche ergibt, dass es wirtschaftlicher ist, aufgrund der Liegezeit und des Schadensbildes einen sofortigen Austausch vorzunehmen, kann diese Maßnahme auf politischen Druck hin nicht durchgeführt werden. Die Weiche muss trotz der Unwirtschaftlichkeit „am Leben erhalten werden“. Die gesamte Kostenplanung wird somit ignoriert.

3 Plan der LCC-Analyse

3.1 Zieldefinition

Wie schon im Abschnitt 1.1 einleitend erwähnt können Weichen aufgrund ihrer Verschleißanfälligkeit als Haupt-Kostentreiber im Oberbau bezeichnet werden. Aus diesem Grund ist die „Weiche“ die für eine LCC-Analyse interessanteste Oberbaukomponente mit den möglicherweise größten Potentialen. Eine grobe Aufgliederung der Fahrwegkomponenten ist in Abbildung 13 dargestellt.

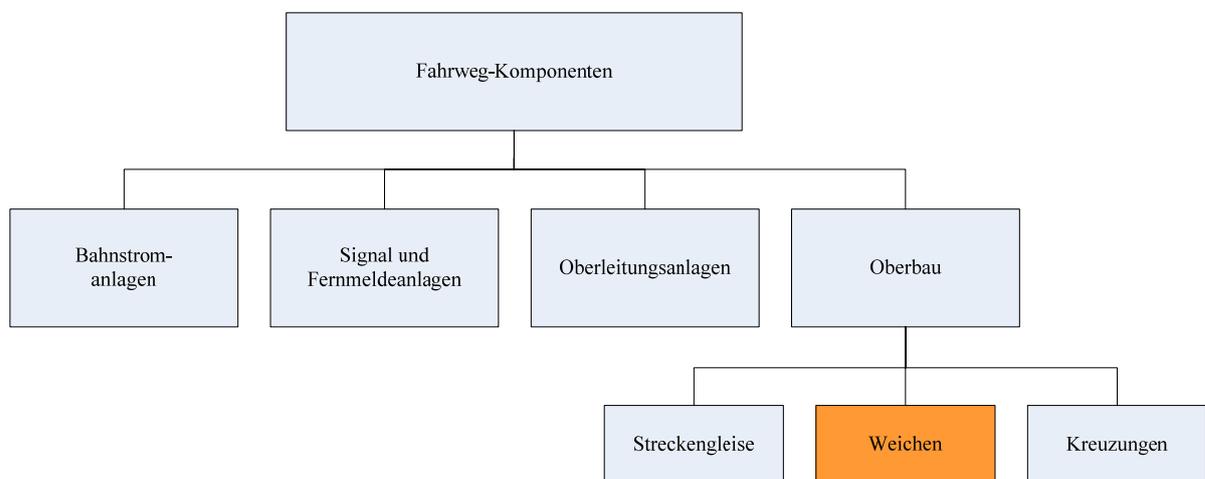


Abbildung 13: Aufgliederung der Fahrwegkomponenten [2, S. 58]

Das Ziel dieser Arbeit ist die Determinierung der Gesamtkosten einer Rillenschienenweiche der Wiener Linien über die gesamte Lebensdauer. Mit den gewonnenen Daten erhoffen sich die Wiener Linien etwaige Optimierungspotentiale definieren zu können, und es kann überprüft werden, ob es Wege zur Verringerung der Gesamtkosten gibt. Genauere Informationen zu Inhalt und Zielsetzung sind dem Abschnitt 1.2 zu entnehmen.

3.2 Anlagenbeschreibung

Alle Kostenströme bei den Wiener Linien sind seit 2002 in SAP (die weltweit am meisten verbreitete Standardsoftware zur Kontrolle und Dokumentation sämtlicher betrieblicher Abläufe) erfaßt worden. Somit ist eine Ermittlung und Zuordnung der Kosten im Vergleich zu den Jahren davor deutlich leichter. Um die Daten über alle Lebensphasen der Weiche zu erhalten, werden die Daten von Weichen mit vergleichbarer Geometrie verwendet (siehe Abbildung 1). Nach einer kurzen Erläuterung der für diese Arbeit wesentlichen allgemeinen Eigenschaften von Weichen folgt eine Beschreibung der für diese Analyse verwendeten Anlagen.

3.2.1 Allgemein

3.2.1.1 Konstruktive Merkmale

Die Spurweite ist beim Straßenbahnnetz der Wiener Linien mit 1.435 mm festgelegt. Weichenanlagen können, abhängig von ihrer Geometrie, prinzipiell in gerade Weichen bzw. **einfache Weichen** (EW) und **Bogenweichen** unterschieden werden. Letztere werden in Außenbogenweichen (ABW) und Innenbogenweichen (IBW) unterteilt.

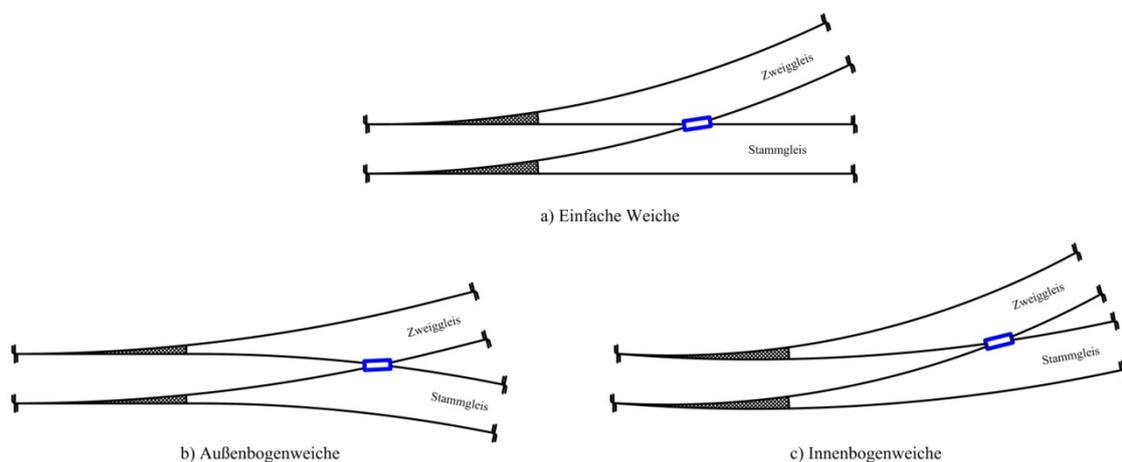


Abbildung 14: Arten von Weichen

Einfache Weichen setzen sich aus einem geraden Stammgleis und einem gebogenen Zweiggleis zusammen. Ob es sich bei der Weiche um eine Rechts- oder Linksweiche handelt, definiert sich über die Richtung in der das Zweiggleis bei Blickrichtung gegen die Herzstückspitze aus dem Stammgleis abzweigt.

Bogenweichen zeichnen sich durch ein ebenfalls gekrümmtes Stammgleis aus. Ist das Stammgleis in die gleiche Richtung gebogen wie das Zweiggleis, so spricht man von einer Innenbogenweiche. Sind die Gleise in entgegengesetzter Richtung gebogen wird die Anlage als Außenbogenweiche bezeichnet. Eine Übersicht über die Weichenarten ist in Abbildung 14 dargestellt.

3.2.1.2 Geometrie

Bei den zu untersuchenden Weichen handelt es sich um eine sogenannte 6-Punkte-Anlage wie sie in Abbildung 15 dargestellt ist. Aufgrund der Parallelführung zweier Gleise entstehen bei der Verzweigung der Fahrwege sechs Kreuzungspunkte. Die verwendeten Radien liegen zwischen 45 - 57 m und befinden sich somit in einem sehr oft zur Anwendung kommenden Bereich. Diese Tatsache war auch der Entscheidungsgrund die Analyse basierend auf diesen Weichen zu erstellen, da sie aufgrund der verwendeten Radien sehr repräsentativ sind.

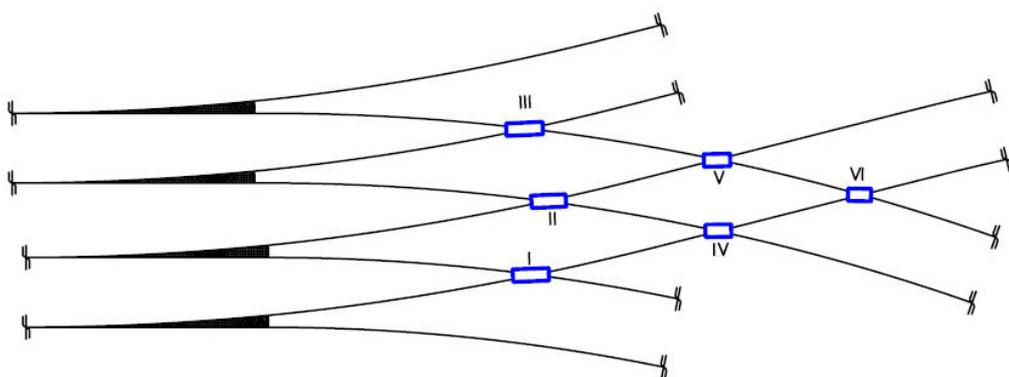


Abbildung 15: 6-Punkte-Anlage

3.2.1.3 Verzweigungsweiche

Weichen, die gegen die Weichenspitze befahren werden, werden elektrisch gestellt und Verzweigungsweichen genannt [27, S. 30]. Die Weichenbeeinflussung erfolgt über einen Induktivkontakt am Triebwagen und einer Induktivschleife im Boden. Der Prozessablauf ist in Anhang 3 dargestellt. Die Induktivschleife ist ca. 21 m vor der Weichenspitze durch ein gelbes Dreieck gekennzeichnet. Wenn der Fahrer die Schaltstellung „Automatik“ aktiviert hat, werden die Weichen entsprechend der Linienkodierung gestellt. Ist die Schaltstellung auf „Hand“, muss der Weichenschalter entsprechend der gewünschten Fahrtrichtung betätigt werden. Wird eine Weiche aufgrund eines heranfahrenden Triebwagens gestellt, so leuchtet das Besetztzeichen für die anderen Straßenbahnen auf. Aufgrund des Nachfahrverbots muss die nächste Straßenbahngarnitur bei der gelben Haltelinie, welche sich ca. 12 m vor der Weichenspitze befindet, stehen bleiben und die Freigabe der Weiche abwarten. Nachdem der Vorderzug den Weichenabschnitt verlassen hat, wird, sofern der nächste Zug einen anderen Richtungswunsch hat, die Weiche selbsttätig gestellt [27, S. 28].

3.2.1.4 Vereinigungsweiche

Weichen, die zur Weichenspitze hin befahren werden nennt man Vereinigungsweichen. Diese Art von Weichen, wird nicht gestellt, sondern durch den Triebwagen aufgefahren. Der Straßenbahnfahrer darf die Anlage, sofern es sich nicht um eine verriegelte oder verkeilte Weiche handelt, ohne Rücksicht auf die Weichenstellung mit 25 km/h aufschneiden [27, S. 30].

3.2.2 Verwendete Anlagen

Es wurde versucht möglichst gleichartige Anlagen mit möglichst ähnlicher Geometrie zu finden, die im Abstand von 5 Jahren eingebaut wurden. Es folgt eine Auflistung der verwendeten Anlagen.

3.2.2.1 Anlage 09-03/I-VI - Einbauphase, Betriebsphase I

Für die Untersuchung der ersten Lebensphasen wurde die spezifische Weiche mit der **Anlagennummer 09-03/I-VI; Alser Straße - Abzweigung Kinderspitalgasse** gewählt. Sie wurde im Jahr **2003** komplett getauscht und stellt daher für die Untersuchung der ersten 5 Jahre ein sehr geeignetes Objekt dar. Die Lage der Weiche ist in Abbildung 16 dargestellt.

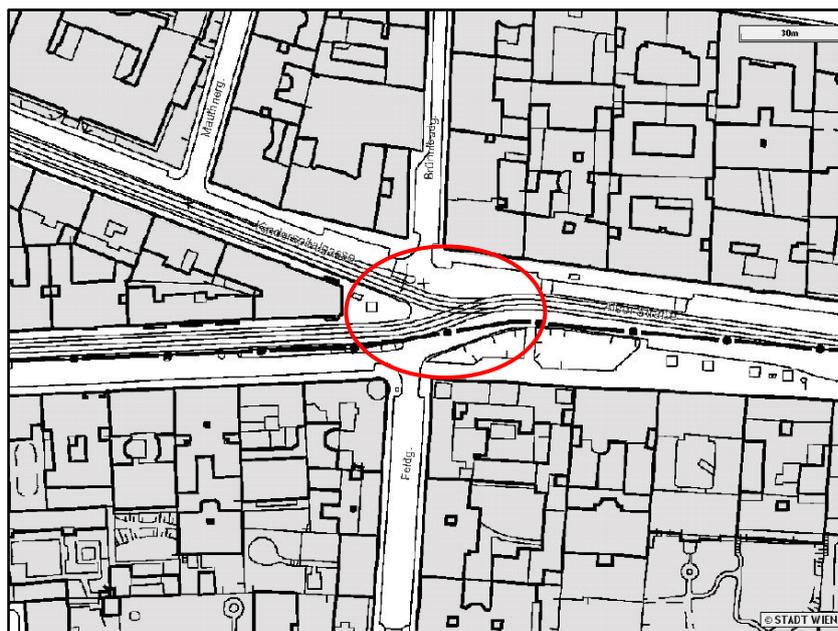


Abbildung 16: Lageplan der Anlage 09-03/I-VI [28]

3.2.2.2 Anlage 13-21/8-13 - Betriebsphase II

Für die Untersuchung des Liegezeitraums zwischen 5 und 10 Jahren wurde die spezifische Weiche mit der **Anlagennummer 13-21/8-13; Speisinger Straße – Abzweigung Wolkersbergenstraße** (siehe Abbildung 17) ausgesucht. Sie wurde im Jahr **1998** komplett getauscht.

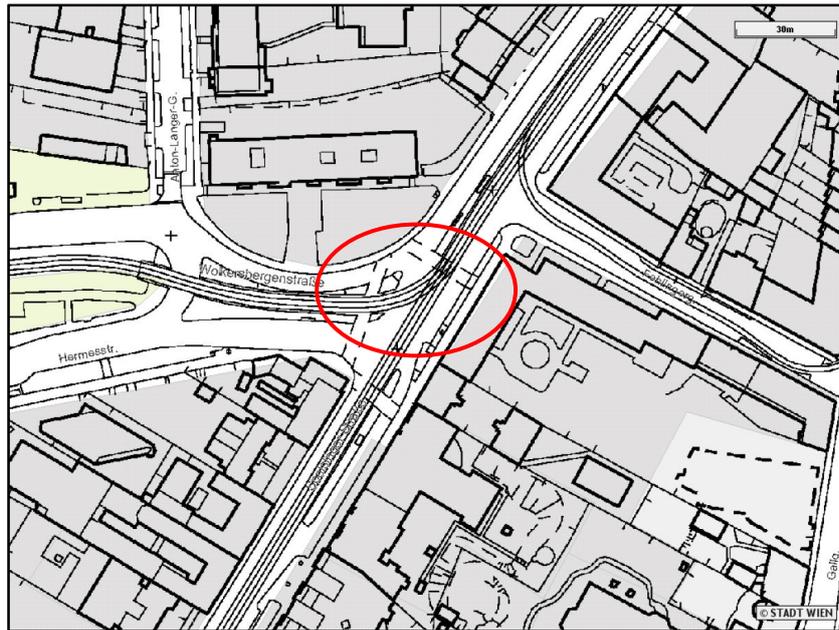


Abbildung 17: Lageplan der Anlage 13-21/8-13 [28]

3.2.2.3 Anlage 18-04/42-47 - Betriebsphase III

Für die Untersuchung des Liegezeitraums zwischen 10 und 15 Jahren wurde die spezifische Weiche mit der **Anlagennummer 18-04/42-47; Währinger Gürtel – Abzweigung Währinger Straße** (siehe Abbildung 18) gewählt. Sie wurde im Jahr 1993 neu eingebaut.

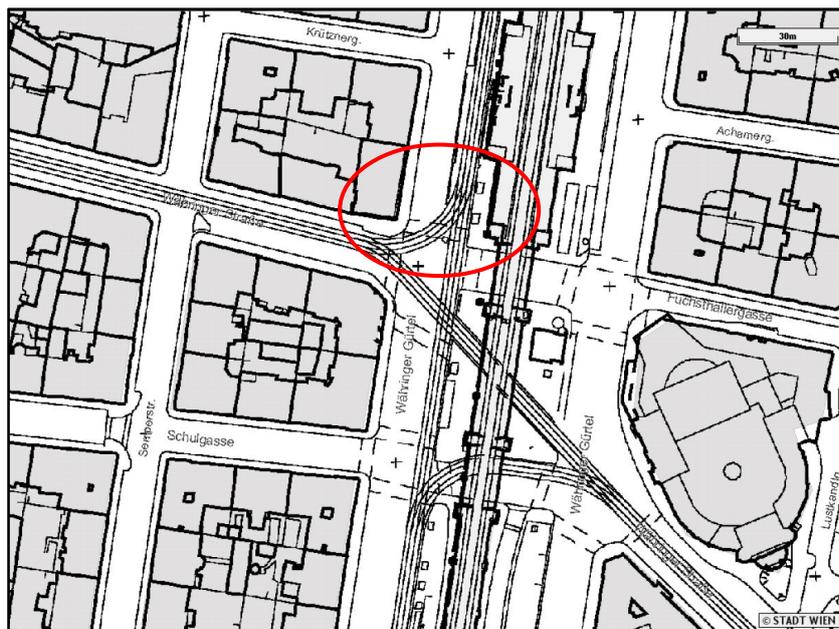


Abbildung 18: Lageplan der Anlage 18-04/42-47 [28]

3.2.2.4 Anlage 20-04/35-40 - Betriebsphase IV, Ausbauphase

Für die Untersuchung des Liegezeitraums zwischen 15 und 20 Jahren wurde die spezifische Weiche mit der **Anlagennummer 18-04/42-47; Währinger Gürtel – Abzweigung Währinger Straße** (siehe Abbildung 19) verwendet. Sie wurde **1987** eingebaut und Anfang 2008 erneuert.

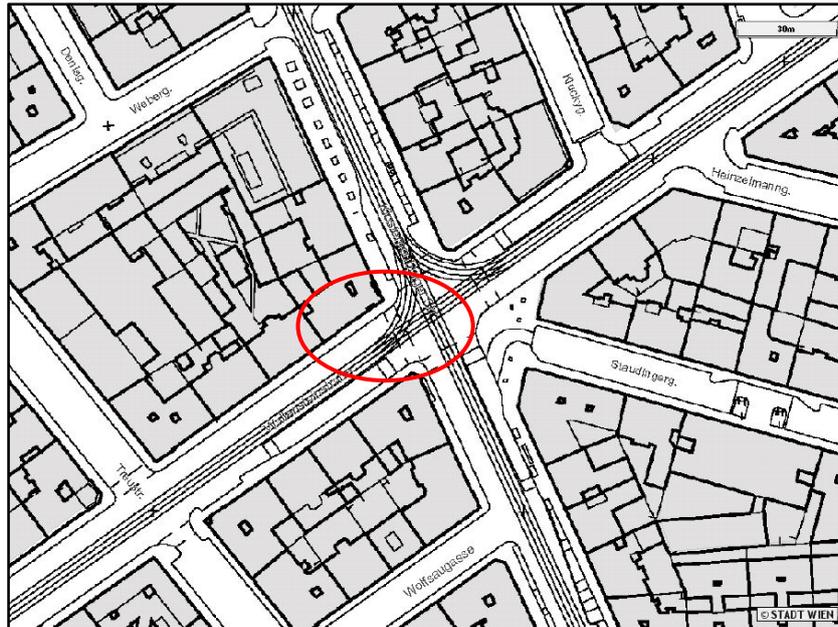


Abbildung 19: Lageplan der Anlage 20-04/35-40 [28]

3.3 Randbedingungen

In den folgenden Abschnitten werden die Randbedingungen, die einen Einfluss auf die LCC-Analyse haben, dargestellt. In Abschnitt 3.3.1 wird der unternehmerische Rahmen, welcher im Zuge dieser Arbeit relevant ist, angeführt. Insbesondere der **ÖPNV-Vertrag** von 1999 zwischen der Stadt Wien und der **Wiener Linien GmbH & Co KG** ist von Bedeutung, da dieser Vertrag die Finanzierung der Wiener Linien regelt. Es folgt auch eine kurze Vorstellung der Organisationsstruktur des Unternehmens sowie der Unternehmensziele.

Das betriebliche Umfeld bei der Herstellung einer Rillenschienenweiche in der Oberbauwerkstätte sowie die Darstellung der Abläufe bei den Instandhaltungsarbeiten werden in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

3.3.1 Unternehmerische Randbedingungen

3.3.1.1 Ausgliederung und ÖPNV-Vertrag

Die Ausgliederung der Wiener Stadtwerke aus der Stadtverwaltung und deren Umwandlung in eine Aktiengesellschaft, der **Wiener Stadtwerke Holding AG**, erfolgte im Juni 1999. Die Wiener Linien GmbH & Co KG ist eine Tochtergesellschaft der Wiener Stadtwerke Holding AG und dadurch ein selbstständig agierendes Unternehmen. Die Stadt Wien hält 100% der Anteile an der Wiener Stadtwerke Holding AG und ist somit auch alleiniger Teilhaber an den Wiener Linien. Eine Übersicht über die Wiener Stadtwerke Holding AG und die Beteiligungen an den Tochtergesellschaften ist in Anhang 1 dargestellt.

Im Zuge dieser Ausgliederung wurde im November 2001 der ÖPNV-Vertrag (Öffentlicher Personennahverkehrs- und –finanzierungsvertrag) zwischen der Stadt Wien und der Wiener Linien GmbH & Co KG abgeschlossen. Die Wiener Linien sind ab diesem

Zeitpunkt für die Bereitstellung und den Betrieb des Wiener Nahverkehrsnetzes verantwortlich [29, S. 149].

Durch den ÖPNV-Vertrag tragen nun die Wiener Linien das Betriebsrisiko, was direkt mit der Häufigkeit der Inanspruchnahme der angebotenen Dienstleistungen und dem damit verbundenen Einnahmeausfall in Abhängigkeit steht. Durch die Privatisierung sollte neben der Abkehr von der pauschalen Verlustabdeckung auch die Eigenverantwortung des Managements für die Betriebsergebnisse verstärkt werden. Es wird eine Mischfinanzierung aus Mitteln der Stadt Wien und den Betriebseinnahmen der Wiener Linien festgelegt. Die Wiener Linien müssen für die Dauer des Vertrages genau beschriebene Leistungen erbringen und erhalten dafür einen finanziellen Ausgleich von der Stadt Wien zur Abgeltung der gemeinwirtschaftlichen Anforderungen betreffend Qualität und Quantität des Leistungsangebots. Die jährlichen Zuwachsraten für die folgenden Jahre bei den zu erbringenden Kilometerleistungen von Bus, Straßenbahn und U-Bahn wurden ebenfalls vertraglich festgehalten [29, S. 150].

Durch die Verwirklichung von zwei Rechnungskreisen für „**Verkehrsinfrastruktur**“ und „**Verkehrsdienstleistungen**“ sollte die Transparenz der Geldströme für die finanzierende Gebietskörperschaft erhöht werden [29, S. 149].

Laufende Betriebs- und Erhaltungskosten der Verkehrsinfrastruktur werden durch den Rechnungskreis „Verkehrsdienstleistungen“ über das eingenommen Benützungsentgelt finanziert. Bei Investitionen (Ersatzmaßnahmen, Neubau) wird die Finanzierung von der Stadt Wien übernommen. Die Aufrechterhaltung und ständige Verbesserung des Qualitätsstandards der Leistungen gegenüber dem Kunden ist ebenfalls Bestandteil des Vertrages und wird, verglichen mit den Referenzwerten aus dem Jahre 1999, mit Hilfe der ÖNORM EN 13816 [30] evaluiert [31, S. 30].

Des Weiteren werden die Wiener Linien im ÖPNV-Vertrag zur Implementierung eines Qualitätsmanagementsystems (QM-System) verpflichtet um die Kontrolle der vertraglich geregelten Leistungen zu ermöglichen [31, S. 30]. Die Kontrolle der Wiener Linien wird durch die Konzernrevision, das Kontrollamt der Stadt Wien sowie durch den Rechnungshof garantiert [32, S. 8].

3.3.1.2 Unternehmenszahlen

Die Wiener Linien sind mit 7.757 Mitarbeitern das größte ÖPNV-Unternehmen Österreichs. Das Verkehrsdienstleistungsangebot umfasst derzeit 5 U-Bahn-Linien mit einer Betriebslänge von 65,7 km, 32 Straßenbahnlinien mit einer Betriebslänge von 179 km und 83 Buslinien. Die Wiener Linien konnten in den letzten Jahren einen Fahrgastzuwachs verzeichnen. Während im Jahr 2000 ca. 724.9 Mio. Fahrgäste transportiert wurden, waren es im Jahr 2006 schon ca. 772.1 Mio. (Stand 2006) [33].

Der Modal Split (Verteilung der Verkehrsmengen auf die Verkehrsträger) der Stadt Wien ist in Abbildung 20 dargestellt und veranschaulicht die Bedeutung des ÖPNV in Wien.

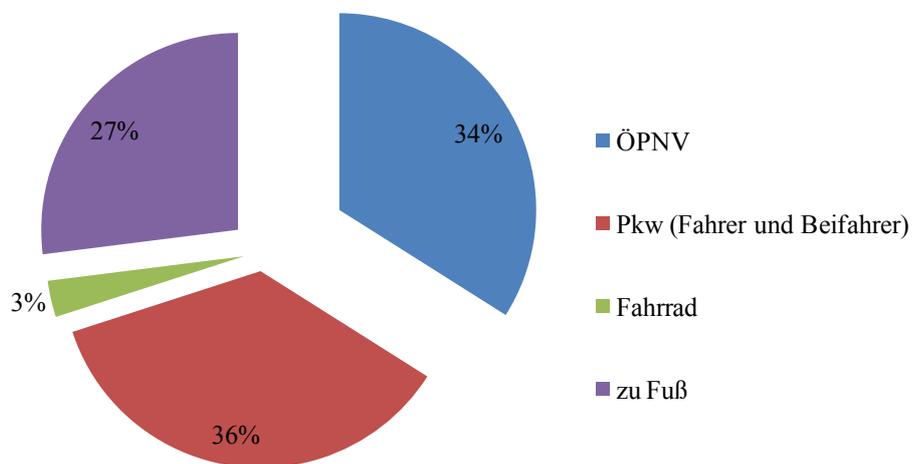


Abbildung 20: Modal Split in Wien, Stand 2004 [34]

Im Geschäftsjahr 2006 wurden mehr als 13.5 Mio. Euro in die Straßenbahngleisanlagen investiert. Das Straßenbahninfrastrukturnetz der Wiener Linien umfasst neben einer Gesamtgleislänge von 434,5 km auch 1.187 Weichen [33], und stellt somit eines der am besten ausgebauten Straßenbahnnetze der Welt dar.

3.3.1.3 Organisationsstruktur des Unternehmens

Primär weist die Unternehmensgliederung der Wiener Linien eine Aufteilung in einen **kaufmännischen Bereich**, die **Fahrzeugtechnik**, dem **Bau und Anlagenmanagement** und einen **betrieblichen Bereich** auf. Der kaufmännische Bereich ist der kaufmännischen

Geschäftsführung direkt unterstellt und in die Hauptabteilungen P2 „Personal und gemeinsame Dienste“ und K3 „Finanzen und Angebot“ gegliedert. Es sind jedoch mit den Abteilungen „Kaufmännische Dienste und Controlling“ auch in den anderen Hauptabteilungen kaufmännische Instanzen angeordnet.

Die Hauptabteilung F5 „Fahrzeugtechnik“ und B6 „Bau- und Anlagenmanagement“ unterstehen direkt der Geschäftsführung. In den betrieblichen Teil fällt die Abteilung V4 „Betrieb und Kundendienst“ [35].

Ein Organigramm der Wiener Linien ist dem Anhang 2 zu entnehmen.

3.3.1.4 Verpflichtung gegenüber dem Kunden

Die wichtigste Verpflichtung eines ÖPNV-Unternehmens ist die Verpflichtung gegenüber dem Kunden. Neben wirtschaftlichen Zielen stellt die Kundenzufriedenheit eines der obersten Unternehmensziele der Wiener Linien dar, was auch im ÖPNV-Vertrag gefordert wird. Die Messung der Kundenzufriedenheit wird auf Basis der ÖNORM EN 13816:2002-08-01 [30] durchgeführt. Der Hauptzweck der Norm besteht darin, das qualitätsorientierte Denken der ÖPNV-Unternehmen zu fördern sowie den Fokus auf die Bedürfnisse des Kunden zu richten [30, S. 4].

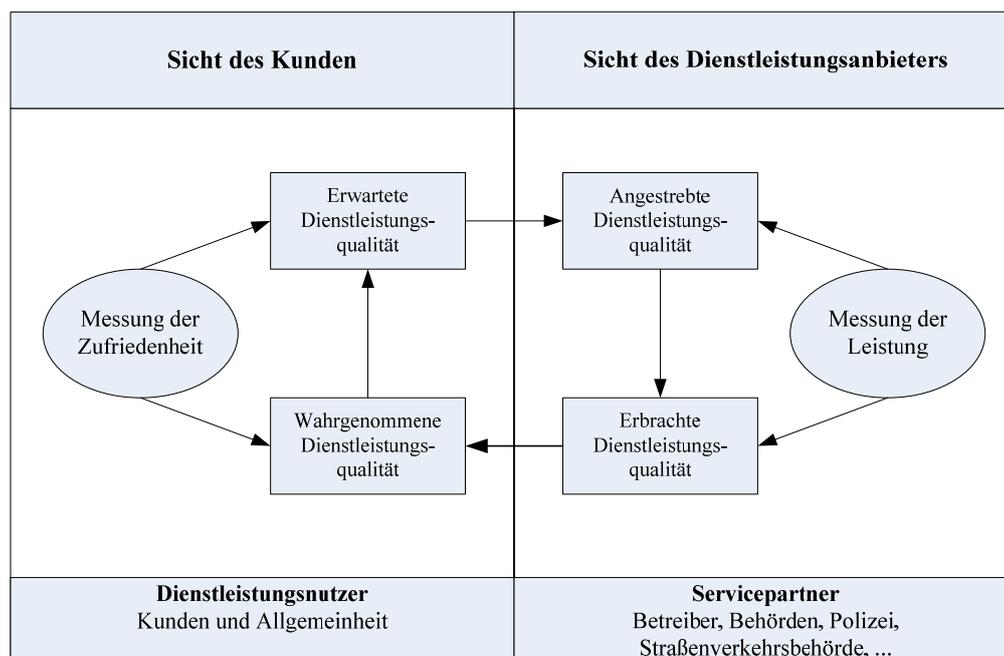


Abbildung 21: Dienstleistungs-Qualitätskreis [30]

Basierend auf dem Qualitätskreis für Dienstleistungen (Abbildung 21) werden die Beziehungen zwischen den vier unterschiedlichen Qualitätssichtweisen erläutert. Unter der **erwarteten Dienstleistungsqualität** wird jene Qualitätsstufe bezeichnet die implizit oder explizit vom Kunden erwartet wird. Die **angestrebte Dienstleistungsqualität** stellt die Qualitätsstufe dar, welche der Dienstleistungsanbieter für den Kunden, unter Berücksichtigung der finanziellen und technischen Grenzen, zu erbringen versucht. Die **erbrachte Dienstleistungsqualität** ist die im täglichen Betrieb aus der Sicht des Kunden erreichte Qualitätsstufe. Die **wahrgenommene Dienstleistungsqualität** ist die vom Kunden wahrgenommene Qualitätsstufe, abhängig von den Erfahrung mit der Dienstleistung und der Information die der Kunde hat [30, S. 7].

Die Differenz zwischen angestrebter und erwarteter Qualität kann als Maß für die Fähigkeit des Dienstleistungsanbieters gewertet werden, die Bemühungen auf die Bedürfnisse des Kunden zu richten. Der Unterschied zwischen angestrebter und erbrachter Qualität ist ein Indiz für die Effizienz des Unternehmens bei der Erreichung der festgelegten Ziele [30, S. 8].

Die **Kundenzufriedenheit** ist abhängig vom Verhältnis zwischen wahrgenommener und erbrachter Dienstleistung. Die Norm definiert acht Qualitätskriterien welche in der Wahrnehmung des Kunden eine entscheidende Rolle spielen [30, S. 8]:

- **Verfügbarkeit**
- Zugänglichkeit
- Information
- Zeit
- Kundenbetreuung
- Komfort
- Sicherheit
- Umwelteinflüsse

Es ist ersichtlich, dass die Verfügbarkeit des öffentlichen Verkehrs und damit auch die Verfügbarkeit der Infrastruktur einen wesentlichen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit und somit auch auf die Unternehmensziele der Wiener Linien haben.

3.3.2 Betriebliche Randbedingungen

Die im folgenden Abschnitt kurz beschriebenen Abteilungen B63 „Bahnbau“, B64 „Oberbau und Geodäsie“ und B68 „Elektro- und Maschinenteknik“ sind die für diese Arbeit relevanten betrieblichen Einheiten der Hauptabteilung B6 „Bau- und Anlagenmanagement“ (siehe Anhang 2).

3.3.2.1 Abteilung B63 „Bahnbau“

Die dauernde Bereitstellung von gewarteter und einwandfrei funktionierender Schieneninfrastruktur ist eine Verpflichtung gegenüber dem Kunden (siehe Abschnitt 3.3.1.4). Die Hauptaufgaben der Abteilung B63 sind die Anlagenerhaltung, die Anlagenerneuerung, die technische Inspektion und der Störungsdienst [36, S. 3]. Die bauliche Instandhaltung und Instandsetzung für das gesamte Gleisnetz von Wien mit einer Länge von 635,8 km [33] wird über diese Abteilung abgewickelt. Neubauten von U-Bahn-Anlagen werden über die Abteilung B67 „Neubau, U-Bahn-Planung“ durchgeführt, während Neubauten im Bereich der Straßenbahn ebenfalls in den Zuständigkeitsbereich von B63 fallen [36, S. 2].

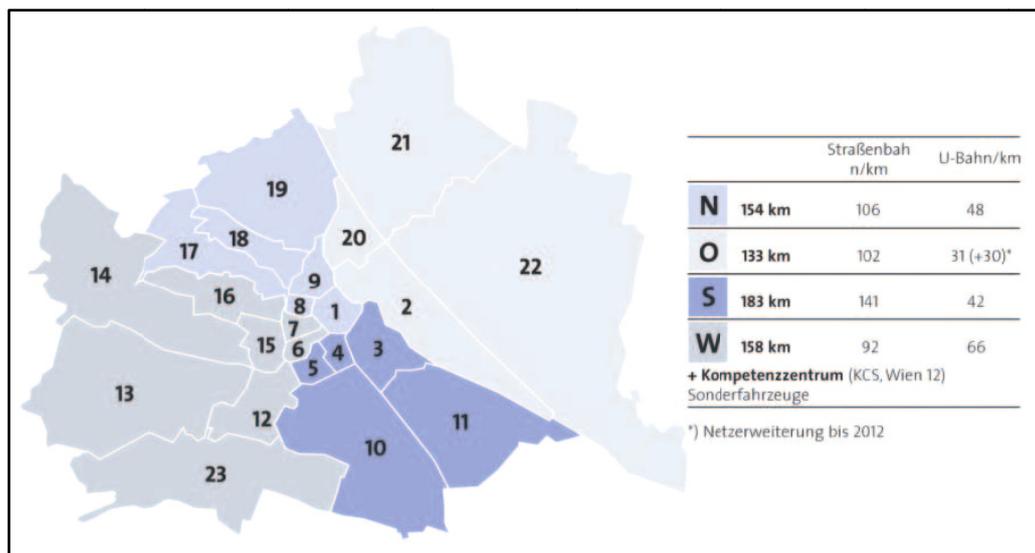


Abbildung 22: Die Großstrecken der B63 [36]

Das Wiener Streckennetz ist in die vier Teilbereiche Nord, Ost, Süd und West gegliedert (siehe Abbildung 22). Jeder dieser Teilbereiche beschäftigt ca. 85 Mitarbeiter (inkl. KCS)

und wird von jeweils einem Streckenmanager geleitet. Jeder Strecke sind drei Prozessmanager, zuständig für die drei Kernprozesse, zugeordnet (siehe Tabelle 4). Durch diese Matrixorganisation, welche eine Mischung aus Prozess- und Linienorganisation darstellt, ist ein praxisorientiertes, der Aufgabenvielfalt und Netzgröße angepasstes Handeln der Abteilung möglich. Es erfolgt im Allgemeinen keine Spezialisierung des Personals auf einen Prozess. So kann bei Bedarf jeder Mitarbeiter bei allen durchzuführenden Arbeiten tätig werden [36, S. 4]. Alle Teams greifen gleichermaßen auf die Sonderfahrzeuge zu, deren Disposition dem Kompetenzzentrum (KSC) Wien 12 unterliegt.

Eine Besonderheit bei der Instandhaltung im ÖPNV ist das kleine zur Verfügung stehende Zeitfenster um eine Instandhaltungsaktivität durchzuführen, ohne eine betriebliche Sperre zu verhängen. Dieses Zeitfenster dauert, je nach Straßenbahn- oder U-Bahnlinie, nur zwischen 3-5 Stunden pro Tag.

Streckenmanager	Nord	Ost	Süd	West
Prozessmanager 1 Überwachung, Störungsdienst, Wartung	P1	P1v	P1v	P1v
Prozessmanager 2 Instandsetzung, Erneuerung, Neubau	P2v	P2v	P2	P2v
Prozessmanager 3 Reinigung, Laub- und Winterdienst	P3v	P3v	P3v	P3

Tabelle 4: Matrixorganisation Abteilung B63 „Bahnbau“ [36, S. 4]

Alle Arbeiten von längerer Dauer müssen in den Betrieb eingreifen und Sperrpausen einrichten, was jedoch immer mit BEK verbunden ist. Die Entscheidung ob es zu einer betrieblichen Sperre kommt, fällt die Baustellenkoordination der B63 unter Zustimmung des Magistrats.

3.3.2.2 Abteilung B64 „Oberbau und Geodäsie“

Die Oberbauwerkstätte in Simmering ist Teil der Abteilung B64. Sie beschäftigt rund 140 Mitarbeiter und ist für das nötige betriebs- und bautechnische Zubehör verantwortlich. Auf dem Gelände der Werkstätte befindet sich auch das Oberbaumateriallager der Wiener

Linien. Die Produktion von Weichen und Kreuzungen (Anlagenbau) macht ca. 15% des Tagesgeschäfts der Werkstätte aus. Die restlichen Arbeiten sind der Produktion von Oberbauzubehör, der Durchführung und Überwachung von Verbindungs- und Auftragsschweißungen auf Gleisbaustellen sowie Transportdienstleistungen mit dem Knicksattelaufleger zuzuordnen [37, S. 21 f.]. Neben Kleinteilen wie Spurstangen und Laschen werden auch diverse Accessoires, wie z.B. Haltestellentafeln erzeugt. Die Herstellung von Rillenschienenweichen wird in Abschnitt 4.3.2 näher erläutert.

3.3.2.3 Abteilung B68 „Elektro- und Maschinentechnik“

Die Abteilung B68 ist für alle elektrischen Einrichtungen verantwortlich. Konkret auf die Rillenschienenweichen bezogen sind das die Weichenheizung und die elektrische Weichensteuerung. Der Abteilung B68 stehen momentan zwei Trupps, bestehend aus jeweils drei Mann, zur Verfügung um das gesamte Wiener Gleisnetz abzudecken. Beim Neubau von Rillenschienenweichen werden zwei Mitarbeiter der B68 in die Hauptwerkstätte bestellt um dort mit Hilfe der Arbeitskräfte der Abteilung B64 in ca. zwei Arbeitstagen die elektrischen Teile der Weiche zu montieren. Nach dem Einbau vor Ort erfolgt eine Funktionsprüfung und Abnahme der Anlage durch B68. Die Abteilung B68 ist auch für die Lagerung und Bereitstellung von Ersatzteilen sowie für die Inspektion und Wartung der elektrischen Anlagen verantwortlich.

3.3.2.4 Beanspruchung der Weichen

3.3.2.4.1 Betriebsbelastung

Die Belastung durch einen homogenen Fuhrpark, wie im SPNV (Schienenpersonen-Nahverkehr) üblich, unterscheidet sich sehr stark von jener Belastung, die bei Vollbahnen (überregionaler Verkehr) angetroffen wird und durch Mischverkehr aus Güter- und Personenverkehr entsteht. Dadurch vereinfacht sich die ganzheitliche Betrachtung des Rad/Schiene-Systems, da die Streuung der Achslasten, Geschwindigkeiten und Antriebstechniken im Vergleich zu Vollbahnen wesentlich geringer ist.

3.3.2.4.2 Interaktion Rad/Schiene

Die Tatsache, dass sowohl Bahnbau als auch Fahrzeuge von einem Unternehmen getragen werden, ermöglicht eine Betrachtung der Kosten über die Systemgrenzen hinweg. Es können mit Hilfe der gemeinsamen Betrachtung von Rad und Schiene die wesentlichen Degenerations- und Verschleißmechanismen der Komponenten unter Berücksichtigung der LCC von Fahrweg und Fahrzeug ermittelt werden [38, S. 845 ff.].

Werden die Kosten über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, zeigt sich der Vorteil integrierter Rad/Schiene-Planung durch geringere Gesamtkosten.

Die auftretenden Schienenverschleißerscheinungen können in Oberflächenermüdungsdefekte und innere Schienendefekte eingeteilt werden. Zu den Ersteren gehören Head Checks (Mikrorisse an der Fahrkante), Fahrflächenunebenheiten (Wellen, Riffeln) und Fahrkanten Shelling (progressive innere Abschälung an der Fahrkante). Beispiele für innere Schienendefekte sind Schienenkopfausbrüche, vertikale Risse im Schienenkopf sowie andere Schienenkopfdefekte [39, S. 46].

Vor allem im Bereich des Bogens tritt Spurkranzkontakt auf, wobei durch die geänderten Lasteinleitungspunkte gerade an der Fahrkante der Rillenschiene extreme, abrasive Verschleißerscheinungen auftreten [40, S. 28].

Um dieses Verschleißverhalten zu optimieren und somit die Lebensdauer der Bahnanlagen zu verlängern wurde viel Geld in die Erforschung der Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge investiert. Die Untersuchungen haben im Wesentlichen zu folgenden Schlussfolgerungen geführt:

- Die **Härte**, resp. der **Kohlenstoffgehalt des Stahles** haben einen entscheidenden Einfluss auf das zu erwartende Verschleißverhalten einer Schiene. Aus diesem Grund produziert die voestalpine Schienen GmbH eine feinperlitisch kopfgehärtete Rillenschiene, da diese einen höheren Verschleißwiderstand aufweist, als die üblicherweise zur Anwendung kommenden Schienen der Güte S700 [40, S. 28]. Die Mehrkosten durch die aufwendige Wärmebehandlung des Schienenkopfes können laut Hersteller durch die Einsparungen in der Instandhaltung leicht aufgewogen werden [40, S. 36].
- Die **Streckenführung** wirkt sich ebenfalls direkt auf das Verschleißverhalten von Schienen aus. Optimierte Trassierung (z.B. Wiener Bogen bei U-Bahn und

Vollbahn) kann, durch die Minimierung der auftretenden Kräfte und der damit verbundenen geringeren Abnutzung, die Lebensdauer ebenfalls entscheidend verlängern [41].

- Das **Schmieren der Schienen** in verschleißanfälligen Kurven mit starker Belastung kann die Reibung zwischen Rad und Schiene erheblich reduzieren. Durch eine Spurkranzschmierung wird der Abrieb beim Spießgang in engen Kurven minimiert. Eine Schmierung der Fahrfläche der bogenäußeren Schiene hingegen kann den durch den Schlupf verursachten Verschleiß verringern [42, S. 40].

Es wurden auch verschiedene Instandhaltungstätigkeiten auf Ihre Auswirkungen auf das Verschleißverhalten untersucht:

- Durch traditionelles **Schienen Schleifen** können Oberflächendefekte beseitigt und eine homogene Oberflächenstruktur hergestellt werden. Diese zustandsorientierte Instandhaltung (siehe Abschnitt 2.2.2.3) führt durch eine Minimierung der Reibung zwischen Rad und Schiene zu einer Verminderung der inneren Materialermüdung. Die Problematik beim Schienenschleifen besteht im hohen Materialabtrag am Schienenkopf. Diese Entfernung des Abnutzungsvorrats kann beträchtlich sein, da die Defekte oft eine bedeutende Größe annehmen bevor es zu einer schleiftechnischen Behandlung kommt [39, S. 46].
- Unter **Profilschleifen** versteht man das häufigere Schleifen einer Schiene mit sehr wenig Materialabtrag. Es stellt eine zeitgesteuerte periodische Instandhaltung dar (siehe Abschnitt 2.2.2.2) und ermöglicht eine längere Aufrechterhaltung der Form des Schienenkopfes wodurch die optimale Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene erhalten bleibt [39, S. 46].

Die Aufzählung der möglichen Optimierungspotentiale veranschaulicht deutlich, dass eine Minimierung des Verschleißes und die damit einhergehende Maximierung der Lebensdauer nur durch eine gemeinsame Betrachtung des Rad/Schiene-Systems möglich sind. Eine Trennung der Komponenten würde ein „gegeneinander Arbeiten“ zur Folge haben, da beispielsweise sehr harte, verschleißarme Räder auf der Fahrzeugseite eine Verbesserung darstellen, auf der Schienenseite jedoch durch erhöhten Abrieb die Liegedauern verkürzen.

3.3.2.4.3 Verschmutzung

Im Normalfall werden Rillenschienenweichen in straßenbautechnischer Bauweise in die Fahrflächen des gemischten Verkehrs eingebettet. Die Straßenbahn teilt sich die Verkehrsfläche mit Lkws, Bussen, Autos, Motorrädern, Fahrradfahrern und Fußgängern. Die Verschmutzung durch Staub, Sand und Streugut ist im Vergleich zu einer Anlage mit eigenem Bahnkörper deutlich höher. Ein weiteres, nicht zu vernachlässigendes Problem stellt der Laubfall im Herbst dar. Um einen reibungslosen Betrieb zu ermöglichen, müssen die verschmutzten Weichen regelmäßig gereinigt werden. Diese Reinigung erfolgt mit warmem Druckwasser. Die Abteilung B63 setzt für jede der vier Großstrecken (N, O, S, W) jeweils einen Spritzwagen ein. Diese Einsatzfahrzeuge sind für die Reinigung der Rillenschienen und Weichen sowie für kleinere Instandsetzungsarbeiten zuständig.

Weichen, die aufgrund ihrer Lage oder durch schlechte Entwässerung schneller verschmutzen und somit auch öfter zu einer Störung neigen, werden von der B63 als „Problemweichen“ identifiziert und in engeren Intervallen inspiziert und präventiv gereinigt. [Quelle: Gespräch mit Hr. Roman Weber, Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung B63 „Bahnbau“, 28. Feb. 2008]

3.3.2.5 Örtliche Gegebenheiten

Bei der Verwendung von straßenbautechnischen Oberbauten muss berücksichtigt werden, dass die Verkehrsfläche mit dem Individualverkehr und eventuell auch mit Bussen der Wiener Linien geteilt werden muss. Eine Sperre durch Instandhaltungsmaßnahmen kann somit neben klassischen BEK (siehe Abschnitt 2.4.1.3) auch noch Auswirkungen auf andere Betriebszweige der Wiener Linien sowie den Individualverkehr haben, die nicht monetär bewertbar sind.

Eine Problematik stellt der Einsatz von schwerem Gerät dar. Oft erlauben die beschränkten örtlichen Gegebenheiten den Einsatz von langen Einsatzfahrzeugen bzw. die optimale Installation der Baustelleneinrichtung nicht und es müssen Kompromisse eingegangen werden, die zu einem Mehraufwand und somit auch zu höheren Kosten führen.

Wird im Zuge von Straßenbau- oder Kanalarbeiten eine Straße für den Verkehr ganz oder teilweise gesperrt, so kommt es vor, dass die Wiener Linien diese Situation nutzen müssen um Instandhaltungsarbeiten an der dortigen Infrastruktur vorzunehmen, da nach Erneuerung der Straßenoberfläche ein Bauverbot erteilt wird. Der Aufwand für die Genehmigungen fällt zwar teilweise weg und die Instandhaltungsaktion kann mit geringeren Kosten durchgeführt werden, jedoch ist die Anpassung des Instandhaltungstermins an externe Vorgaben auch kritisch zu betrachten: Die Liegedauer der Infrastruktur wird nicht optimal ausgeschöpft. Dies hat wiederum höhere jährliche Abschreibungen zu Folge. Eine vorzeitige Ersatzinvestition, wie sie oben beschrieben ist, macht eine LCC/RAMS-Betrachtung sehr schwierig, da sich die Prognosen über die Lebensdauer und die Instandhaltungsintervalle, welche die Basis für die LCC-Berechnung darstellen, als fehlerhaft herausstellen.

4 Erstellung des LCC-Modells

4.1 Lebenszyklusphasen einer Rillenschienenweiche

Die Straßenbahninfrastruktur ist ein langlebiges Investitionsgut. Die zu erwartende Lebensdauer von Rillenschienenweichen beträgt zwischen 15 und 20 Jahren, manchmal auch mehr. Es ist evident, dass bei Liegezeiten dieser Größenordnung der Betriebsphase aufgrund der in dieser Zeitspanne durchgeführten Instandhaltungstätigkeiten eine große Bedeutung zukommt. Unter dem Einbau in der Einbauphase wird in der Oberbauwirtschaft der Neubau oder die Erneuerung der gesamten Anlage verstanden. Der Austausch von Einzelkomponenten fällt unter den Begriff „Instandsetzung“ (siehe Abschnitt 2.2) und ist somit Teil der Betriebsphase.

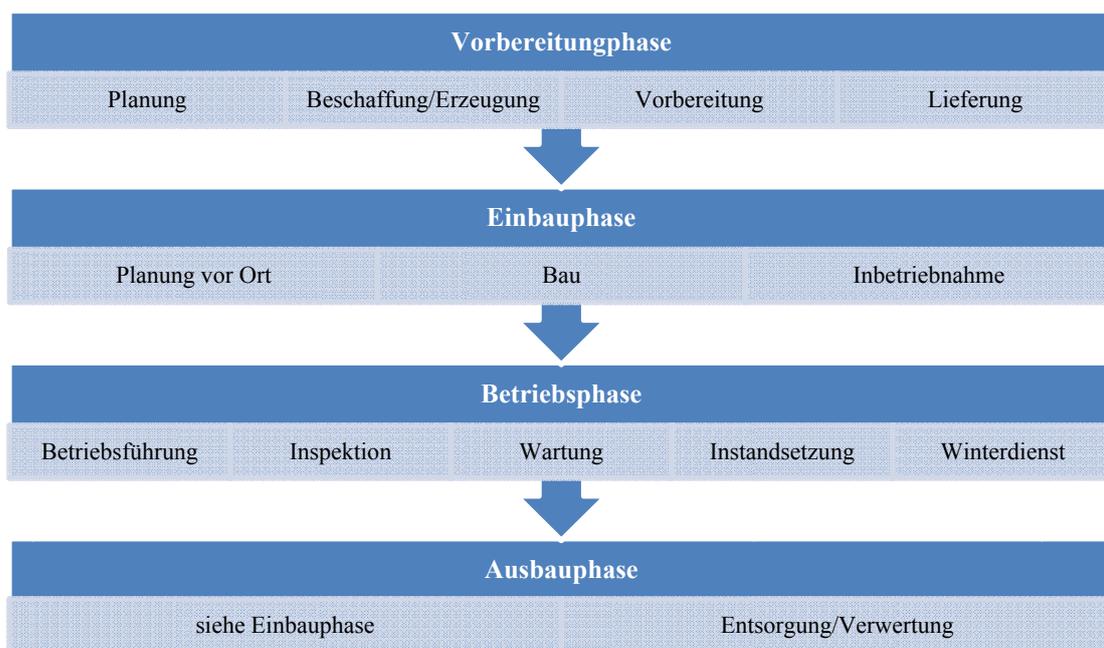


Abbildung 23: Lebenszyklusphasen einer Rillenschienenweiche

In Abbildung 23 sind die Lebenszyklusphasen einer Rillenschienenweiche graphisch dargestellt. Der Ablauf, so wie er in Abbildung 23 dargestellt ist, trifft aber nur bei einer Neubaustrecke beim ersten Einbau einer Weiche an einer Stelle zu. In der Realität werden aber in der Wiener Straßenbahninfrastruktur nur wenige Weichen neu platziert. Der Großteil der neuen Weichen wird als Ersatz für schadhafte Anlagen eingesetzt. Aufgrund

des ständigen Nutzungsanspruchs einer Rillenschienenweiche ist der Ausbau der ausgedienten Anlage verfahrenstechnisch direkt mit dem Einbau der neuen Anlage verbunden.

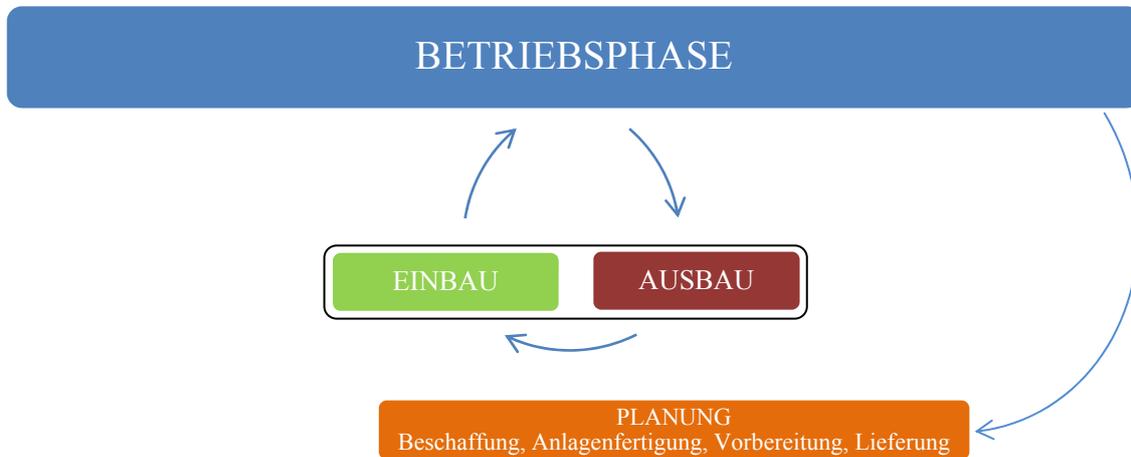


Abbildung 24: Prozess-Kreislauf einer Ersatzinvestition

Die Phasen „Ausbau“ und „Einbau“ verschmelzen im Rahmen einer Ersatzinvestition miteinander. Zeitlich etwas versetzt wird die Planung der Ersatzinvestition als Parallelprozess durchgeführt. Die Beschaffung, die Erzeugung der neuen Anlage und die Arbeitsvorbereitung erfolgen noch in der Betriebsphase ohne auf die Verfügbarkeit der Anlage Einfluss zu nehmen. Mit Beginn der Ausbauarbeiten muss die Strecke für den Betrieb gesperrt werden. Ausbau, Anlieferung der neuen Anlagenteile, Einbau und Inbetriebnahme laufen nun koordiniert nebeneinander ab. Dieser Kreislauf der Ersatzinvestition ist in Abbildung 24 dargestellt.

4.1.1 Vorbereitungsphase

Da ein Weichenaustausch ein komplexes Bauvorhaben darstellt ist in der Vorbereitungsphase die Zusammenarbeit zwischen den Dienststellen der Bahnbau-, Betriebs- und Elektroabteilung entscheidend. Die Dauer dieser Phase variiert je nach Anlage, kann aber im Mittel mit 6-9 Monaten angegeben werden. Die Vorbereitungsphase gliedert sich in die **Planungsphase** und die anschließende **Anlagenfertigung**. Nach einer Schadensmeldung über eine defekte Weiche oder bei einem geplanten Austausch einer Weiche wird zuerst die Planung der neuen Anlage durchgeführt. Die alten Pläne der

ausgedienten Anlage müssen eventuell an neue Gegebenheiten angepasst werden. Es folgt die Beschaffung der nötigen Anlagenteile und die Erzeugung der Anlage in der Werkstätte (Ablauf der Weichenfertigung siehe Abschnitt 4.3.2). Nach Vorbereitung der Weiche zum Abtransport müssen die Teil-Lieferungen mit dem Aus- und Einbau auf der Baustelle koordiniert werden. Die nötigen Genehmigungen werden während dieser Phase von der Baustellenkoordination erwirkt.

4.1.2 Einbauphase

Die Dauer der Einbauphase variiert je nach örtlicher Gegebenheit, kann im Mittel aber mit ca. 2 Wochen angegeben werden. Neben der Planung vor Ort und dem Ausbau der alten und Einbau der neuen Anlage an sich umfasst die Einbauphase auch den Test der Weiche, die Abnahme und die Inbetriebnahme.

4.1.3 Betriebsphase

Die Betriebsphase umfasst mehr als 95% des gesamten Lebenszyklus. Abgesehen von der Betriebsführung, auf welche in dieser Arbeit nicht eingegangen wird, fallen in dieser Phase durch die Instandhaltung beträchtliche Kosten an. Um eine einwandfrei funktionierende Weiche zur Verfügung zu stellen, muss die Anlage regelmäßig gereinigt und instandgehalten werden. Die intervallmäßige Inspektion, Wartung und Instandsetzung bedeutet einen hohen personellen und materiellen Aufwand.

4.1.4 Ausbauphase

Die Ausbauphase ist, wie anfangs dieses Abschnittes erwähnt, mit der Einbauphase direkt verknüpft. Die Planung des Ausbaus, den Abtransport und die Entsorgung/Verwertung sind in die Planung des Einbaus integriert (siehe Abbildung 24).

4.2 Produktstruktur einer Rillenschienenweiche

4.2.1 Befahrbare Oberbauelemente

4.2.1.1 Zungenvorrichtungen

Die bewegliche Weichenkomponente „Zunge“ stellt das Kernelement einer Weichenanlage dar. Sie wird je nach gewünschter Fahrtrichtung, an die Backenschiene (B) oder an der Beischiene angelegt und fixiert. Die Zunge gleitet dabei über die Zungengleitplatte, eine erhöhte Auflagefläche auf der sich die Zunge hin- und her bewegen kann.

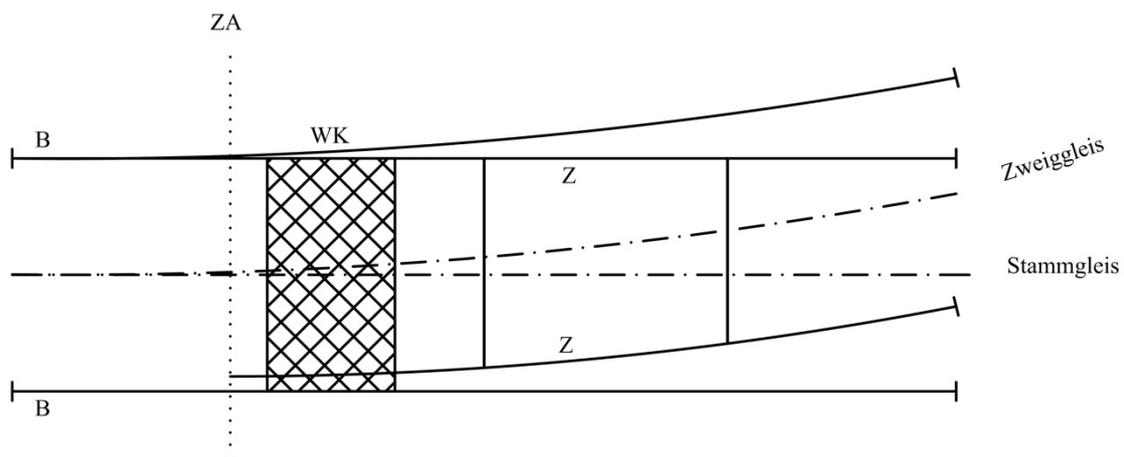


Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zungenbereichs

Die Wiener Linien verwenden für Rillenschienenweichen Federzungenvorrichtungen mit den Radien $r = 20, 35, 50$ und 100 m. Der vordere, auf der Zungengleitplatte aufliegende Teil der Zunge (Z) wird aus einem gewalzten Zungenprofil hergestellt und zugefräst. Die Zunge besitzt eine Federstelle, welche mittels einer seitlichen Schwächung des Querschnitts durch Abfräsen hergestellt wird. In der Straßenbahninfrastruktur der Wiener Linien gibt es zwei Ausführungsvarianten von Zungenvorrichtungen:

Bei der älteren Methode der **angeschweißten Federzungen** wird am hinteren Anschweiß-Ende der Zunge mittels Abtrennstumpfschweißverfahren ein Regelschienenprofil mit einer Länge von ca. 50 cm angeschweißt. Diese Anschlussschiene liegt auf der Grundplatte auf

und ist mit dieser fest verschraubt. Der Austausch einer schadhaften Zunge kann auf zwei Arten erfolgen. Beim Zungentausch „kurz“ wird die Zungenschiene im Bereich des Zungenprofils abgetrennt und eine neues Zungenprofil angeschweißt. Ein Tausch dieser Art kann nur einmal erfolgen. Bei einem erneuten Schaden wird ein Zungentausch „lang“ angewandt. Bei diesem Verfahren wird zusätzlich zum Zungenprofil auch ein Teil des Regelprofils mit abgetrennt. Es wird eine neue „lange“ Zunge am Regelprofil angeschweißt. Eine Darstellung der Federzunge sowie der beim Zungentausch verwendeten Schnittlinien ist der Abbildung 26 zu entnehmen.

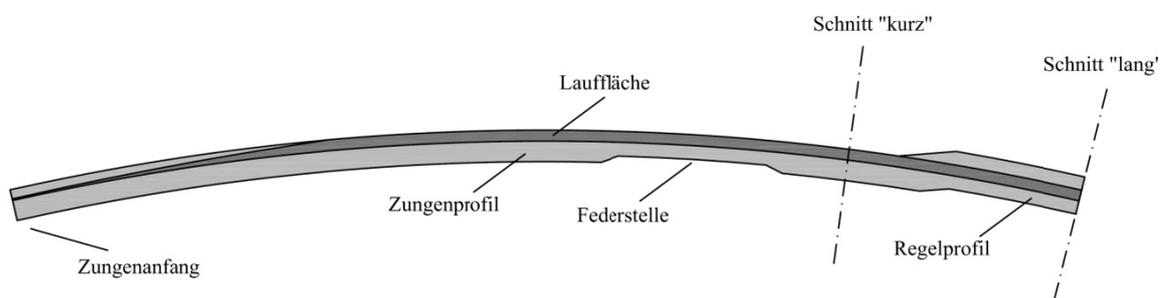


Abbildung 26: angeschweißte Federzungenvorrichtung

Neuere Modelle besitzen einen **keilartigen Stoß des Zungenendstücks** und ermöglichen so einen schnellen Austausch der verbrauchten Zunge ohne Schweißarbeiten und ohne die Straßenoberfläche aufzubrechen (siehe Abbildung 27). Die Fixierung der Zunge erfolgt durch eine Klemmplatte.

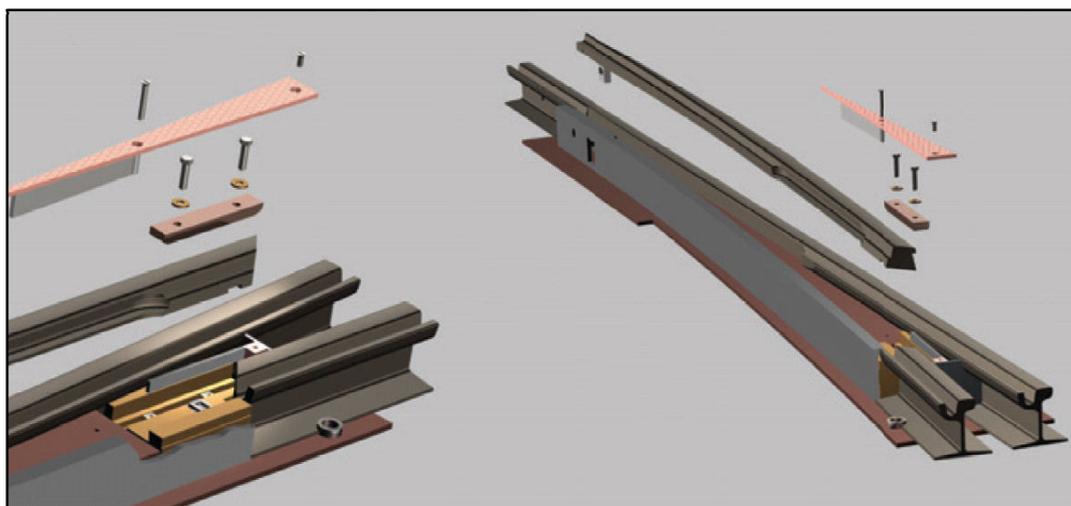


Abbildung 27: Federzunge mit Keilvorrichtung der VAE [43, S. 4]

Die Problematik bei dieser Bauart besteht oftmals im Lösen der Schrauben der Abdeckung, da es aufgrund der Verkehrsbelastung und des Streusalzes zum Verkeilen der Schrauben kommen kann.

4.2.1.2 Schienen

Für die Backenschienen, die Zwischenschienen zwischen Zungenvorrichtung und Herzstück sowie die Anschweißschienen werden Regelschienenprofile 63Ri (Ri210/95+80a) von der voestalpine Schienen GmbH verwendet, welche den Plänen entsprechend zugeschnitten werden. Details und Abmessungen dieser Rillenschienen sind dem Datenblatt [44] in Anhang 4 zu entnehmen.

4.2.1.3 Herzstück

Das Herzstück wird aus einer Bramme hergestellt, die je nach Kreuzungswinkel zugeschnitten wird. Die Bramme wird auf 210 mm plangefräst und dann werden die Spurrillen eingefräst.

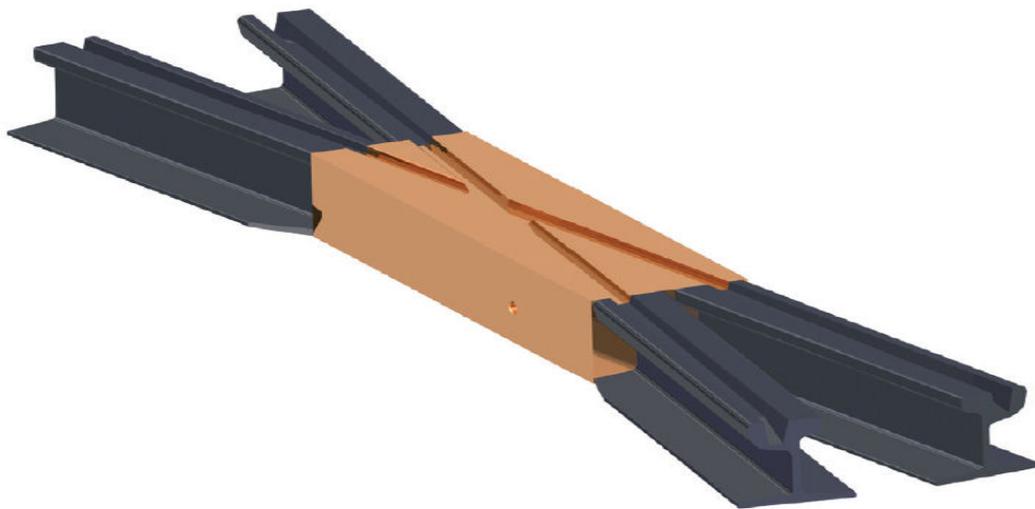


Abbildung 28: Rillenschienenherzstück [43, S. 6]

Eine schematische Darstellung eines Rillenschienenherzstücks ist der Abbildung 28 zu entnehmen. Die Rillentiefe im Herzstück ist im Vergleich zu jener in der Rillenschiene geringer, deshalb werden die Rillen mit einer Anrampung versehen. Dies soll vertikale Stöße bei der Überfahrt der Rillenkreuzungspunkte vermeiden [45, S. 51]. Ohne eine Verringerung der Rillentiefe würden die Spitzen der Herzstücke nach kürzester Zeit abbrechen.

4.2.2 Schienenbefestigung/Eindeckung

4.2.2.1 Spurstangen

Die Spurstangen dienen der Spurhaltung der Schienen. Sie werden mittels Spurstangenschrauben befestigt. Die Regulierung der Spurweite erfolgt mittels Spurausgleichsplättchen, welche zwischen Spurstange und dem Steg der Rillenschienen angebracht werden. Eine Verbreiterung der Spurweite ist bei kleinen Kurvenradien notwendig um einen Spießgang der Räder zu vermeiden.

4.2.2.2 Niederhalter

Bei jeder Spurstange wird die Gleislage mit einem Niederhalter fixiert. Über einen Stahlwinkel wird die Schiene mit der Betonplatte verschraubt.

4.2.2.3 Unterkonstruktion

4.2.2.3.1 Körperschallgedämmte Bauweise

Auf dem Unterbeton werden mit PAE-Folie umhüllte Gummigranulatplatten mit einer Dicke von ca. 6 cm verlegt, die eine schwingungstechnische Entkopplung bewirken. Darauf werden die Gleistragplatten gelagert. Die Gummigranulatplatten werden seitlich an den Gleistragplatten und in weiterer Folge entlang den Einlagesteinen bis an die

Oberfläche hochgezogen, um eine Schallbrücke zu verhindern. Zwischen der Betonplatte und dem Schienenfuß werden Gummipplatten mit einer Dicke von 17 mm verlegt. Im innerstädtischen Bereich werden alle Weichenanlagen und Streckengleise in körperschallgedämmter Bauweise ausgeführt.

4.2.2.3.2 Alte Bauweise

Die Weiche wird auf einer 30 cm dicken Stahlbetonplatte montiert. Zwischen der Betonplatte und dem Schienenfuß werden Gummipplatten mit einer Dicke von 17 mm verlegt.

4.2.2.4 Eindeckung

Im Bereich zwischen und neben den Schienen wird die Oberfläche mit 15cm dicken Stahlbetongroßflächenplatten versiegelt, welche auf einer 8 cm Schicht Splitt 5/8 gebettet sind. Der Raum über dem Schienenfuß wird mit Einlagesteinen aufgefüllt.

4.2.2.5 Spitzeinlagen

Spitzeinlagen sind aus Tränenblech gefertigte Konstruktionen, die in die spitzwinkligen Freiräume bei den Herzstücken eingebaut werden. Sie werden mit der Weichenkonstruktion verschraubt und dann oben fest mit den Gleisen verschweißt.

4.2.3 Stellvorrichtung

Die Stellvorrichtung ist im Weichenkasten situiert. Der Weichenkasten muss von stabiler Bauart sein um den Belastungen aus Bahnbetrieb und Individualverkehr standzuhalten. Des Weiteren muss der WK eine Entwässerung am tiefsten Punkt aufweisen um einen ständigen Kontakt der Mechanik und der elektrischen Teile mit Wasser zu verhindern. Die Übertragung der Kraft vom Stellzylinder auf die Zungen erfolgt über die Zungenzapfen.

Bis zum Jahr 2006 kamen bei den Wiener Linien Stellwerke von Hanning & Kahl zur Verwendung. Die im Zuge dieser Analyse behandelten Anlagen wurden alle mit diesem System ausgestattet. Die Vereinigungsweichen (siehe Abschnitt 3.2.1.4) waren mit einem Kolben ausgestattet, der die Zunge nach dem Aufschneiden durch die Straßenbahn fixiert. Bei spitzer Befahrung muss diese Einheit von Hand gestellt werden. In Verzweigungsweichen (siehe Abschnitt 3.2.1.3) wurde die Umstelleinheit HW-40 eingebaut. Dieses System ist mittlerweile veraltet und wird sukzessive durch neuere Systeme ausgetauscht. Da die Versorgung mit Ersatzteilen mittlerweile schwierig ist, werden alte, ausgebaute Stellwerke als Ersatzteillager verwendet und aufbewahrt.

Neuere Anlagen werden mit Stellvorrichtungen der voestalpine Schienen GmbH ausgerüstet. Für Vereinigungsweichen (siehe Abschnitt 3.2.1.4) wird die Umstelleinheit **VS-20 ID** verwendet, welche bei Stumpffahrten ebenfalls einfach aufgeschnitten wird. Diese Anlage kann wenn nötig auch als Rückfalleinrichtung ausgeführt werden. Diese kommen bei den Wiener Linien aber nur in Ausnahmesituationen zum Einsatz. Bei spitzer Befahrung muss diese Einheit genauso wie das Vorgängermodell von Hand gestellt werden.

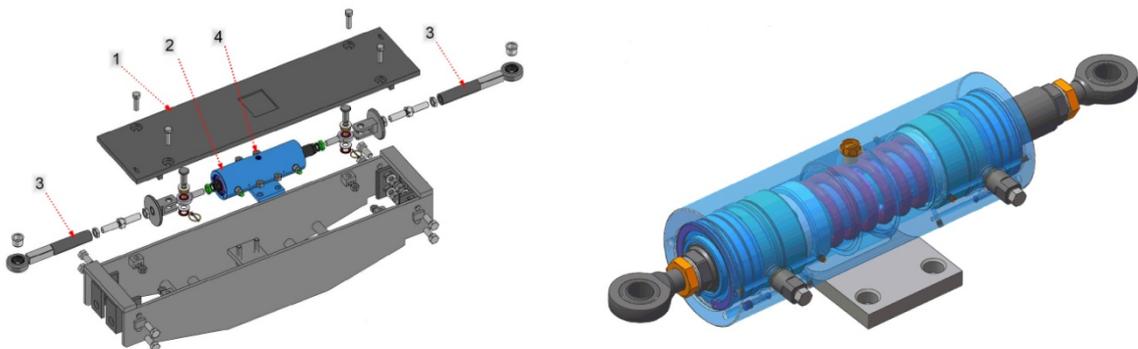


Abbildung 29: Umstelleinheit VS-20 [46, S. 4 f.]

In Abbildung 29 ist links der Weichenkasten als Explosionszeichnung und rechts die Federwippe im Detail dargestellt. Die Grafik wurde dem Ersatzteilkatalog für diesen Antrieb von der voestalpine Schienen GmbH entnommen. Die Nummern definieren die Ersatzteile, die einzeln zu bestellen sind.

Bei Verzweigungsweichen (siehe Abschnitt 3.2.1.3) kommt der Weichenantrieb **VS-60** der voestalpine Schienen GmbH (siehe Abbildung 30) zum Einsatz. Diese Antriebe können bei stumpfer Befahrung ebenfalls aufgefahren werden. Bei spitzer Befahrung wird die Anlage über Induktion gestellt (siehe Anhang 3).

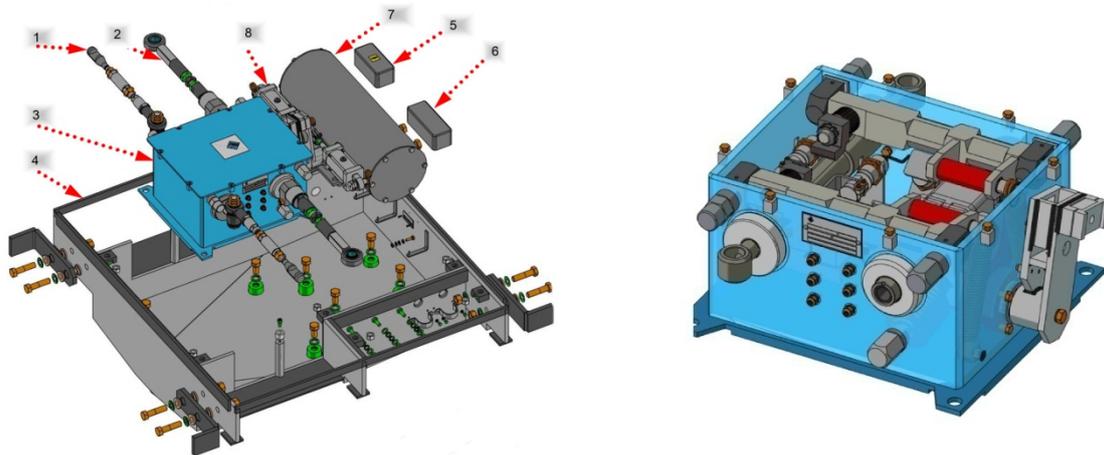


Abbildung 30: Weichenantrieb VS-60 [46, S. 11, 15]

Die Grafik wurde ebenfalls dem Ersatzteilkatalog für diesen Antrieb von der voestalpine Schienen GmbH entnommen. Die Nummern definieren die Ersatzteile, die einzeln zu bestellen sind.

In einzelnen Fällen kommt auch das neue Modell HW-61 der Firma Hanning & Kahl zum Einsatz. Aufgrund der seltenen Verwendung und der prinzipiell ähnlichen Arbeitsweise wird auf dieses Modell in Rahmen dieser Arbeit aber nicht eingegangen.

4.2.4 Weichenheizung

Um ein Anfrieren der Zunge an der Backenschiene oder an der Zungenplatte bei tiefen Temperaturen zu vermeiden, wird bei Weichen standardmäßig eine Weichenheizung vorgesehen. Durch die Installation zweier Heizstäbe an den Schienen im Bereich der Zungengleitplatten mit jeweils 1050 W, wird unter normalen Umständen eine Eisbildung im Zungenbereich verhindert. Die Heizstäbe werden durch Schutzrohre in rostfreier Ausführung vor Korrosion geschützt.

4.2.5 Hilfsstoffe

Hilfsstoffe sind Stoffe die zur Herstellung des Produkts verbraucht werden, aber keinen wesentlichen monetären oder mengenmäßigen Anteil einnehmen. Hierzu gehören Schrauben, Schweißpulver, Schweißdraht, Kleber, Kleinmetalle, etc.

4.2.6 Betriebsstoffe

Betriebsstoffe sind Stoffe die zur Herstellung des Produkts benötigt werden, aber nicht in das Produkt einfließen. Hierzu gehören Treibstoffe, Schmiermittel, Strom, Reinigungsmittel, etc.

4.3 Kostenaufgliederung einer Rillenschienenweiche

4.3.1 Planung/Vermessung

Die Planung/Vermessung erfolgt in der Vorbereitungsphase und erfordert die Zusammenarbeit zwischen den Dienststellen der Bahnbau-, der Betriebs- und der Elektroabteilung. Der Aufwand und die damit verbundenen Kosten sind je nach Anlage sehr verschieden. Neben den Personalkosten für Vermessung, Planerstellung, Detailplanung und Bauablaufplanung fallen Kosten für Leitung und Administration an, welche aber im Overhead der Stundenlöhne der Mitarbeiter inkludiert sind.

4.3.2 Weichenfertigung im Werk

Die von der voestalpine Schienen GmbH gelieferten, direkt aus dem Werk kommenden Gleise und Brammen werden hier gemäß den vorliegenden Plänen unter Einsatz von Bandsägen und Brenn- und Plasmaschneideanlagen zugeschnitten. Der nächste Schritt ist das Bohren der Löcher für die Spurstangen. Im Normalfall werden die Löcher schon im Werk gebohrt oder, wie in der neuen Norm erlaubt, gestanzt. Nun werden die Gleise mit Hilfe einer Schienenbiegemaschine gebogen. Das Biegen der Schienen geschieht nach einem Ausweis der Biegeschiene, auf dem alle wesentlichen Angaben über die zu biegende Schiene angeführt sind (Gerade und gebogene Länge, Pfeilhöhe,...). Das Biegen mit Rollen wird aufgrund der Ungenauigkeit an den Enden der Schienen, die später abgeschnitten werden müssen, in der Werkstätte der Wiener Linien nicht verwendet. Es kommen Biegemaschinen mit hydraulischen Stempeln zum Einsatz. Es folgt das Zusammenschweißen der Komponenten mit anschließendem Planschleifen in der Halle des Anlagenbaus. Um die Passgenauigkeit zu garantieren wird ein Probezusammenbau der fertigen Anlage durchgeführt. Nach Abnahme wird die Rillenschienenweiche in transportfähige Einzelteile zerlegt und zum Abtransport vorbereitet.

[Quelle: Gespräch und Besichtigung der Oberbauwerkstätte mit Hr. Josef Gaunerstorfer, Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung B64 „Oberbau und Geodäsie“, 25. Feb. 2008]

4.3.3 Bau

Die Dauer des Einbaus kann, je nach örtlicher Gegebenheit, mit ca. 2 Wochen angegeben werden und erfordert eine zeitweise betriebliche Sperre der Gleise.

4.3.3.1 Ausbau

Vor dem Ausbau werden alle Schraubverbindungen gelöst, gangbar gemacht und geölt. Die Rillenschienenweiche wird freigelegt und die Schienen im Trennschnittbereich gereinigt um die Dauer des Ausbaus in der Sperrpause zu minimieren. Ebenfalls Teil der Ausbauvorbereitungen sind das Verschließen der Weichen- und Schienenentwässerung sowie der Ausbau des Antriebskasten und der Weichenheizung. Durchgeführte Trennschnitte können bis kurz vor dem Ausbau mit Laschen gesichert werden.

Es folgt der Ausbau der auszuwechselnden Weiche mit Hilfe eines Kranes. Die Teile werden auf Transportwagen verladen, zum Lagerplatz abtransportiert und dort auseinanderggebaut und nach Möglichkeit einer Wiederverwendung zugeführt [47, S. 18].

4.3.3.2 Einbau

Die neue Weiche wird in der Werkstätte unter Berücksichtigung der Einbaurichtung auf den Transportwagen geladen und zur Baustelle geliefert. An der Einbaustelle wird die Anlage gemäß den von der Werkstätte gefertigten Verlegeplänen auf den vorbereiteten Untergrund abgelegt. Die Stoßlücken werden nach den Verlegeplänen angeordnet und mit Laschen überbrückt. Die Weiche wird nun in Höhe und Seite gemäß der Absteckung eingerichtet. Die provisorische Unterstellung wird nach dem Feinausrichten gegen eine mit der Betonunterkonstruktion verträglichen, verlorenen Unterstellung ausgetauscht. Es folgt die Herstellung einer Schalung und anschließend die Verfüllung mit Beton. Nachdem der Beton erhärtet ist werden die Gummimatten unter den Schienenfüßen eingebracht. Ausgehend vom Herzstück werden die Anlagenkomponenten jetzt miteinander verschweißt und danach die Eindeckung eingebracht [47, S. 20 f.].

4.3.3.3 Abnahme

Jede neu eingebaute oder ausgewechselte Weiche ist vor der Inbetriebnahme nochmals nachzuprüfen. Es erfolgt eine Kontrolle des planmäßigen Einbaus aller Anlagenteile. Nach Freigabe der Anlage durch den Aufsichtsführenden wird die Weiche nach den ersten Zugfahrten nochmals im Zungen- und Herzstückbereich auf Anlaufstellen untersucht. Gegebenfalls erfolgt eine Nachbearbeitung.

4.3.4 Technische Überwachung

Die Technische Überwachung stellt einen der drei Kernprozesse der Abteilung B63 „Bahnbau“ dar. Die Aufgabe der „Technischen Überwachung“ ist die ständige Überprüfung des Anlagenzustands. Diese Daten sind nötig um die Planung der zustandsabhängigen Instandhaltungsaktivitäten (siehe Abschnitt 2.2.2.3) durchzuführen.

4.3.4.1 Streckenbegehung

Die Streckenbegehung des gesamten Gleisnetzes durch die Abteilung B63 erfolgt im Zuge der Reinigungsarbeiten mit dem Spritzwagen.

4.3.4.2 Weichen- und Kreuzungsprüfung

Die Abteilung B64 führt eine intervallmäßige Kontrolle der Weichen- und Kreuzungsanlagen durch.

4.3.4.3 Gleismesswagen

Der Gleismesswagen wurde von den Wiener Linien speziell für den Einsatz auf Rillenschienen entwickelt. Seit 2003 wird die Straßenbahninfrastruktur der Stadt Wien mit Hilfe des Gleismesswagens berührungslos abgetastet [48]. Das Messsystem besteht aus einem Inertialsystem, welches mit Kreiseln und Beschleunigungsaufnehmern die Fahrt des

Messwagens rekonstruieren kann, und einem System aus Lasern und Kameras, für die Abtastung des Schienen-Profiles. Je Seite sind jeweils drei Laser und Zeilenkameras angebracht. Die Laser strahlen auf die Gleise und erzeugen, je nach Oberfläche, einen rechteckförmigen Umriss. Die Umrissbilder dieser Rechtecke werden von den Zeilenkameras erfasst und in zweidimensionale Koordinaten umgewandelt. Mit Hilfe des Gleismesswagens kann der genaue, momentane Gleiszustand ermittelt werden. Die Messung liefert Werte über Geometrie, Gleislage, Verschleißwerte (Rillentiefe, Rillenbreite, Fahrkantenzustand) und GPS-Koordinaten. Die durch dieses sogenannte Lichtschnittverfahren gewonnenen Messdaten werden auf den unverschlissenen Leitschenkel bezogen, da die herkömmliche Fußpunktmethodemeist nicht möglich wäre. Das Profil wird alle 50 cm mit 300 Messpunkten abgespeichert [49, S. 4 ff.].

4.3.5 Wartung

4.3.5.1 Schmieren/Reinigen

Bei der Reinigung der Rillenschienenweiche kommt der Spritzwagen der Abteilung B63 zum Einsatz. Eine regelmäßige Reinigung der Weichen alle 1-2 Tage ist für die Verfügbarkeit evident, da Schmutz in der Zungenvorrichtung zum Verkeilen und somit zum Ausfall der Weiche führen kann. Der Zungenbereich wird 2 m vor der Zungenspitze bis 2 m hinter die Zungenwurzel ausgespritzt. Der Schmutz ist anschließend zu entfernen um eine wiederholte Verschmutzung zu verhindern [47, S. 27].

Die beweglichen Komponenten der Weiche müssen intervallmäßig, je nach örtlichen Gegebenheiten, geschmiert werden. Im Zungenbereich werden auch der Antrieb und das Gestänge geschmiert und geölt. Im Zuge dieser Wartung werden alle Teile der Stellvorrichtung auf Gängigkeit und eventuell vorhandene Schäden geprüft. Kleine Reparaturen, wie das Nachstellen der Zunge, Gratentfernung sowie Reinigung der Zungenaufgabe werden ebenfalls durchgeführt [47, S. 27].

4.3.5.2 Reinigung der Entwässerung

Die Schienenentwässerungsanlagen müssen regelmäßig gereinigt werden. Eine Kontrolle dieser Einrichtungen wird bei der Streckenkontrolle durchgeführt. Eine Reinigung der Absetzeinrichtungen und Schächte wird alle 6 Monate von der Abteilung B63 unter Einsatz eines Saugwagens durchgeführt [47, S. 27 f.]. Die Abteilung B68 ist bei der Reinigung der Entwässerung ebenfalls mit einem Trupp vor Ort um die elektrischen Anlagen zu überprüfen.

4.3.5.3 Vegetationskontrolle

Um die Wasserdurchlässigkeit der Eindeckung aufrecht zu erhalten ist eine Kontrolle des Bewuchses notwendig. Am effektivsten sind Maßnahmen, die im Frühjahr gesetzt werden, da der Samenflug verhindert wird. Seitliche Begrünung (Hecken, Sträucher) sind nach Bedarf ebenfalls zu schneiden [47, S. 28].

4.3.5.4 Winterdienst

Um der Vereisung der Anlagen entgegenzuwirken sind Rillenschienenweichen mit elektrischen Weichenheizungen ausgestattet, welche an den Außenseiten der Zungenvorrichtungen montiert sind und im Normalfall ein Anfrieren der Zunge an der Backenschiene bzw. auf der Gleitplatte verhindern (siehe Abschnitt 4.2.4). Bei Bedarf wird bei sogenannten „Problemweichen“ zusätzlich Personal („Weichenposten“) zur Überwachung der Weichenfunktion eingesetzt [47, S. 28].

Der klassische Winterdienst im Sinne von Schneeräumung wird im Zuge dieser Arbeit nicht angeführt, da die Umlage der Gesamtkosten auf eine einzige Weiche nicht sinnvoll wäre.

4.3.6 Planmäßige Instandsetzung

Bei Instandsetzungen der Straßenbahninfrastruktur durch die Abteilung B64 handelt es sich im Wesentlichen um eine Reprofilierung des Schienenkopfes durch Schleifen oder um eine Aufschweißung. Bei Instandsetzungsmaßnahmen der Abteilung B68 sind neben dem Tausch von Kleinteilen (Dichtungen, Bolzen, etc.) und Einschüben in der Weichensteuerung noch der komplette Tausch von schadhafte Stellwerken und Weichenheizungen zu nennen. Vor jeder Instandsetzungsaktion, insbesondere bei einer wiederholten Anwendung an der gleichen Anlage, ist die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Erneuerung zu prüfen.

Auf die Instandsetzungsmaßnahmen der Abteilung B63 (lockere Schachtdeckel, hohe Betonplatten, etc.) wird nicht gesondert eingegangen, da diese im Bereich von Weichenanlagen nicht öfters zu erwarten sind als auf der freien Strecke. Somit kann der Kosteneinfluss dieser Tätigkeiten auf die LCC der Weichen vernachlässigt werden.

4.3.6.1 Reprofilierung

Unter einer Reprofilierung versteht man die Wiederherstellung des Schienenprofils durch Schleifen. Vor allem bei asymmetrisch befahrenen Weichen ist es oft nötig die Abnutzungsdifferenz der Gleise durch Schleifen auszugleichen. Das Gleis mit mehr Abnutzungsvorrat wird auf das Niveau des stärker belasteten Gleises abgeschliffen um eine komfortable Befahrung zu ermöglichen.

4.3.6.1 Aufschweißung

Ist die Abfahung zu weit fortgeschritten muss der Abnutzungsvorrat mit Hilfe einer Aufschweißung erhöht werden. Die Aufschweißung einer Schiene kann nur 3 bis maximal 5-mal durchgeführt werden, da aufgrund der wiederholten Aufschmelzvorgänge der Stahl metallurgisch geschädigt wird und damit die Gefahr eines Sprödbruchs steigt [40, S. 28]. Nach jeder Aufschweißung muss die Fahrfläche plangeschliffen werden. Aufgrund der Verwendung von kopfgehärteten Schienen werden Aufschweißungen immer seltener durchgeführt, da dieser Stahl nur eine bedingte Schweißbeignung aufweist.

4.3.6.2 Zungentausch

Ist aufgrund der Abnutzung oder nach einem Zungenbruches ein Austausch der Zunge notwendig, werden je nach Zungenart der Zungentausch „kurz“, der Zungentausch „lang“ oder ein Tausch der keilartigen Zunge angewandt. Die graphische Darstellung der verschiedenen Systeme und die Vorgehensweise bei der Instandsetzung sind in Abschnitt 4.2.1.1 erläutert. Diese Maßnahmen werden im Rahmen der Wartungen der Abteilung B64 durchgeführt.

4.3.6.3 Instandsetzung der Weichensteuerung

Die Weichensteuerung ist durch die immer aufwendiger werdenden Anlagen sehr kostenintensiv in der Instandhaltung. Die Einschübe, Relais und Decoder sind, wie alle elektrischen Teile, sehr empfindlich gegenüber Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen. Die Erfahrungswerte mit den zu erwartenden Lebensdauern dieser Teile liegen zwischen 1 Tag (!) und fünf Jahren. Aufgrund der großen Streuung dieser Angabe wird in der Analyse bei jeder Revision eine Material-Pauschale von €500,00 für diese Teile angesetzt.

4.3.6.4 Tausch der Stellvorrichtung

Der Tausch der Stellvorrichtung wird von der Abteilung B68 durchgeführt. Der Tausch wird entweder prompt nach Störungsmeldung oder in der darauffolgenden Nacht durchgeführt. Falls die Instandsetzung nicht sofort erfolgt, muss die Weiche entweder auf eine Fahrriechung fixiert oder ein Mitarbeiter zur manuellen Betätigung der Anlage bereitgestellt werden. Der benötigte Aufwand für den Tausch der Stellvorrichtung ist beträchtlich. Ein Trupp von fünf Mann ist für die Dauer einer ganzen Schicht beschäftigt. Hinzu kommen die Kosten für ein neues Stellwerk. Es war dem Autor leider nicht möglich diese Kosten in die Analyse mit einzubeziehen, da die Lebensdauer eines Stellwerks aufgrund mangelnder Dokumentation nicht hinreichend genau angegeben werden kann, und somit keine Datengrundlage für eine LCC-Abschätzung besteht.

4.3.6.5 Tausch der Weichenheizung

Bei einer Fehlfunktion der Weichenheizung wird die Abteilung B68 verständigt. Der Austausch der Weichenheizung ist während des Betriebes möglich und erfordert kein Aufbrechen der Oberfläche. Die Lebensdauer der Heizstäbe ist ebenfalls nicht hinreichend genau dokumentiert um einen intervallmäßigen Austausch in die Berechnung mit einzubeziehen. Der Tausch der Weichenheizung ist ebenfalls in der in Abschnitt 4.3.6.3 angeführten Pauschale von €500,00 pro Weichenrevision enthalten.

4.3.7 Störungsbehebung

Eine auftretende Störung wird vom Straßenbahnpersonal während des Betriebes festgestellt und an die Leitstelle durchgegeben. Die Störungsmeldung gelangt per E-Mail oder Telefon an den zuständigen Werkmeister. Diese Information ist jedoch nur grob und lässt nur bedingt Schlüsse auf den zu erwartenden Arbeitsaufwand zu. Der Rüstwagen wird mit den wahrscheinlich benötigten Werkzeugen und Materialien beladen und zur schadhafte Anlage entsandt. Bei der Besichtigung vor Ort wird nach dem Absichern der Gefahrenstelle eine Entscheidung über die Art der durchzuführenden Maßnahmen getroffen. Es erfolgt entweder eine Störungsbehebung oder bei schweren Schäden eine provisorische Störungsbehebung mit anschließender Überleitung zum Prozess Instandsetzung (siehe Abschnitt 4.3.6). Beim Verlassen der Schadensstelle wird über eine telefonische Rückmeldung die Erledigung resp. die gesetzten Maßnahmen an dem Melder weitergeleitet. Zum Schluss wird die Störungsmeldung ergänzt und per E-Mail an die Leitstelle gesendet.

Im Normalfall wird bei einer Weichenstörung zuerst der Spritzwagen angefordert um die beweglichen Teile von Schmutz zu befreien (siehe Abschnitt 4.3.5.1). In über 90% der Fälle ist die Störung hiermit behoben. Falls ein Zungenbruch oder ein Schaden an der Elektrik vorliegt wird die Gefahrenstelle abgesichert und die zuständige Abteilung (B64 oder B68) informiert.

4.3.8 Erneuerung

Der Austausch einzelner Komponenten fällt unter den Begriff Instandhaltung (siehe Abschnitt 2.2). Eine Erneuerung der gesamten Anlage auch Ersatzinvestition genannt, erfolgt wenn die Abnutzung der Weiche soweit fortgeschritten ist, dass der Austausch einzelner Komponenten wirtschaftlich nicht mehr vertretbar ist. Die zu erwartende Lebensdauer liegt je nach Belastung und Lage bei ca. 15-20 Jahren.

4.3.9 Nichtverfügbarkeit / Störungen

Im Fernverkehr können Verspätungen monetär bewertet werden. Die mittleren Verspätungskostensätze beinhalten die mittleren Betriebskosten der Züge (Vorhaltung und Betrieb) sowie die Kosten für Erlösverluste, Strafzahlungen und Gutscheinausgaben, sofern sie dem Betreiber bekannt sind [16, S. 140]. Die Erfassung der Betriebserschwerungskosten ist im Straßenbahnverkehr hingegen schwer bis gar nicht möglich, da die Verspätungen kaum abzuschätzen sind. Die Auswirkungen auf den Kunden sind durch die kurzen Intervalle meist eher klein und zu Strafzahlungen kann es aufgrund des fehlenden Güterverkehrs nicht kommen. Fahrpreisrückerstattung und Gutscheinausgabe sind im ÖPNV ebenfalls nicht vorgesehen. Aus den angeführten Gründen können die BEK im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

4.4 Kostenelemente und deren Abschätzungsverfahren

Diese Analyse basiert größtenteils auf dem **analytischen Abschätzungsverfahren**, bei dem die Produktstruktur in ihre Einzelkomponenten zerlegt wird, und versucht wird, jedes Kostenelement direkt zu schätzen (siehe Abschnitt 2.3.3.2). Alte Schätzwerte werden durch Auf- und Abzinsen bis zur Gegenwart fortgeschrieben. Es kommen teilweise festgelegte Standard-Kostenfaktoren zum Einsatz. Die Aufwendungen für die Wartungstätigkeiten werden mit standardisierten Mittelwerten berechnet.

In gewisser Weise wird auch das **analoge Verfahren** verwendet da die Kosten ähnlicher Produkte einbezogen werden. Es kann zwar nicht auf eine bereits durchgeführte LCC-Betrachtung eines ähnlichen Produktes zurückgegriffen werden, es wird aber, wie in Abschnitt 1.2 - Abbildung 1 (Seite 2) veranschaulicht, eine übergreifende Betrachtungsweise über mehrere Anlagen angewandt. Die Auflistung der anfallenden Tätigkeiten in der Betriebsphase, sowie deren mittlerer Aufwand konnte aus den **Erfahrungswerten** des zuständigen Personals realistisch abgeschätzt werden.

4.5 Datenquellen

Die Gliederung der Produktstruktur wurde in Abstimmung mit den jeweiligen Abteilungen durchgeführt. Auf Basis von Erfahrungswerten der vergangenen Jahre konnte durch das zuständige Personal mit Ausnahme der einzelnen o.a. Komponenten eine realistische Prognose der Instandhaltung erstellt werden. Die Kosten der Materialien wurden aus dem SAP-Programm entnommen und auf das Jahr 2008 aufgezinnt.

4.6 Umgang mit Unsicherheiten

Die Problematik dieser Analyse liegt in der Ermittlung der korrekten Preisbasis für die verschiedenen Komponenten. Durch die Aufzinsung kann der Einfluss der Inflation zwar egalisiert werden, die unterschiedlichen Preisschwankungen in den verschiedenen Branchen bzw. bei den Rohstoffpreisen (Stahl) können aber nur ungenügend berücksichtigt werden. Bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ist ein gewisses Maß an Unsicherheiten nicht zu eliminieren, deshalb muss mit der Wahl geeigneter Einheiten

entgegengewirkt werden. Als kleinste Zeiteinheit zur Identifikation des Zeitpunktes von Zahlungsströmen wird das Jahr verwendet. Durch diese, zuerst grob erscheinende Einteilung, können Streuungen in der Abnutzung und Schwankungen bzw. Abweichungen der Kosten abgefangen werden.

5 Analyse des LCC-Modells

5.1 Entwicklung von Kostenschätzungen

Die ermittelten Kosten der vergangenen Jahre wurden entsprechend der Inflation der Jahre 2003 bis 2008 auf den aktuellen Stand aufgezinnt. In Tabelle 5 sind die österreichischen Inflationswerte für diesen Zeitraum angegeben.

Inflationswerte Österreich	
Jahr	% zu Vorjahr
Ø 2004	2,1
Ø 2005	2,3
Ø 2006	1,5
Ø 2007	2,2
Jan 08	3,2
Feb.08	3,2
Mär. 08 ¹⁾	3,5

Q.: STATISTIK AUSTRIA. Erstellt am: 16.04.2008

Tabelle 5: Inflationswerte 2003 bis 2008

Die Kosten zukünftiger Zahlungen fließen unter Berücksichtigung der Inflation und des internen Zinsfußes in die Berechnung ein. Folgende Werte wurden bei dieser Analyse verwendet:

Inflation	2%
Interner Zinssatz	8%

Tabelle 6: Interner Zinssatz und Inflation für die LCC-Analyse

Die Kosten für Planung, Anlagenfertigung und Einbau der Anlage der Abteilungen B63 und B64 wurden am Beispiel der Anlage 09-03/I-VI ermittelt und auf das Jahr 2008 aufgezinnt. Die Kosten der Abteilung B68 in diesen Lebenszyklusphasen sind auf Erfahrungswerten des zuständigen Fachpersonals basierende Aufwands-Schätzungen.

Die Aufwendungen der Abteilung B64 in der Betriebsphase wurden aus den Werten der vier betrachteten Anlagen berechnet. Da es dem Autor nicht möglich war, einen direkten Zusammenhang zwischen dem Alter der Rillenschienenweiche und dem nötigen Instandhaltungsaufwand herzustellen, wurde der Mittelwert über alle vier Anlagen zur Berechnung herangezogen.

Die Angaben der Intervalle, Materialien, Arbeitszeiten und des Maschineneinsatzes der Abteilungen B63 und B68 während der Betriebsphase basieren auf den Erfahrungswerte des zuständigen Fachpersonals. Genaue Aufzeichnungen der Start und Endzeitpunkte sowie die Zuordnung der Tätigkeiten zu bestimmten Anlagen sind nicht vorhanden. Die Personalkosten werden mit dem heute gültigen Stundensätzen der Fahrer und Streckenarbeiter unter Berücksichtigung von Nachtzuschlägen berechnet. Die Normalstunde setzt sich wie folgt zusammen:

	Brutto-Lohn
+	Dienstgeber Pensionsbeitrag
+	Abgaben
+	Overhead GF
+	Overhead Profitcenter
<hr/>	
	Stundensatz Normalstunde
<hr/>	

Es sind in diesem Stundensatz somit alle administrativen Tätigkeiten inkludiert. Die Einbeziehung der Stunden der Lageristen und Werkmeister sowie der C-Beamten der verschiedenen Abteilungen in die Analyse ist somit nicht erforderlich.

Die Personalkosten der Abteilung B64 beim Anlagenbau in der Werkstätte und bei der Wartung der Weichen wurden mit dem internen Stundensatz der Wiener Linien dokumentiert. Dieser Stundensatz für die interne Verrechnung stellt den Mittelwert der Stundenlöhne aller Fahrer, Arbeiter und Facharbeiter dar. In diesem mittleren Stundensatz sind neben den o.g. Lohnbestandteilen auch alle Nachtzuschläge und Überstunden bereits inkludiert.

Es wurden zwei Berechnungen mit unterschiedlichen Lebensdauern durchgeführt um einen Vergleich der Annuitäten darstellen zu können. Da die Liegedauer einer Rillenschienenweiche im Mittel zwischen 15 und 20 Jahren beträgt wurden diese beiden Grenzwerte zur Analyse herangezogen. Der Einfluss der Betriebsphase auf die LCC kann so anschaulich dargestellt werden.

5.2 Darstellung der Ergebnisse

5.2.1 Rillenschienenweiche mit einer Liegedauer von 15 Jahren

Die Auswertung der bei den Wiener Linien erhobenen Daten ergibt folgende Verteilung der Kosten über die Lebenszyklusphasen:

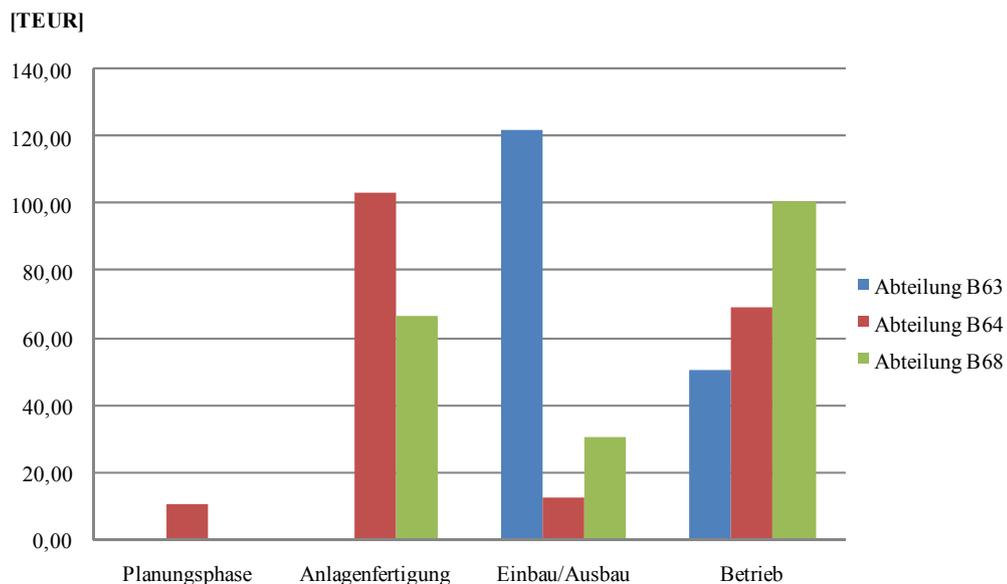


Abbildung 31: Darstellung der Zahlungsströme über die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 15 Jahren

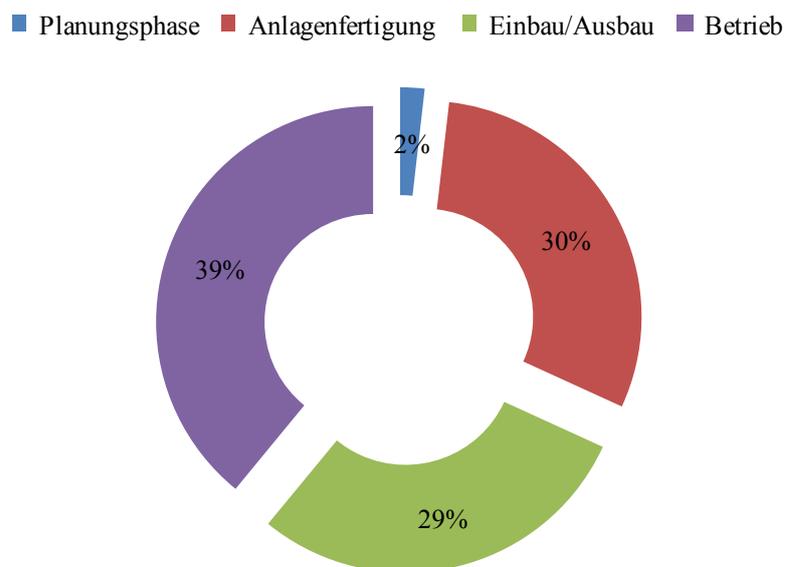


Abbildung 32: Darstellung der Kostenverteilung auf die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 15 Jahren

Die in Abbildung 31 beim Einbau auf die Abteilung B63 anfallenden Kosten ergeben sich aus den von externen Firmen für B63 ausgeführten Arbeiten. In Abbildung 32 sind die Anteile der jeweiligen Lebenszyklusphasen an den Gesamt-LCC bei einer Liegezeit von 15 Jahren dargestellt.

5.2.2 Rillenschienenweiche mit einer Liegedauer von 20 Jahren

Die Auswertung der bei den Wiener Linien erhobenen Daten ergibt folgende Verteilung der Kosten über die Lebenszyklusphasen:

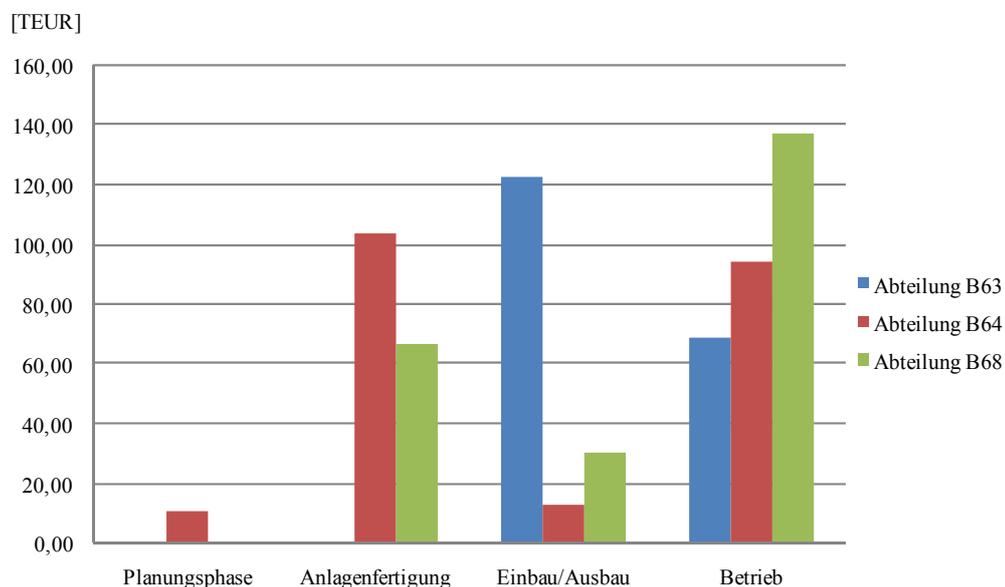


Abbildung 33: Darstellung der Zahlungsströme über die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 20 Jahren

Die in Abbildung 33 beim Einbau auf die Abteilung B63 anfallenden Kosten ergeben sich wiederum aus den von externen Firmen für B63 ausgeführten Arbeiten. In Abbildung 34 sind die Anteile der jeweiligen Lebenszyklusphasen an den Gesamt-LCC bei einer Liegezeit von 20 Jahren dargestellt. Im Vergleich zu der Liegedauer von 15 Jahren nimmt der Anteil der Betriebsphase durch die längere Lebensdauer deutlich zu. Während es bei 15 Jahren ca. 39% sind, ist bei 20 Jahren bereits knapp die Hälfte der Gesamt-LCC der Betriebsphase zuzuordnen. Dies verdeutlicht, dass der Instandhaltungsaufwand resp. die Instandhaltungsstrategie einen maßgeblichen Einfluss auf die LCC einer Weiche hat.

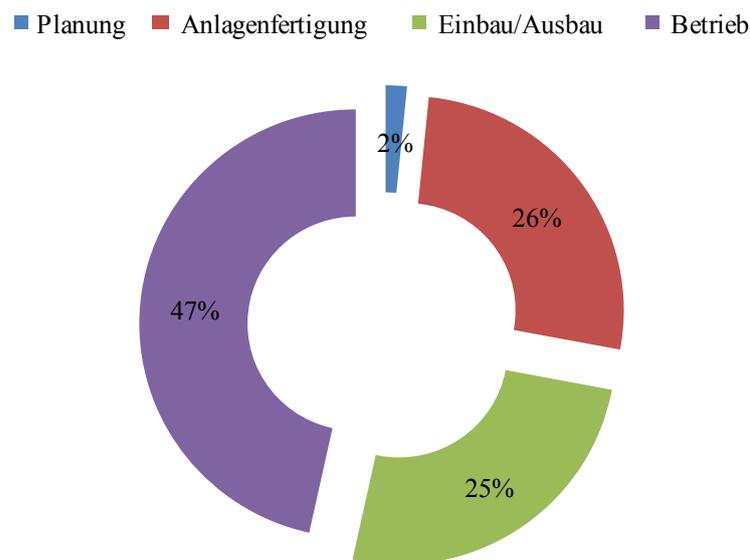


Abbildung 34: Darstellung der Kostenverteilung auf die Lebenszyklusphasen bei einer Lebensdauer von 20 Jahren

5.2.3 Zusammenhang zwischen Kosten und Liegedauer

Es ist evident, dass der Kostenanteil der Betriebsphase mit zunehmender Lebensdauer stetig zunimmt (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 34). Diese Werte sind aber für eine Gegenüberstellung der Kosten nicht geeignet, da die Lebensdauer der Anlage nicht berücksichtigt wird (siehe Abschnitt 2.3.3.3). Um eine Vergleichbarkeit der Kosten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensdauern zu ermöglichen wurden die Gesamt-LCC in Annuitäten umgerechnet (siehe Abbildung 35).

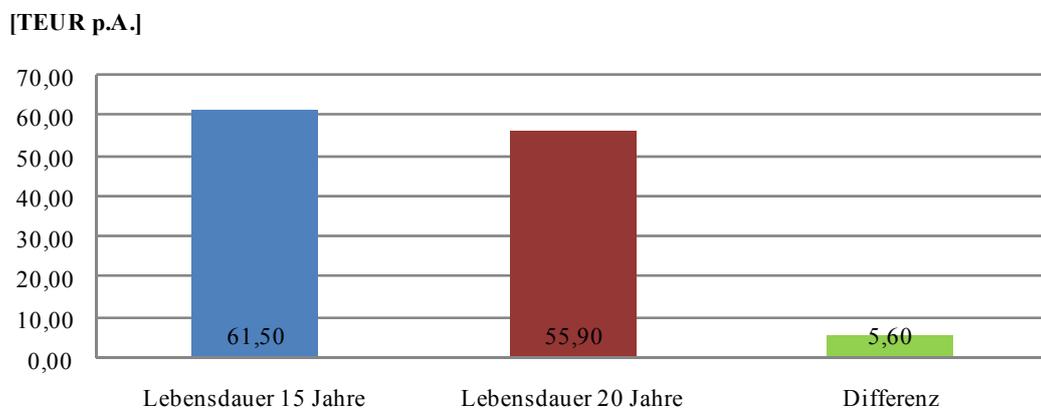


Abbildung 35: Annuitäten bei unterschiedlichen Liegezeiten

Die jährlichen Abschreibungskosten einer Rillenschienenweiche mit einer Liegedauer von 20 Jahren können somit gegenüber einer Anlage, welche schon nach 15 Jahren getauscht wird, um rund 5.600 € geringer angenommen werden.

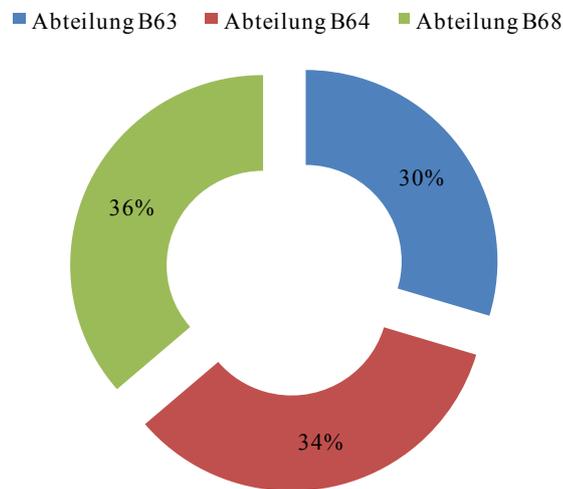


Abbildung 36: Verteilung der LCC auf die Abteilungen der Wiener Linien

Die Verteilung der Kosten auf die verschiedenen Abteilungen kann der Abbildung 36 entnommen werden. Diese Kostenzuordnung zu den entsprechenden Abteilungen verhält sich bei beiden simulierten Lebensdauern ähnlich. Die Kosten der Abteilungen in den ersten drei Lebensphasen sind größtenteils auf Materialkosten zurückzuführen. Während der Betriebsphase sind die Materialkosten auf Ersatzteile beschränkt und ein Großteil der Kosten kann den Personalkosten zugeordnet werden. Dies ist auf den hohen Personalaufwand für Inspektion, Reinigung, und Revision zurückzuführen, welcher durch den hohen Anteil an Nacharbeit erhebliche monetäre Aufwendungen zur Folge hat.

5.3 Bewertung der Ergebnisse

Der Autor kommt zu dem Schluss, dass auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten eine LCC-Betrachtung einer Rillenschienenweiche nur begrenzt möglich ist. Die Kostenzuordnung sowie die Messung der erbrachten Leistung kann nur ungenügend durchgeführt werden. Eine Darstellung der Kostenverhältnisse sowie eine grobe Abschätzung der Gesamt-LCC sind zwar möglich (siehe Abschnitt 5.2), eine weiterführende Detaillierung ist nach Ansicht des Autors jedoch nicht zielführend, da die Datendichte und die Genauigkeit der Daten dies nicht zulässt. Um Optimierungspotentiale mit Hilfe einer LCC-Betrachtung zu finden müssen alle Aufwendungen direkt mit einer Komponente des Produkts in Verbindung gebracht werden können. Die anteilige Zuordnung der Gesamtkosten aus Mangel an Information stellt alle Kosten als Gemeinkosten in Rechnung, was eine Identifizierung von Kostentreibern resp. eine Optimierung unmöglich macht. Eine genauere Dokumentation der Tätigkeiten und die Pflege dieser Daten sowie eine anlagenspezifische Zuordnung der Kosten im SAP sind die Grundlage für zukünftige LCC-Betrachtungen.

Die maßgebenden Einschränkungen, die eine LCC-Analyse im eigentlichen Sinn undurchführbar gemacht haben, werden nachfolgend angeführt:

- Die Abschätzung der Lebensdauer der Weiche ist sehr schwierig, da die Instandhaltungs- resp. die Erneuerungstermine oft von äußeren Faktoren (Politik, Straßenbau, etc.) abhängig sind (siehe Abschnitt 2.4.1.7).
- Eine hinreichende Kontrolle der RAMS-Performance für Rillenschienenweichen ist bei den Wiener Linien noch nicht integriert. Es folgt eine Auflistung der auftretenden Probleme beim Messen der einzelnen RAMS-Eigenschaften:
 - **Zuverlässigkeit:** Die Beschreibung der Zuverlässigkeit einer Rillenschienenweiche anhand der Kenngrößen MTBF ist nicht möglich, da die Störfälle zwar aufgezeichnet werden, aber nicht berücksichtigt wird, ob diese Störungen einen Einfluss auf den Betrieb haben. Diese Daten sind für die Bewertung der Zuverlässigkeit aber entscheidend (vgl. Abschnitt 2.1.3).
 - **Verfügbarkeit:** Es gibt zwar die Prämisse alle Störungen in maximal zwei Stunden zu beheben, dieses Ziel alleine lässt aber keine Erstellung von

Relationen zwischen RAMS und der Instandhaltung zu. Mit der alleinigen Auflistung der Störungsfälle kann keine Aussage über die Beeinträchtigung der Verfügbarkeit abgeleitet werden, da die Folgen der Störung nicht hinreichend dokumentiert werden. Eine Minimierung der Nichtverfügbarkeit kann nur über die Dokumentation und Analyse der Störfälle mit Einfluss auf die Verfügbarkeit verwirklicht werden. Des Weiteren muss eine klare Abgrenzung zwischen Regelbetrieb, eingeschränktem Betrieb und Nichtverfügbarkeit gefunden werden (siehe Abschnitt 2.1.4).

- **Instandhaltbarkeit:** Der Einfluss der Instandhaltbarkeit auf die Verfügbarkeit ist im konkreten Fall von Rillenschienenweichen schwierig zu ermitteln, da die planmäßigen Instandhaltungstätigkeiten in der betriebsfreien Zeit stattfinden und damit keinen messbaren Einfluss auf die Verfügbarkeit haben. Kann eine Instandhaltungsaktion nicht abgeschlossen werden, wird der Betrieb in der Zwischenzeit mit Hilfe eines Provisoriums ermöglicht und in der darauffolgenden Betriebspause wird die Maßnahme vollendet. Ein direkter Zusammenhang zwischen MTTR und Verfügbarkeit kann nur im Störfall bei laufendem Betrieb hergestellt werden, wobei hier wiederum die Problematik der Abgrenzung zwischen den Ausfallkategorien besteht (siehe Abschnitt 2.1.5).
- **Sicherheit:** Die monetäre Bewertung von Sicherheit stellt im Allgemeinen ein Problem dar (siehe Abschnitt 2.1.6). Zur Berücksichtigung der Sicherheit (siehe Abschnitt 2.4.1.1) in der Berechnung fehlen die Datengrundlagen.
- Die Positionen im SAP sind zu stark zusammengefasst. Es ist nicht möglich die Gesamtsummen in ihre einzelnen Komponenten zu zerlegen. Für die Personalkosten im Anlagenbau steht im SAP beispielsweise nur 1 Position mit 1.344 Mannstunden zur Verfügung. Eine Optimierung von Teilprozessen kann auf dieser Basis nicht durchgeführt werden.

Es wäre daher empfehlenswert die SAP-Positionen vor allem im Personalbereich detaillierter zu gestalten, da dadurch konkrete Tätigkeiten besser bewertet und etwaige Optimierungspotentiale erkannt werden könnten.

- Die Daten beruhen größtenteils auf Erfahrungs- und Schätzwerten anstatt auf den tatsächlichen Kosten, da diese für diesen Zweck nicht erkennbar sind.
- Die Anfangs- und Endzeitpunkte der gesetzten Maßnahmen sind nicht hinreichend dokumentiert, somit ist eine spätere Quantifizierung des Stundenaufwands je Anlage nicht möglich.
- Die durchgeführten Tätigkeiten können meistens keiner spezifischen Anlage zugeordnet werden, da die Zeitspannen meist sehr kurz sind und es keine Aufzeichnungen darüber gibt, an welchen Anlagen die Streckenarbeiter tätig waren. Die Division der Gesamtkosten durch die Anzahl der Anlagen kann keine aussagekräftigen anlagenspezifischen Kosten ergeben (vgl. Abschnitt 2.4.1.6).
- Es gibt keine genauen Angaben über das verwendete Material zur Instandhaltung einer spezifischen Anlage. Am Ende der Schicht werden die verwendeten Materialien im Rüstwagen einfach wieder aufgefüllt ohne den Verbrauch auf die konkrete Anlage zu verbuchen.

Ein möglicher Lösungsansatz für die o.g. Probleme wäre die Erstellung einer mit SAP verknüpften Datenbank, welche die Instandhaltungsaktivitäten aller Abteilungen umfasst. Diese Datenbank sollte auf Basis der Erfahrungen der Streckenarbeiter programmiert werden um eine den Erfordernissen und EDV-Kenntnissen der Mitarbeiter angepasste Applikation zu erstellen. Über eine benutzerfreundliche Oberfläche könnten die Streckenarbeiter nach jeder Schicht resp. nach jedem Einsatz genaue Angaben über die durchgeführten Arbeiten in die Datenbank eingeben:

- die ausführende Abteilung
- die betroffene Anlage
- die Dauer des Einsatzes
- den Personalaufwand
- die verwendeten Materialien
- eventuell aufgetretene Komplikationen

Mit Hilfe einer durchdachten Eingabemaske und der Bereitstellung von pauschalen Aufwandssätzen für öfters anfallende Tätigkeiten kann die Eingabe stark vereinfacht und beschleunigt werden. Dies vermindert den zeitlichen Aufwand für die Datenerfassung und

erhöht die Akzeptanz bei der Belegschaft. Die auf diesem Wege laufend aktualisierten Reparaturdaten könnten nun für jede Anlage abgefragt und über eine Verknüpfung zu SAP auch mit den aktuellen gleitenden Preisen monetär bewertet werden. Eine exakte anlagenbezogene Kostenaufstellung sowie eine Darstellung des Verschleißes wären somit möglich.

6 Zusammenfassung

Durch eine LCC (Life Cycle Costs) - Analyse wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, Optimierungspotentiale bei Rillenschienenweichen der Wiener Linien aufzuzeigen. Eine Analyse dieser Art kann nur unter Verwendung des RAMS-Konzepts effizient durchgeführt werden. Die Lebensdauern der einzelnen Komponenten und deren Ausfallwahrscheinlichkeit kann durch die Definition von RAMS-Zielen realistisch prognostiziert, und mit der Messung der RAMS-Performance während des Betriebes ständig verifiziert werden. Durch eine Aufgliederung der Weiche in ihre Produkt- und Kostenstruktur sowie der Definition der einzelnen Lebenszyklusphasen sollte die Betrachtung einzelner Komponenten über die gesamte Lebensdauer möglich sein.

Die Analyse in Abschnitt 5 hat gezeigt, dass eine LCC/RAMS-Betrachtung einer Rillenschienenweiche im eigentlichen Sinn aber nicht durchgeführt werden kann. Die laufende Messung der RAMS-Performance ist zurzeit noch nicht voll in die Prozessstrukturen der Wiener Linien implementiert, was eine Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Komponenten und eine monetäre Bewertung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit unmöglich macht. Die Zerlegung einer Rillenschienenweiche in die Produktgrößen ist zwar prinzipiell möglich, die Verfolgung der einzelnen Komponenten über die gesamte Lebensdauer ist aber aufgrund nicht ausreichender Datenpflege nicht machbar.

Es konnte nur eine grobe Quantifizierung der Kosten einer Rillenschienenweiche durchgeführt werden. Eine Darstellung der Kostenverteilung auf die verschiedenen beteiligten Abteilungen sowie der Einfluss der Lebensdauer auf die Höhe der jährlichen Abschreibung konnten auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten abgeschätzt werden.

Anhand des Vergleichs der Annuitäten bei einer Lebensdauer von 15 Jahren mit den jährlich anfallenden Kosten bei einer Lebensdauer von 20 Jahren konnte die Wichtigkeit einer geeigneten Instandhaltungsstrategie anschaulich dargelegt werden. Um zukünftig

genauere Analysen durchführen zu können, ist eine Integration der folgenden Punkte in die Prozessstruktur der Wiener Linien notwendig:

- Die ständige Messung der RAMS-Performance
- Eine genauere Datenerfassung und Datenpflege um eine objektbezogene Kosten- und Aufwandszuordnung zu ermöglichen

Die Erstellung einer Instandhaltungs-Datenbank stellt nach Ansicht des Autors eine geeignete Möglichkeit dar, in Zukunft die anlagenbezogenen Zustands- und Reparaturdaten genauer zu erfassen.

7 Literaturverzeichnis

- [1]. **Schurig, Ralf.** Geschäftsprozesse modellieren mit ARIS.
[Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI).
EI - Eisenbahningenieur (54). 9/2003, S. 46-53.
- [2]. **Schilling, Rosemarie und Lücking, Lars.** Senkung der Lebenszykluskosten.
[Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI).
EI - Eisenbahningenieur (54). 5/2003, S. 58-72.
- [3]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V., [Hrsg.].** *DIN IEC 60300-3-3:1999-03, Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3: Anwendungsleitfaden - Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:1996)*. Berlin : Beuth Verlag, 1999.
- [4]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V., [Hrsg.].** *DIN EN 50126:1999, Spezifikation und Nachweis der Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)*. Berlin : Beuth Verlag, 1999.
- [5]. **Scharner, Anton.** Das RAM-Programm - Ein Erfahrungsbericht.
[Hrsg.] DVV Media Group GmbH. *SIGNAL + DRAHT* (96). 4/2004, S. 10-14.
- [6]. **Verein Deutscher Ingenieure e.V., [Hrsg.].** *VDI 2884, Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*. Düsseldorf : VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Dezember 2005.
- [7]. **Birolini, Alessandro.** *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen - 4. Aufl.* Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio : Springer, 1997.
- [8]. **Matyas, Kurt.** *Taschenbuch Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern*. München; Wien : Hanser, 1999.
- [9]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V., [Hrsg.].** *DIN 31051:2003-06, Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin : Beuth Verlag, 2003.
- [10]. **Oster, Martin und Scharner, Anton.** Maintenance Center - Ein Gesamtkonzept.
[Hrsg.] DVV Media Group GmbH. *SIGNAL + DRAHT* (96). 5/2004, S. 30-32.
- [11]. **Matyas, Kurt.** Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien.[Hrsg.] Norbert Gronau, Bernd Scholz-Reiter und Hermann Krallmann. *Industrie Management* 18. (2002), S. 13-16.
- [12]. **Moubray, John.** *RCM - die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen - Dt. Übers. Walter Kugler*. Landsberg : Verl. Moderne Industrie, 1996.
- [13]. **Wübbenhorst, Klaus.** *Konzept der Lebenszykluskosten - Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge*. Darmstadt : Verlag für Fachliteratur, 1984.

- [14]. **Zehbold, Claudia.** *Lebenszykluskostenrechnung. Schriftenreihe der krp Kostenrechnungspraxis.* Wiesbaden : Gabler, 1996.
- [15]. **Danzer, Peter.** Methoden der LCC-Betrachtung für den Schienenfahrweg. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur (51).* 12/2000, S. 21-24.
- [16]. **Hempe, Thomas.** *Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen.* Hannover : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, 2006.
- [17]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V., [Hrsg.].** *DIN EN 60300-2:2004-10, Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 2: Leitfaden zum Zuverlässigkeitsmanagement (IEC 60300-2:2004); Deutsche Fassung EN 60300-2:2004.* Berlin : Beuth Verlag, 2004.
- [18]. **Bertl, Romuald, Deutsch-Goldoni, Eva und Klaus, Hirschler.** *Buchhaltungs- und Bilanzierungshandbuch.* 5., aktualisierte Auflage. Wien : LexisNexis ARD ORAC, 2007.
- [19]. **Koriath, Holger.** Die Anwendung der LCC-Methode für die Fahrbahn der DB AG. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur (51).* 12/2000, S. 25-27.
- [20]. **Dichtl, Erwin u. Issing, Otmar, [Hrsg.].** *Vahlers großes Wirtschaftslexikon.* München : Verlag Vahlen, 1987. Bde. 1 A-K.
- [21]. **Meyers Lexikonverlag.** Opportunitätskosten. [Online] 27. Feb 2007. [Zitat vom: 01. Apr 2008 15:01 UTC.] [http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Opportunit%C3%A4tskosten&oldid=147880.](http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Opportunit%C3%A4tskosten&oldid=147880)
- [22]. **Woll, Athur, [Hrsg.].** *Wirtschaftslexikon.* 6. überarbeitete und erweiterte Aufl. München; Wien; Oldenbourg : R. Oldenbourg Verlag, 1992.
- [23]. **Schredelseker, Klaus.** *Grundlagen der Finanzwirtschaft: ein informationsökonomischer Zugang.* München; Wien : Oldenbourg, 2002.
- [24]. **Renate, Wahrig-Burfeind.** *WAHRIG Fremdwörterlexikon.* München : Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 1999.
- [25]. **Wolberg, Jörg und Kiefer, Jörg.** Life Cycle Costs - Die Kosten von Betrieb, Wartung und Verfügbarkeit. [Hrsg.] DVV Media Group GmbH. *SIGNAL + DRAHT (92).* 6/2000, S. 19-22.
- [26]. **Sandvoss, Christian, Süß, Martin und Trescher, Christian.** RAM/LCC-Prognosen unter Nutzung von Betriebs- und Instandhaltungsdaten. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur (56).* 9/2005, S. 26-29.
- [27]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Betriebliche Ausbildung V44, [Hrsg.].** *Lernunterlagen für das Fahren mit Straßenbahnen.* Wien : gültig ab Jänner 06.
- [28]. **ViennaGIS, Stadt Wien.** Stadtplan mit Adressensuche. *Webservice der Stadt Wien.* [Online] [Zitat vom: 06. Apr 2008.] Copyright Stadt Wien. www.wien.gv.at/stadtplan/.

- [29]. **Unfried, Doris.** Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV). [Hrsg.] Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien. *Zur Zukunft öffentlicher Dienstleistungen*. Nr. 6, Dez 2005, S. 145-158.
- [30]. **Österreichisches Normungsinstitut, [Hrsg.].** *ÖNORM EN 13816:2002, Transport-Logistik und Dienstleistungen - Öffentlicher Personennahverkehr (Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität)*. Wien, 2002.
- [31]. **Flecker, Roland.** *Die Anwendbarkeit von LCC/RAMS in der Fahrweginstandhaltung der Wiener Linien - am Beispiel Störungsdienst*. Diplomarbeit am Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen. Wien : Technische Universität Wien, 2006.
- [32]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, [Hrsg.].** *Bericht 2005 - Ein Unternehmen, das Menschen bewegt - Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit*. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2005.
- [33]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, [Hrsg.].** *Über uns - Betriebsangaben 2006*. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2006.
- [34]. **Socialdata - Institut für Verkehrs- und Infrastrukturforschung GmbH.** *Socialdata - Mobilitätsdaten - Verkehrsmittelwahl*. [Online] Institut für Verkehrs- und Infrastrukturforschung GmbH, 2008. [Zitat vom: 13. Apr 2008.] http://www.socialdata.de/daten/vm_d.php.
- [35]. **Wiener Linien GmbH & Co KG.** *Organigramm der Wiener Linien*. Wien, Jänner 2008.
- [36]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Bahnbau, [Hrsg.].** *Bahnbau - Kompetenz und Erfahrung für die Instandhaltung und Erneuerung von Gleisanlagen*. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Bahnbau, September 2004.
- [37]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Marketing & Medien, [Hrsg.].** *Die Hauptwerkstätte - Qualitätsarbeit für optimale Sicherheit*. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Marketing & Medien.
- [38]. **Ostermann, Norbert und Ossberger, Markus.** Prozessorientiertes Rad-Schiene basiertes Instandhaltungsmanagement bei städtischen Nahverkehrsbetrieben. [Hrsg.] Eurailpress. *Special ETR - Eisenbahntechnische Rundschau - Austria (54)*. 1/2005, S. 845-850.
- [39]. **Bartmann, Hans-Peter.** Kontrolle von Materialermüdungsdefekten durch Schleifen. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur (51)*. 6/2000, S. 46-49.
- [40]. **Frank, Norbert und Uhrig, Roger.** LCC am Beispiel von Rillenschienenweichen eines Nahverkehrsbetriebes. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur (53)*. 1/2002, S. 28-36.
- [41]. **Hasslinger, Herbert, Lackenbauer, Brigitte und Ossberger, Markus.** *Wiener Bogen*. [DVD]. Wiener Linien GmbH & Co KG, ÖBB Infrastruktur Bau, 2005.

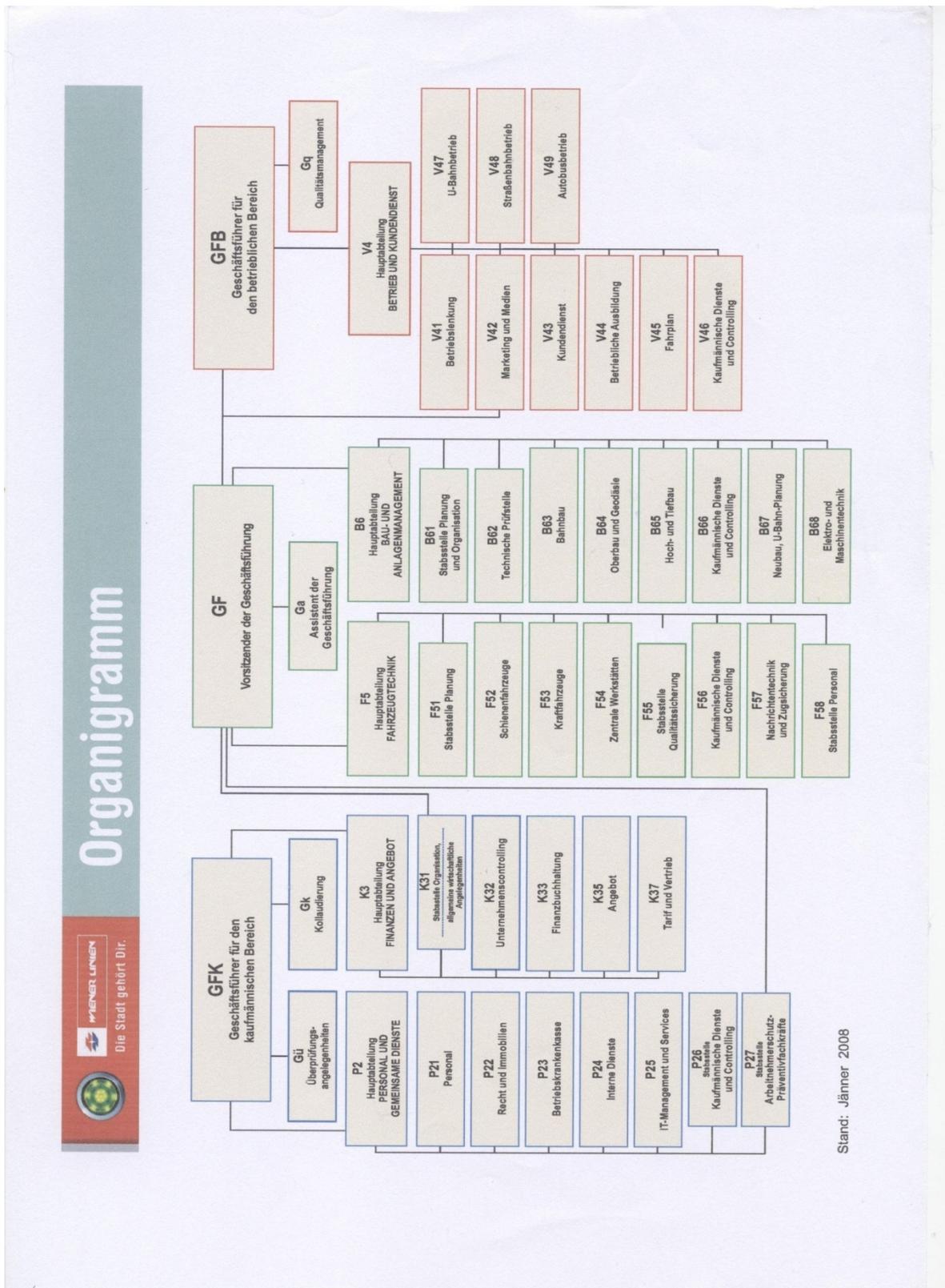
- [42]. **Heyder, René.** Untersuchungen zum Schädigungsverhalten von Schienen in einem Gleisbogen. [Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI). *EI - Eisenbahningenieur* (52). 4/2001, S. 40-46.
- [43]. **voestalpine Schienen GmbH.** *Produktkatalog Rillenschienenweichen.* Wien, 2005.
- [44]. **voestalpine Schienen GmbH.** *Profile-Katalog.* Wien, 2004.
- [45]. **Kik, Walter, Menssen, Rainer und Moelle, Dirk.** Kräfte und Verschleiß in der Wendeschleife und im Abzweig einer Weiche.
[Hrsg.] Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI).
EI - Eisenbahningenieur (54). 4/2003, S. 47-53.
- [46]. **voestalpine Schienen GmbH.** *Ersatzteilkatalog für VS-20 & VS-60.* Wien, 2008.
- [47]. **Wiener Linien GmbH & Co KG - Bau- und Anlagenmanagement - Stabstelle Planung und Organisation.** *B6-B61-2-0011 - Oberbau-Handbuch, Oberbauarbeiten.* Wien, Jänner 2003.
- [48]. **Ossberger, Markus.** *Gleismesswagen - U-Bahn, Straßenbahn.* [DVD]. Wiener Linien GmbH & Co KG, 2004.
- [49]. **Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Bahnbau, [Hrsg.].** *Die Gleismesswagen - Zustandsdatenerfassung am Fahrweg.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, Abteilung Bahnbau, 2003.
- [50]. **Wiener Stadtwerke Holding AG.** Holding - Wiener Stadtwerke - Organigramm. *Wiener Stadtwerke.* [Online] 03. März 2008. [Zitat vom: 10. April 2008.]
<http://www.wienerstadtwerke.at/WienerStadtWerke/DOWNLOAD/Organigramm%20012008.pdf>.

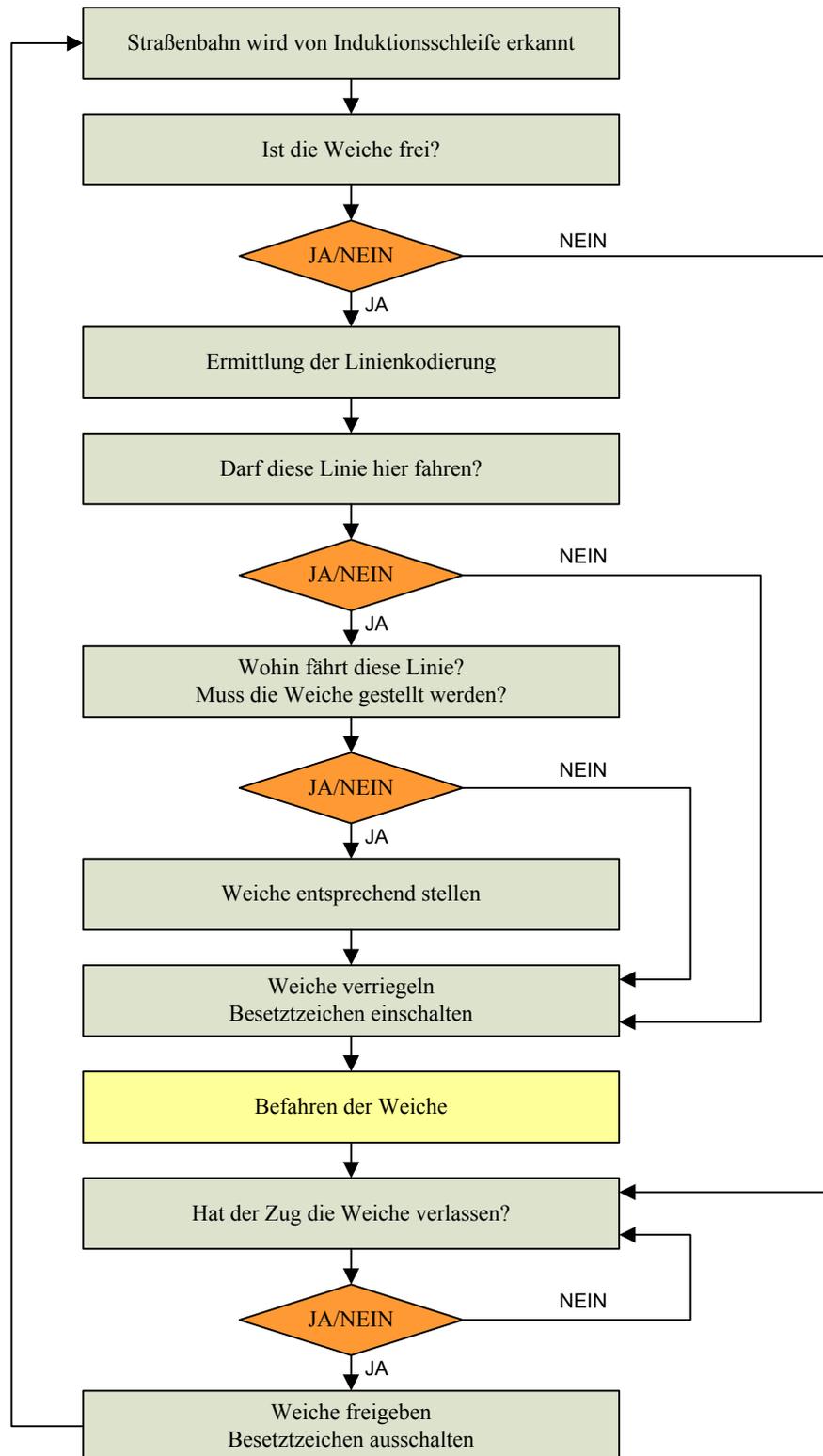
8 Anhang

Anhang 1: Organigramm Wiener Stadwerke Holding AG [50]



Anhang 2: Organigramm Wiener Linien GmbH & Co KG

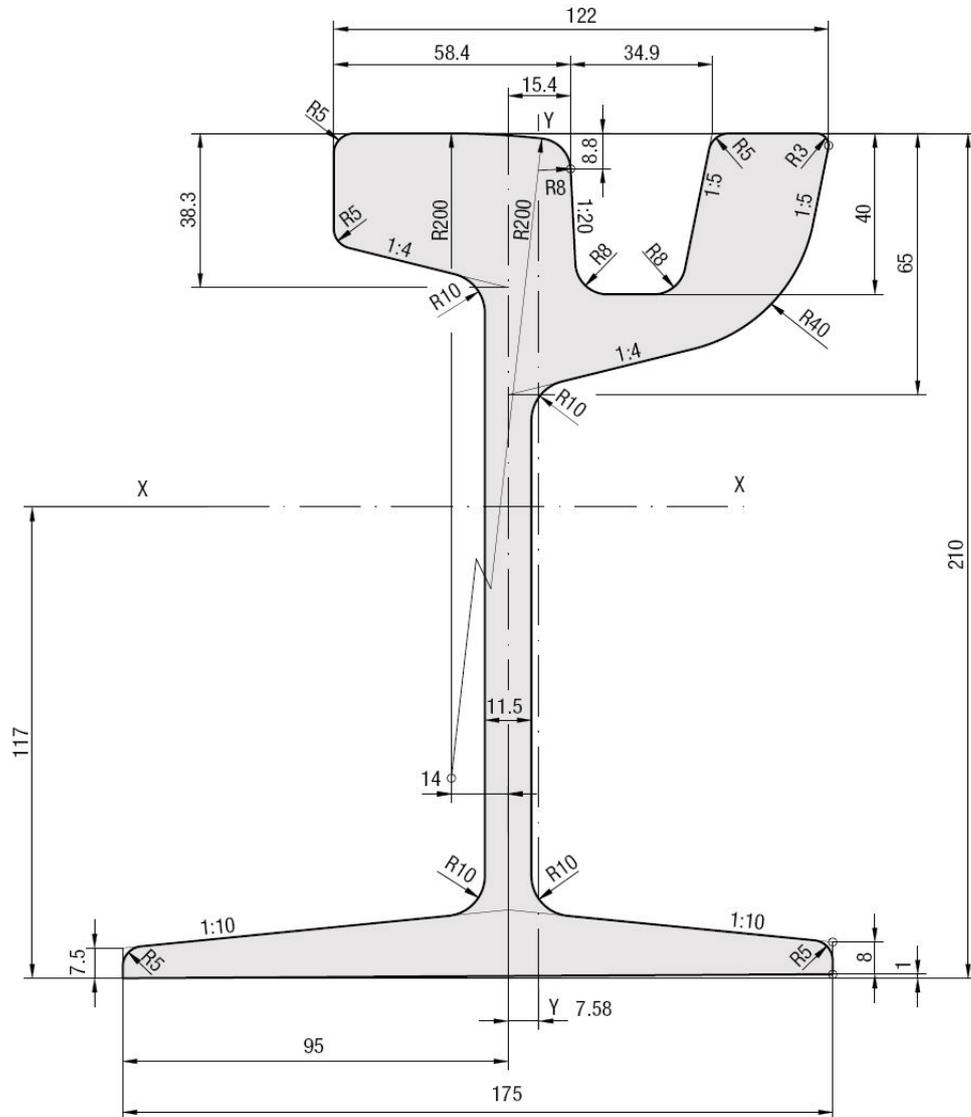


Anhang 3: Induktive Weichensteuerung

Anhang 4: Regelschienenprofile 63Ri (Ri210/95+80a) [44]

63Ri1 (Ri210/95+80a)

RILLENSCHIENEN, GROOVED RAILS



MASSE / MASS		63.13 kg/m	AUSGABE / EDITION	03.2004
FLÄCHE / AREA		80.42 cm ²	MASSTAB / SCALE	1:1.5
TRÄGHEITSMOMENT / MOMENT OF INERTIA	X-X	5019.2 cm ⁴		
	Y-Y	1020.1 cm ⁴		
WIDERSTANDSMOMENT / SECTION MODULUS	X-X Kopf / Head	540.6 cm ³		
	X-X Fuß / Base	428.4 cm ³		
	Y-Y links / left	99.4 cm ³		
	Y-Y rechts / right	140.9 cm ³	BLATTNUMMER / NUMBER OF SHEET	RI-2500

voestalpine
SCHIENEN GMBH