

**Entwicklung eines modularen Konzeptes
für die Instandhaltung schienengebundener Fahrzeuge
im öffentlichen Personennahverkehr**

Von Dipl.-Ing.
Christian Schwarzer
aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. J. Meyer

Prof. Dr.-Ing. M. Hecht

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14. Juli 2006

Berlin 2006

D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, zunächst am Fachgebiet "Förder- und Getriebetechnik", später am Fachgebiet "Konstruktion von Maschinensystemen".

Ich möchte diese Arbeit meiner Frau Beate und meinen beiden Töchtern Johanna und Annabelle widmen, die mich jederzeit motiviert und tatkräftig unterstützt haben. Insbesondere in der finalen Phase der Fertigstellung hat meine Familie mir mit vollem Einsatz den Rücken gestärkt. Dafür noch einmal vielen lieben Dank.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Severin, ehemaliger Leiter des Fachgebietes für Förder- und Getriebetechnik, gilt mein besonderer Dank für die anregenden Gespräche und Diskussionen in allen Phasen dieser Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer, als Leiter des Fachgebietes "Konstruktion von Maschinensystemen", möchte ich mich herzlich für die jederzeit gute Zusammenarbeit und die hilfreichen Gespräche und Anregungen bedanken.

Ein weiterer großer Dank geht an den Bereich U-Bahn-Fahrzeuge der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Mit großer Professionalität und viel Einsatz wurde hier die Datengrundlage für die Analysen geschaffen. Die vielen Diskussionen während unserer mehrjährigen Zusammenarbeit konnten immer wieder neue Ideen wecken. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere Herr Puls, als ehemaliger Leiter, Herr Süß, als heutiger Leiter des Bereichs, Herr Görlitz, der mir mit großem Engagement zu Seite stand, Herr Mahn und Herr Rappold.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Bruder Thorsten bedanken, der mich verstärkt in der Thematik Six Sigma und bei den durchgeführten Analysen mit großem Einsatz und Fachwissen in der Interpretation und dem Aufzeigen von Schwachstellen gefördert hat.

Meinem Vater gilt großer Dank für die kritische Beurteilung der gesamten Arbeit und die anregenden fachlichen und methodischen Hinweise.

Meinen ehemaligen studentischen Mitarbeitern Alexander, Benjamin, Florian, Niko und Roman und meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen möchte ich für die schöne Zeit und die stete und kollegiale Hilfsbereitschaft herzlich danken.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Hecht für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und Herrn Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Großhansdorf, 10.12.2006

Christian Schwarzer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	21
1.1	Problemstellung	21
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	22
2	Kundenzufriedenheit im ÖPNV	24
2.1	Erwartungen des Kunden an den ÖPNV	24
2.2	Einflussmöglichkeiten der Verkehrsunternehmen auf die Kunden- zufriedenheit.....	26
2.3	Spannungsfeld Instandhaltung – zwischen Kosten und Kunden- zufriedenheit.....	28
3	Instandhaltung – Grundmaßnahmen, Konzepte, Strategien	33
3.1	Grundmaßnahmen in der Instandhaltung.....	35
3.1.1	Inspektion.....	37
3.1.2	Wartung	38
3.1.3	Instandsetzung.....	39
3.1.4	Verbesserung.....	40
3.2	Konzepte in der Instandhaltung.....	41
3.2.1	Ausfallbedingte Instandhaltung	42
3.2.2	Vorbeugende Instandhaltung	44
3.2.3	Zustandsorientierte Instandhaltung.....	46
3.2.4	Perfektive Instandhaltung.....	49
3.3	Strategien zur Verwirklichung der Instandhaltungskonzepte.....	50
3.3.1	Total Quality Management (TQM).....	51
3.3.2	Reliability Centered Maintenance (RCM)	53
3.3.3	RAMS- LCC Management	53
3.3.4	Kaizen	56
3.3.5	Six Sigma	58
3.4	Kritische Beurteilung der angeführten Strategien.....	61
3.5	Gesetzliche Vorgaben für die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen	63

4	Erstellung der Datenbanken zur Untersuchung der Kostenstruktur und Qualitätsparameter von U-Bahnfahrzeugen.....	65
4.1	Umfang der zu untersuchenden Fahrzeugparameter.....	66
4.2	Vorgehensweise bei der Datenaufnahme	67
4.2.1	Datenaufnahme für die Kostenanalyse	67
4.2.2	Datenaufnahme für die Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle	69
4.2.3	Datenaufnahme für die Analyse des Instandhaltungsbedarfs.....	69
4.3	Aufbereitung der Daten	71
4.3.1	Kosten.....	71
4.3.2	Fahrgastwirksame Ausfälle	71
4.3.3	Instandhaltungsbedarf.....	72
4.4	Aufstellen der Datenbanken	72
5	Kostenstruktur langfristig betriebener U-Bahnfahrzeuge	74
5.1	Anschaffungskosten.....	76
5.2	Betriebskosten	78
5.2.1	Energie.....	78
5.2.2	Reinigung.....	79
5.3	Instandhaltungskosten	81
5.3.1	Betriebliche Inspektion & Wartung	81
5.3.2	Betriebliche Instandsetzung	84
5.3.3	Gesetzliche Inspektion & Wartung	86
5.3.4	Gesetzliche Instandsetzung	87
5.3.5	Vandalismus	88
5.4	Entsorgungskosten	90
5.5	Zusammenfassung der Analyseergebnisse	91
5.6	Bestimmung der optimalen Lebensdauer von U-Bahnfahrzeugen.....	94
6	Kennzahlengestützte Analyse der Instandhaltung einer U-Bahn-Flotte....	100
6.1	Definition der Untersuchungsinhalte und Zielwerte	102
6.1.1	Prozessablauf	102
6.1.2	Anforderungen an den Instandhaltungsprozess.....	105
6.1.3	Festlegung der Zielwerte.....	108

6.2	Analyse der erhobenen Daten.....	109
6.2.1	Analyse der Kosten für die betriebliche Instandhaltung	110
6.2.2	Analyse der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung (BOStrab).....	125
6.2.3	Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle	131
6.2.4	Analyse des Instandhaltungsbedarfs	136
6.3	Erkenntnisse aus der Analyse für die Ableitung eines allgemeingültigen Konzeptes zur Verbesserung der Wettbewerbsposition bestehender Instandhaltungssysteme von Schienenfahrzeugen.....	138
7	Modulares Konzept zur Verbesserung bestehender Instandhaltungssysteme schienengebundener Fahrzeuge im ÖPNV	145
7.1	Modul I – Kundenzufriedenheit.....	146
7.2	Modul II – Reinigung	147
7.3	Modul III – Betriebliche Inspektion & Wartung.....	148
7.4	Modul IV – Gesetzliche Inspektion & Wartung	150
7.5	Modul V – Instandsetzung & Verbesserung	152
7.6	Modul VI – Vandalismus.....	155
7.7	Modul VII – Life Cycle Cost.....	157
7.8	Modul VIII – Wissensmanagement.....	159
7.9	Modul IX – Instandhaltungsmanagement.....	160
8	Zusammenfassung und Ausblick	165
9	Quellenverzeichnis.....	167
10	Anhang.....	172

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Einflüsse auf die Erwartungen des Kunden nach TNS Infratest...	26
Abbildung 2-2:	Einflussmöglichkeiten des Verkehrsunternehmens auf die Kundenzufriedenheit im ÖPNV	27
Abbildung 2-3:	Phasen und deren gegenseitige Einflussnahme im Produktlebenszyklus eines Transportmittels	29
Abbildung 2-4:	Wechselwirkungen der Instandhaltung zwischen Kundenerwartungen, äußeren Einflüssen und Kosten	31
Abbildung 3-1:	Zusammenwirken von Elementen eines modernen Instandhaltungsmanagements	35
Abbildung 3-2:	Grundmaßnahmen und Konzepte der Instandhaltung	37
Abbildung 3-3:	Abbau und Erstellung des Abnutzungsvorrats nach DIN 31051	39
Abbildung 3-4:	Gliederung der Instandsetzung nach Matyas	40
Abbildung 3-5:	Teilmaßnahmen der Verbesserung /WAR-92/	41
Abbildung 3-6:	Maßnahmenfolge der ausfallbedingten Instandhaltung nach Knezevic	42
Abbildung 3-7:	Auswirkungen der ausfallbedingten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten	43
Abbildung 3-8:	Maßnahmenfolge der vorbeugenden Instandhaltung nach Knezevic	44
Abbildung 3-9:	Auswirkungen der vorbeugenden Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten	46
Abbildung 3-10:	Maßnahmenfolge der zustandsorientierten Instandhaltung nach Knezevic	46
Abbildung 3-11:	Auswirkungen der zustandsorientierten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten	48
Abbildung 3-12:	Auswirkungen der diagnoseoptimierten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten	49
Abbildung 3-13:	Maßnahmenfolge der perfektiven Instandhaltung	50

Abbildung 3-14:	Faktoren, die RAMS für Bahnen beeinflussen nach DIN EN 50126	54
Abbildung 3-15:	Grundgedanke von Six Sigma	59
Abbildung 4-1:	Ablauf beim Erstellen der Datenbanken.....	65
Abbildung 4-2:	Kostenstruktur von U-Bahnzügen	66
Abbildung 4-3:	Komponenten zur Bestimmung des Instandhaltungsbedarfs	70
Abbildung 4-4:	Ausschnitt aus der Datenbank für die Fristenuntersuchung.....	73
Abbildung 5-1:	Lebenszykluskosten von U-Bahnfahrzeugen.....	74
Abbildung 5-2:	Durchschnittliche Kilometerleistungen je Nutzwagen pro Jahr	76
Abbildung 5-3:	Durchschnittliche kumulierte Energiekosten für den Fahrbetrieb im Zeitraum 1992 bis 2004	79
Abbildung 5-4:	Durchschnittliche kumulierte Reinigungskosten im Zeitraum 1992 bis 2004	80
Abbildung 5-5:	Kumulierte Reinigungskosten ausgewählter U-Bahn- fahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004.....	81
Abbildung 5-6:	Durchschnittliche kumulierte Kosten für betriebliche Inspektion & Wartung im Zeitraum 1992 bis 2004	82
Abbildung 5-7:	Kumulierte Kosten für betriebliche Inspektion & Wartung ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004	83
Abbildung 5-8:	Kostenanteil der betrieblichen Inspektion & Wartung an den Anschaffungskosten unter Berücksichtigung der jährlichen Nutzwagenkilometerleistung	83
Abbildung 5-9:	Durchschnittliche kumulierte Kosten für betriebliche Instandsetzung im Zeitraum 1992 bis 2004	84
Abbildung 5-10:	Kumulierte Kosten für betriebliche Instandsetzung ausge- wählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004	85
Abbildung 5-11:	Kostenanteil der betrieblichen Instandsetzung pro Jahr an den Anschaffungskosten unter Berücksichtigung der jährlichen Nutzwagenkilometerleistung	86
Abbildung 5-12:	Kosten für eine gesetzliche Inspektion & Wartung je Fahrzeug.....	87
Abbildung 5-13:	Kosten für die Instandsetzung infolge einer gesetzlichen Inspektion & Wartung je Fahrzeug.....	88

Abbildung 5-14:	Durchschnittliche kumulierte Kosten für den Vandalismus im Zeitraum 1992 bis 2004.....	89
Abbildung 5-15:	Kumulierte Kosten für den Vandalismus ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004.....	90
Abbildung 5-16:	Durchschnittliche kumulierte Lebenszykluskosten im Zeitraum 1992 bis 2004 ohne Kosten für die gesetzliche Instandhaltung ...	93
Abbildung 5-17:	Beispielhafte Entscheidungsfindung für eine optimale Lebensdauer	96
Abbildung 5-18:	Durchschnittliche jährliche Kosten für Reinigung, Inspektionen, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten sowie Energiekosten über einen Lebenszyklus von 35 Jahren.....	98
Abbildung 6-1:	Einflussgrößen auf die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen	100
Abbildung 6-2:	Beispielhafte Abhängigkeiten zwischen den Einflussgrößen der Instandhaltung	101
Abbildung 6-3:	SIPOC für die planmäßige Instandhaltung	104
Abbildung 6-4:	CTQ Baum.....	107
Abbildung 6-5:	Aufteilung der Gesamtkosten für die Instandhaltung	109
Abbildung 6-6:	Gliederung der Analyse.....	110
Abbildung 6-7:	Kosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Instandhaltungsleistungsart	111
Abbildung 6-8:	Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Instandhaltungsleistungsart	112
Abbildung 6-9:	Kosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Fristenstufe	113
Abbildung 6-10:	Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Fristenstufe	114
Abbildung 6-11:	Kostenverteilung der Inspektion & Wartung, der zustandsorientierten Instandsetzung und des Baugruppenwechsels nach Fahrzeugprofil	115
Abbildung 6-12:	Kostenverteilung für die betriebliche Instandhaltung.....	116
Abbildung 6-13:	Gliederung der Kosten für die Arbeiten zur Frist F1	117
Abbildung 6-14:	Durchschnittliche Gesamtkosten pro Nutzwagen für die Arbeiten zur Frist F1 in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie	118

Abbildung 6-15:	Durchschnittliche Kosten pro Nutzwagen für Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung und Baugruppenwechsel einer Frist F1	120
Abbildung 6-16:	Aufteilung der Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung auf die Instandhaltungsleistungsarten	122
Abbildung 6-17:	Durchschnittlich monatliche Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung je Fahrzeugserie.....	123
Abbildung 6-18:	Kostenverteilung für die außerplanmäßigen Arbeiten in Abhängigkeit vom Fahrzeugprofil.....	124
Abbildung 6-19:	Kosten für die gesetzliche Instandhaltung je Nutzwagen	126
Abbildung 6-20:	Zusammenhang zwischen den Gesamtkosten, den Lohnkosten und den Materialkosten der gesetzlichen Instandhaltung	127
Abbildung 6-21:	Kostenaufteilung für die gesetzliche Instandhaltung hinsichtlich Lohn und Material.....	128
Abbildung 6-22:	Verteilung der Kosten je gesetzlicher Instandhaltung eines Nutzwagens auf die Instandhaltungsleistungsarten	129
Abbildung 6-23:	Durchschnittliche Gesamtkosten je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie für die gesetzliche Instandhaltung	130
Abbildung 6-24:	Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je Monat	132
Abbildung 6-25:	Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie	133
Abbildung 6-26:	Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der U-Bahn Linie	134
Abbildung 6-27:	Monatliche fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der U-Bahn-Linie	135
Abbildung 6-28:	Instandhaltungsbedarf je Monat.....	137
Abbildung 7-1:	Modularer Werkzeugkasten zur Verbesserung bestehender Instandhaltungssysteme im ÖPNV	145
Abbildung 7-2:	Entscheidungsbaum zur Kategorisierung von Bauteilausfällen.....	149
Abbildung 7-3:	Entscheidungsbaum für die Festlegung der Arbeitsinhalte von gesetzlicher Inspektion & Wartung.....	151
Abbildung 7-4:	Funktionsprinzip des Moduls „Instandhaltungsmanagement“	161
Abbildung 7-5:	Instandhaltungsgerechtes Kennzahlensystem.....	163

Abbildung 10-1:	Elemente des Kaizen Schirmkonzeptes.....	172
Abbildung 10-2:	Ausschnitt aus einem Fristenplan beispielhaft für die Serien S16/S17.....	172
Abbildung 10-3:	Buchungsablauf gemäß Instandhaltungsleistungsart Katalog....	173
Abbildung 10-4:	Inflationsrate der Jahre 1992 - 2004 /STA-05/	174
Abbildung 10-5:	SIPOC für die außerplanmäßige Instandhaltung	174
Abbildung 10-6:	SIPOC für die Verbesserung.....	175
Abbildung 10-7:	Kostenverteilung für Fremd- und Eigenmaterialien auf die Instandhaltungsleistungsarten zustandsorientierte Instand- setzung und Baugruppenwechsel	175
Abbildung 10-8:	Gliederung der Kosten für die Arbeiten zur Frist F2.....	176
Abbildung 10-9:	Durchschnittliche Gesamtkosten pro Nutzwagen für die Arbeiten zur Frist F2 in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie (Die 100 % Angabe der Kosten entspricht der 100 % Marke aus der analogen Darstellung zur Frist F1).....	176
Abbildung 10-10:	Durchschnittliche Kosten pro Nutzwagen für Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung und Baugruppenwechsel einer Frist F2	177
Abbildung 10-11:	Beispielhafte Ergebnisse eines t-Test.....	177
Abbildung 10-12:	Kosten je Fahrzeugserie für die außerplanmäßige Instandhaltung	178
Abbildung 10-13:	Zusammenhang zwischen den gefahrenen Kilometern seit der letzten BOStrab, den Lohnkosten und den Materialkosten der gesetzlichen Instandhaltung.....	178
Abbildung 10-14:	Durchschnittliche Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie	179
Abbildung 10-15:	Durchschnittliche Kosten infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie	179
Abbildung 10-16:	Monatliche fahrgastwirksame Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie	180
Abbildung 10-17:	Monatliche Werte für die fahrgastwirksamen Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm je U-Bahn Linie.....	180
Abbildung 10-18:	Monatliche Werte für die fahrgastwirksamen Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm je Fahrzeugserie	180

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Kriterien zur Definition der Kundenerwartungen an den ÖPNV ...	25
Tabelle 3-1:	Ziele in der Instandhaltung nach Matyas	34
Tabelle 3-2:	Verantwortlichkeiten im RAMS-Prozess während des Lebenszyklusses nach DIN EN 50126	55
Tabelle 3-3:	Inhalte und Ergebnisse des Six Sigma Problemlösungsmodells..	60
Tabelle 5-1:	Prognosegenauigkeit und Kostenentwicklung für definierte Kostenträger	94
Tabelle 5-2:	Bewertung der Kostenträger hinsichtlich ihres Einflusses auf die Entscheidungsfindung der optimalen Lebensdauer	95
Tabelle 6-1:	Fahrzeugserien der U-Bahnflotte der BVG	102
Tabelle 6-2:	Gliederung der betrieblichen und gesetzlichen Instandhaltungsleistungsarten am Beispiel der BVG (siehe Definitionen).....	103
Tabelle 6-3:	Matrix zur Auswahl der Kennzahlen.....	106
Tabelle 6-4:	Matrix zur Auswahl der Kennzahlen unter Berücksichtigung der Messbarkeit und der Beeinflussbarkeit	107
Tabelle 6-5:	Bewertung der Fahrzeugserien in Bezug auf fahrgastwirksame Ausfälle und Kosten für die betriebliche und die gesetzliche Instandhaltung	139
Tabelle 7-1:	Matrix zur Bestimmung des Gesamtgewichts verschiedener Schadensbilder infolge Vandalismus als Entscheidungsgrundlage für den erforderlichen Handlungsbedarf.....	156

Abkürzungsverzeichnis

Anz. d.	-	Anzahl der
apl	-	außerplanmäßig
BABW	-	betrieblicher außerplanmäßiger Baugruppenwechsel
BADP	-	betriebliche außerplanmäßige Diagnose & Prüfung
BAFS	-	betriebliche außerplanmäßige Fehlersuche
BARK	-	betriebliche außerplanmäßige Radprofilkorrektur
BAZI	-	betriebliche außerplanmäßige zustandsorientierte Instandsetzung
BIW	-	betriebliche Inspektion & Wartung
BOStrab	-	betriebsordnung Straßenbahn
BPBW	-	betrieblicher planmäßiger Baugruppenwechsel
BPDP	-	betriebliche planmäßige Diagnose & Prüfung
BPFS	-	betriebliche planmäßige Fehlersuche
BPRK	-	betriebliche planmäßige Radprofilkorrektur
BPZI	-	betriebliche planmäßige zustandsorientierte Instandsetzung
BVG	-	Berliner Verkehrsbetriebe
bzw.	-	beziehungsweise
ca.	-	circa
CTQ	-	critical to quality
d.	-	des
d. h.	-	das heißt
DEMAIC	-	define measure analyze improve control
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DKIN	-	Deutsches Komitee für Instandhaltung
DP	-	Deming Prize
DPMO	-	defects per million opportunities
EBO	-	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

EN	-	Europäische Normung
EQA	-	European Quality Award
ERP	-	enterprise resource planing
fwA	-	fahrgastwirksamer Ausfall
ggf.	-	gegebenenfalls
GIW	-	Gesetzliche Inspektion & Wartung
h	-	Stunde
I&W	-	Inspektion & Wartung
i. d. R.	-	in der Regel
IH-Bedarf	-	Instandhaltungsbedarf
IS	-	Instandsetzung
km	-	Kilometer
kWh	-	Kilowattstunde
LCC	-	Life Cycle Cost
LEP	-	Ludwig Erhard Preis
LISI	-	Leit-, Informations- und Sicherungssystem
MDBF	-	mean distance between failure
Mio.	-	Million
Nwkm	-	Nutzwagenkilometer
ÖPNV	-	öffentlicher Personennahverkehr
PABIK	-	permanente Analyse von Bauteilausfällen zur Identifizierung von Ausfallursachen und Kostentreibern
pl	-	planmäßig
QP-BB	-	Qualitätspreis Berlin Brandenburg
RAMS	-	reliability availability maintainability safety
RCM	-	reliability centered maintenance
Rei	-	Reinigung
SIPOC	-	supplier input process output customer
TAB	-	Technische Aufsichtsbehörde

TPM	-	Total Productive Maintenance
TQM	-	Total Quality Management
u. a.	-	unter anderem
U-Bahn	-	Untergrundbahn
Van	-	Vandalismus
VDV	-	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
vgl.	-	vergleiche
z. B.	-	zum Beispiel

Definitionen

Entsorgung:

Vorgang bei dem ein materielles Gut dem Recycling zugeführt oder verkauft wird.

Enterprise-Resource-Planning (ERP):

Enterprise-Resource-Planning bezeichnet die unternehmerische Aufgabe, die in einem Unternehmen vorhandenen Ressourcen (wie z.B. Kapital, Betriebsmittel, Personal) möglichst effizient für den betrieblichen Ablauf einzuplanen. Der ERP-Prozess wird in Unternehmen heute häufig durch mehr oder minder komplexe ERP-Systeme, d. h. Software unterstützt.

Fahrbetrieb:

Alle Tätigkeiten im Rahmen der Beförderung von Personen, die allein auf den Transport abzielen.

Fahrgastwirksamer Ausfall:

Ausfall eines Bauteils oder einer Baugruppe der eine Beförderung der Fahrgäste aus technischen Gründen oder wegen eines erhöhten Sicherheitsrisikos verhindert.

Fahrpreis:

Vom Kunden zu entrichtendes Entgelt für die Nutzung der zur Erbringung der Dienstleistung notwendigen Einrichtungen. Der Fahrpreis bestimmt sich aus den für die Erbringung der Dienstleistung anfallenden Kosten.

Fristenplan:

Darstellung der laufleistungsabhängigen Planung und Reihenfolge einzelner Instandhaltungsfristen.

Funktionsfähigkeit:

Eigenschaft eines Produktes alle aufgrund seiner Funktionsmerkmale zur Verfügung stehenden Funktionen zu erfüllen.

Inspektion: (DIN 31051)

Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von technischen Mitteln in einem System. Diese Maßnahmen beinhalten: Erstellen eines Planes, Vorbereitung der Durchführung, Durchführung, Vorlage, Auswertung, Ableitung der notwendigen Konsequenzen.

Instandhaltbarkeit:

Eigenschaft eines Produktes, die seine Betriebsfähigkeit im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen zu erhalten oder wiederherzustellen.

Instandhaltung: (DIN 31051)

Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von technischen Mitteln eines Systems. Die Maßnahmen beinhalten: Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Sie schließen ein die Abstimmung der Instandhaltungsziele mit den Unternehmenszielen und die Festlegung entsprechender Instandhaltungsstrategien.

Betriebliche Instandhaltung:

Instandhaltungsmaßnahmen, die rein aus dem täglichen Fahrbetrieb resultieren.

Gesetzliche Instandhaltung:

Instandhaltungsmaßnahmen, die gesetzlich vorgeschrieben sind. Dazu zählen alle Maßnahmen, die sich z. B. aus der Betriebsordnung Straßenbahn (BOStrab) ergeben.

Instandhaltungsbedarf:

Quotient aus der „Summe aller Wagen, die der Werkstatt zugeführt sind“ und der „Summe aller Wagen, die in der Verkehrsspitze benötigt werden“.

Instandhaltungsleistungsart:

Kostenträger für die Abrechnung von Instandhaltungstätigkeiten.

Dazu zählen:

Inspektion & Wartung zur BOStrab (gesetzliche Inspektion & Wartung):

Instandhaltungsleistungsart zur Planung und Abrechnung aller Kosten für geplante, an allen Fahrzeugen der jeweiligen Serie durchzuführende Arbeiten bei der BOStrab.

Inspektion & Wartung zur Frist (betriebliche Inspektion & Wartung):

Instandhaltungsleistungsart zur Planung und Abrechnung aller Kosten für planmäßige, im Rahmen der Fristen durchzuführende Arbeiten.

Instandsetzung infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung:

Unter dieser Instandhaltungsleistungsart werden alle Kosten gebucht, die infolge der BOStrab-Inspektionen anfallen. Ein solcher Auftrag ist grundsätzlich nur in Verbindung mit einem BOStrab-Auftrag möglich.

Instandsetzung infolge betrieblicher Inspektion & Wartung:

Die Instandhaltungsleistungsart dient als Kostensammler für alle Fahrzeuge, bei denen im Rahmen der Frist Schäden festgestellt werden. Ein solcher Auftrag ist grundsätzlich nur in Verbindung mit einem Frist-Auftrag möglich.

Instandsetzung zustandsorientiert:

Die Instandhaltungsleistungsart dient der Abrechnung aller fahrzeugbezogenen Instandsetzungen bzw. der damit verbundenen Arbeiten, die nicht im Rahmen der BOStrab erfolgen. Sie können aus Schadwagen oder infolge Frist resultieren.

Baugruppenwechsel:

Die Instandhaltungsleistungsart dient der Abrechnung aller Arbeiten und Materialien, die im direkten Zusammenhang mit dem Austausch von Baugruppen stehen.

Radprofilkorrektur:

Die Instandhaltungsleistungsart dient der Abrechnung aller Arbeiten, die in direktem Zusammenhang mit dem Drehen der Räder stehen.

Fehlersuche:

Unter dieser Instandhaltungsleistungsart werden alle Arbeiten zur Fehlersuche abgerechnet. Prüfungen, insbesondere Bauteil- oder Zwischenprüfungen und Vorabnahmen werden als fester Bestandteil des jeweiligen Instandhaltungs-, Instandsetzungs- oder Aufarbeitungsprozesses unter den entsprechenden Instandhaltungsleistungsarten abgerechnet.

Vandalismus:

Die Instandhaltungsleistungsart dient der Abrechnung aller Kosten für die Beseitigung von Vandalismusschäden, die nicht der Graffiti-, Verkleidungsschaden-, Glasschaden- oder Polsterschadenbeseitigung zuzuordnen sind.

Reinigung:

Die Instandhaltungsleistungsart dient der Abrechnung der Kosten für Innenreinigung und Außenwäsche.

Diagnose/Prüfung:

Die Instandhaltungsleistungsart dient ausschließlich zur Abrechnung von Ultraschall-Prüfungen sowie den damit verbundenen Vor- bzw. Nacharbeiten.

Instandsetzung: (DIN 31051)

Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes von technischen Mitteln eines Systems. Diese Maßnahmen beinhalten: Auftrag, Planung, Entscheidung, Vorbereitung, Vorwegmaßnahmen, Überprüfung, Durchführung, Funktionsprüfung, Fertigmeldung, Auswertung.

Kostendeckungsgrad:

Als Kostendeckung wird das Verhältnis von Einnahmen (bzw. Erlösen) zu Kosten bezeichnet. Prozentual ausgedrückt spricht man vom Kostendeckungsgrad. Ist er größer als 100%, entsteht Gewinn, unter 100% ein Verlust bzw. Fehlbetrag/Zuschussbedarf.

Kundenzufriedenheit:

Maß zur Beurteilung der am Kunden erbrachten Leistung. Die Kundenzufriedenheit gibt den Quotienten aus der am Kunden erbrachten Dienstleistung und der Erwartung des Kunden an die Dienstleistung an.

Nutzwagen:

Ein Nutzwagen ist die kleinste Fahrzeugeinheit.

Risiko: (DIN EN 50126)

Ein Risiko ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefahr, die einen Schaden verursacht.

Produktivität:

Die Produktivität ist das Verhältnis von Produktionsergebnis (Output) und eingesetzten Produktionsfaktoren (Input).

Produktpreis:

Wert, der alle dem Fahrzeug zurechenbaren Kosten, die direkt und indirekt mit der Erbringung der Transportleistung verbundenen sind, widerspiegelt. Er wird auf den Nutzwagenkilometer bezogen.

Prozess: (DIN EN ISO 9001)

Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt.

Sicherheit: (DIN EN 50126)

Das Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadensrisikos.

Strategie:

Genauer Plan des Vorgehens, um ein militärisches, politisches oder ähnliches Ziel zu erreichen.

System:

Allgemein spricht man von einem System, wenn gewisse Objekte samt ihrer Wechselwirkungen durch eine plausible Abgrenzung von ihrer Umgebung (d. h. der komplexen Realität) zu einer Gesamtheit zusammengefasst werden können.

Vandalismus:

Vandalismus ist die bewusste, normenverletzende Beschädigung oder Zerstörung fremden Eigentums.

Verfügbarkeit: (DIN EN 50126)

Fähigkeit eines Produktes, in einem Zustand zu sein, in dem es unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne eine geforderte Funktion erfüllen kann unter der Voraussetzung, dass die äußeren Hilfsmittel bereitstehen. Die Verfügbarkeit eines Produktes ist gekennzeichnet durch seine Betriebsfähigkeit und seine Betriebsbereitschaft.

Wartung: (DIN 31051)

Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes von technischen Mitteln eines Systems. Diese Maßnahmen beinhalten: Erstellen eines Wartungsplanes, Vorbereitung der Durchführung, Durchführung, Rückmeldung.

Zuverlässigkeit: (IEC 60050-191)

Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft.

Anmerkung: Zuverlässigkeit wird nur für allgemeine Beschreibungen im nichtquantitativen Sinn benutzt.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In zunehmendem Maße treten der öffentliche Nahverkehr und der Individualverkehr in Konkurrenz zueinander. Der in den letzten Jahren stark gestiegene PKW-Verkehr führt in den Ballungsgebieten zu erhöhter Umweltbelastung, zu Verkehrsstaus und Parkplatznot und bewirkt gleichzeitig eine rückläufige Auslastung der öffentlichen Verkehrsmittel. Dem versucht die Politik durch den Individualverkehr einschränkende bzw. erschwerende Maßnahmen entgegenzuwirken. Die Betreiber des öffentlichen Nahverkehrs bemühen sich, durch Verbesserung der Kundenzufriedenheit das Fahrgastaufkommen zu steigern. Der Verwirklichung dieser scheinbar selbstverständlichen Wunschvorstellung stehen allerdings erhebliche Schwierigkeiten entgegen, denn der Nahverkehr ist ein komplexes System auf das viele Einflussgrößen einwirken und das verkehrspolitischen und arbeitsrechtlichen Restriktionen unterliegt. Dadurch ist die Umsetzung als notwendig erkannter Maßnahmen nur langfristig möglich.

Das Behandeln derart vernetzter Strukturen als System hat sich in den letzten Jahren erfolgreich durchgesetzt. Darauf aufbauend haben sich neue Betrachtungsweisen und Methoden entwickelt, so z. B. die Verfolgung der Life Cycle Cost (LCC), wobei die Kosten eines Produktes von der Entwicklung bis zur Entsorgung gesamtheitlich gesehen werden.

In dieser Arbeit steht die Betrachtung der Life Cycle Cost schienenengebundener Fahrzeuge und die kennzahlenorientierte Analyse im Hinblick auf Kosten und Qualität unter Einbeziehung bewährter Strategien in der Instandhaltungsorganisation im Mittelpunkt, denn ein großer Teil der Kosten für die Erbringung der Transportdienstleistung beziehen sich auf die Anschaffung, den Betrieb und die Instandhaltung der Fahrzeuge.

Die Einflussmöglichkeiten des Betreibers auf die Life Cycle Cost wachsen mit der Lebensdauer der Fahrzeuge, da der Anteil der Instandhaltungskosten bezogen auf die Gesamtkosten, mit zunehmender Lebensdauer steigt. Unter diesem Gesichtspunkt stellt sich für den Betreiber die Frage nach der optimalen Lebensdauer. Schienengebundene Fahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr erreichen heute eine Lebensdauer von bis zu 40 Jahren.

Neben der Betrachtung der Fahrzeugkosten gewinnt die Ausrichtung interner Prozesse an den Erwartungen der Kunden zunehmend an Bedeutung. Um das Instandhaltungssystem der Kundenzufriedenheit anpassen zu können, helfen qualitätsorientierte Kennzahlen.

Die gegenseitige Abhängigkeit zwischen Kundenzufriedenheit, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit im öffentlichen Nahverkehr macht aus möglichen Gedankenmodellen zur Optimierung des Fahrbetriebes ein komplexes System. Die Reduzierung der Gesamtkosten bei gleichzeitiger Steigerung der Kundenzufriedenheit hat deswegen für die Betreiber höchste Priorität.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, ein in der Praxis anwendbares Konzept zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bestehender Instandhaltungssysteme für schienengebundene Fahrzeuge im ÖPNV zu entwickeln, das auf einer kennzahlengestützten Vorgehensweise aufbaut. Dabei werden eine hohe Kundenorientierung und eine gesamtheitliche Sichtweise auf die Instandhaltung angestrebt. Das Konzept soll eine zielgerichtete und strukturierte Vorgehensweise bei der Verbesserung von Instandhaltungsprozessen unterstützen, die durch Einführung von Kennzahlen eine durchgängige Mess- und Bewertbarkeit der Systemparameter ermöglicht. Grundlage zur Entwicklung des Instandhaltungskonzeptes bilden quantitative Analysen des Instandhaltungssystems der U-Bahn-Flotte der Berliner Verkehrsbetriebe. Die für die Entwicklung des Instandhaltungskonzeptes methodische Vorgehensweise wird in dieser Arbeit erarbeitet.

Den Ausgangspunkt der Überlegungen bilden die Erwartungen der Kunden an die Dienstleistungen des ÖPNV. Die Einflussmöglichkeiten der Verkehrsunternehmen auf die Kundenzufriedenheit führen in der Instandhaltung zu einem Spannungsfeld zwischen Kosten und Zuverlässigkeit. Diese Arbeit geht darauf ein, wie die Verkehrsunternehmen über die Instandhaltung auf die Erfüllung der Kundenerwartungen einwirken können.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht das System der Instandhaltung. Es werden die grundlegenden Maßnahmen der Instandhaltung erläutert und verschiedene Konzepte vorgestellt. Darauf aufbauend werden ausgewählte Strategien zur Umsetzung der Instandhaltungskonzepte erläutert. Dabei handelt es sich um Strategien und Methoden, die vornehmlich qualitäts- und kundenorientiert ausgerichtet sind. Die Ergebnisse eines im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Benchmarks, an dem sich 110 Verkehrs- und Instandhaltungsunternehmen beteiligt haben, führen zu einer kritischen Bewertung der vorgestellten Konzepte und Strategien.

Das Fundament für die gewonnenen Erkenntnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen ist eine in dieser Arbeit aufgebaute umfangreiche Datenbank. Die Daten wurden dankenswerterweise von den Berliner Verkehrsbetrieben entsprechend den Anforderungen zusammengestellt und im Rahmen dieser Arbeit einer umfangreichen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Unter Einbeziehung fahrzeugserien-

spezifischer Gegebenheiten werden die Daten danach harmonisiert und in anwendungsspezifischen Datenbanken zusammengefasst.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit nach der Aufbereitung der Daten, bildet die Untersuchung der Lebenszykluskosten einer ausgesuchten Fahrzeugserie über einen Zeitraum von 13 Jahren. Die Analyse ist in Anlehnung an die Phasen des Lebenszyklus, nämlich Anschaffung, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung, gegliedert. Insbesondere in den Bereichen Betrieb und Instandhaltung wird für die Analyse eine hohe Gliederungstiefe gewählt, um Problemfelder möglichst genau einzugrenzen. Eine Bewertung einzelner Kostenträger in Bezug auf ihren Einfluss führt zur Entscheidungsfindung für eine aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Lebensdauer. Darauf aufbauend wird die Kostenentwicklung für ausgewählte Kostenträger auf einen Zeitraum von 35 Jahren ausgeweitet, um deren reale Kostenentwicklung aufzuzeigen. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der optimalen Lebensdauer von U-Bahnfahrzeugen auf Basis der durchgeführten Untersuchungen.

Anhand einer detaillierten kennzahlengestützten Analyse der gesamten U-Bahn-Flotte werden die Problemfelder des bestehenden Systems aufgezeigt. Unter Einbeziehung statistischer Hilfsmittel erfolgt eine strukturierte und zielorientierte Untersuchung definierter Kosten- und Qualitätsparameter. Dazu wird die kostenbasierte Analyse in die Tätigkeitsbereiche der gesetzlichen und der betrieblichen Instandhaltung aufgeteilt. Die qualitätsorientierte Analyse basiert auf den Kennzahlen für die fahrgastwirksamen Ausfälle und für den Instandhaltungsbedarf. Damit ist eine ganzheitliche Sichtweise auf die Instandhaltungsprozesse verwirklicht. Abschließend werden aus der Analyse Erkenntnisse abgeleitet, die in das Konzept zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit schienengebundener Fahrzeuge im ÖPNV einfließen.

Das Ergebnis der vorangegangenen Analysen ist ein modular aufgebautes Konzept, das zum Ziel hat, die Wettbewerbsfähigkeit von Schienenfahrzeugen im ÖPNV zu verbessern. Dieser hier entwickelte Leitfaden basiert auf Ergebnissen praxisorientierter Untersuchungen und ist auf Verkehrsunternehmen und Instandhaltungsbetriebe anwendbar.

2 Kundenzufriedenheit im ÖPNV

Die Geschichte des ÖPNV in Berlin begann Mitte des 19. Jahrhunderts. Insbesondere die Arbeiter mussten täglich lange Strecken zwischen ihren Wohnungen und den Arbeitsstätten zurücklegen. Da der Individualverkehr zu diesem Zeitpunkt noch in der Anfangsphase stand entwickelten sich feste Verkehrsverbindungen, die anfangs allein durch die „Concessionirte Berliner Omnibus-Compagnie“ bedient wurden. Die eingesetzten Omnibusse wurden dabei durch Pferde gezogen. Mit der Zeit stiegen die Fahrgastzahlen pro Verkehrsmittel. Neben den Omnibussen wurden ab 1865 Straßenbahnen, also schienengebundene Fahrzeuge, eingesetzt, die ebenfalls von Pferden gezogen wurden /VER-03/¹⁾. Mit dem Bevölkerungswachstum in Berlin, vergrößerte sich das Stadtgebiet und die Forderung nach Ausweitung des Streckennetzes stieg. Verschiedene Gesellschaften versuchten alternative Antriebsarten zum Pferd, z. B. Dampfkraft, einzusetzen. Der wirtschaftliche Erfolg blieb jedoch aus, da die Wartung teuer und die Systeme reparaturanfällig waren. Weiterhin stieg die Rauchbelastung auf ein inakzeptables Maß an. 1879 stellte Werner von Siemens eine bahnbrechende Entwicklung für den ÖPNV, einen Elektromotor zum Antrieb von Straßenbahnen, vor. 1881 fuhr in Berlin die erste elektrisch betriebene Straßenbahn der Welt /LBS-96/. Um den Straßenverkehr teilweise vom ÖPNV zu entkoppeln, legte Siemens 1891 einen Entwurf für ein Netz elektrischer Hoch- und Untergrundbahnen beim königlichen Ministerium für öffentliche Arbeiten vor, das auch teilweise realisiert wurde. Im Dezember 1928 wurde die Berliner Verkehrs-Aktiengesellschaft (BVG) gegründet und somit der Grundstein zur Entwicklung eines leistungsfähigen und modernen Streckennetzes gelegt.

2.1 Erwartungen des Kunden an den ÖPNV

Mit der Entwicklung des ÖPNV änderten sich auch die Erwartungen der Fahrgäste. Was in Berlin Mitte des 19. Jahrhunderts mit der reinen Forderung nach Transport zwischen zwei Punkten im Stadtgebiet begann, hat sich zu einem System mit vielseitigen Anforderungen an den ÖPNV entwickelt. Die wichtigsten Kriterien, zur Definition der Kundenerwartungen an den Verkehr und an die Haltestellen bzw. Bahnhöfe zeigt Tabelle 2-1. Sie ist in Anlehnung an Veröffentlichungen der Berliner Verkehrsbetriebe /BVG-05/ und TNS Infratest /TNS-05/ zusammengestellt. Die Kriterien lassen sich nach den Merkmalen Zeit, Kosten und Qualität zusammenfassen. In Abhängigkeit der Kundenstruktur verschiebt sich das Gewicht jedes Einzelkriteriums als Teil der gesamtheitlichen Erwartung des Kunden an den ÖPNV. So können im Einzelfall z. B. die Sicherheit oder der Komfort eine größere Bedeutung für den Kunden darstellen, als das Tarifsysteem oder die Fahrzeit. In der heutigen Zeit gewinnt das Merkmal „Kosten“ im Hinblick auf die Erwartungshaltung des Kunden an Gewicht.

¹⁾ Internetquelle

Tabelle 2-1: Kriterien zur Definition der Kundenerwartungen an den ÖPNV

	Verkehr	Haltestelle / Bahnhof
Zeit	Taktfrequenz	Erreichbarkeit
	Fahrzeit	
	Pünktlichkeit	
	Anschlussicherheit	
Kosten	Tarifsystem	
	Preis-Leistungs-Verhältnis	
Qualität	Sicherheit	Sicherheit
	Sauberkeit	Sauberkeit
	Komfort	Komfort
	Mutter/Kind-gerechte Ausstattung	Mutter/Kind-gerechte Ausstattung
	Behindertengerechte Ausstattung	Behindertengerechte Ausstattung
	Fahrgastinformationen	Fahrgastinformationen
	Freundlichkeit des Personals	Freundlichkeit des Personals
	Möglichkeit d. Fahrradmitnahme	Abstellmöglichkeiten f. Fahrräder

Für den Fahrgast wäre idealerweise die Transportleistung in möglichst kurzer Zeit, zu minimalen Kosten bei hoher Qualität zu erbringen. Diese Erwartungshaltung kann von den Verkehrsunternehmen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des Systems nur bedingt erfüllt werden. Die Verkehrsunternehmen müssen abwägen, welcher Erfüllungsgrad der Kundenerwartungen anzustreben ist, um im Wettbewerb bestehen zu können. Ziel müssen hohe Fahrgastzahlen und eine langfristige Kundenbindung sein.

TNS Infratest, eines der weltweit führenden Marktforschungsunternehmen, sieht unterschiedliche Einflüsse auf die eigene Erwartungshaltung und die wahrgenommene Leistung /TNS-05/. Nach Abbildung 2-1 sind die Erwartungen abhängig vom individuellen Anspruchsniveau, vom Anbieter, vom Wissen des Kunden um Alternativen und den bisherigen Erfahrungen mit der angebotenen Leistung.

Im nachfolgenden Abschnitt wird diskutiert welche, Möglichkeiten für die Verkehrsunternehmen bestehen, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Erfüllung der Kundenerwartungen und der Wirtschaftlichkeit des Systems zu erzielen.

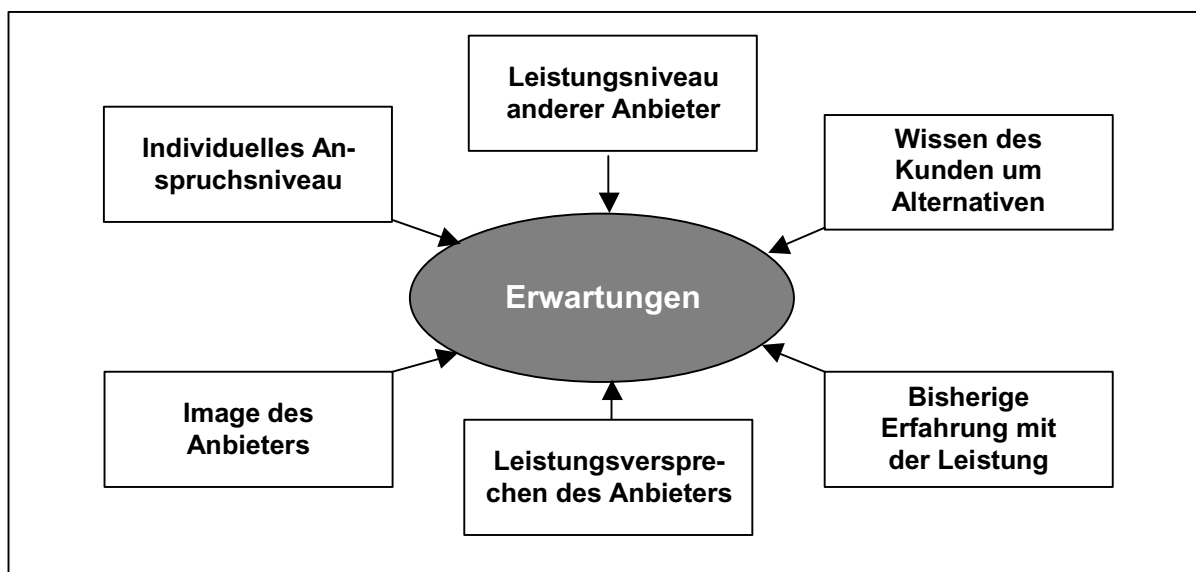


Abbildung 2-1: Einflüsse auf die Erwartungen des Kunden nach TNS Infratest

2.2 Einflussmöglichkeiten der Verkehrsunternehmen auf die Kundenzufriedenheit

Die Kundenzufriedenheit ist das Ergebnis eines Vergleichsprozesses von den Erwartungen des Kunden und der von ihm wahrgenommenen Leistung /TNS-05a/. Es muss also Ziel für die Zufriedenstellung der Kunden sein, möglichst gut den Erwartungen des Kunden gerecht zu werden. Die Kundenzufriedenheit wird damit zu einem marktgerichteten Maßstab für die Qualität der erbrachten Leistung /SIM-98/. Simon und Homburg sehen in der Kundenzufriedenheit eine Managementherausforderung, deren Ansatzpunkte sich auf alle Abschnitte des Wertschöpfungsprozesses erstrecken /SIM-98/. In Bezug auf eine Transportdienstleistung im ÖPNV, beeinflussen der Fahrzeughersteller und seine Zulieferer, das Verkehrsunternehmen und der Instandhaltungsbetrieb die Kundenzufriedenheit. Ihnen werden dabei unterschiedliche Gewichtungsfaktoren im Hinblick auf die Beeinflussbarkeit der Kundenzufriedenheit beigemessen. Den stärksten Einfluss auf die Kundenzufriedenheit hat das Verkehrsunternehmen. Es ist in Absprache mit dem Gewerksträger des ÖPNV, in Berlin z. B. mit dem Senat, für die erbrachte Leistung verantwortlich. Gelingt es dem Verkehrsunternehmen langfristig die Kunden durch Umsetzung verschiedener kundenorientierter Maßnahmen zufrieden zu stellen, vergrößert sich die Akzeptanz seines ÖPNV-Netzes. Als Folge daraus verstärkt sich die Nutzung und die Weiterempfehlung der öffentlichen Verkehrsmittel /TNS-05/.

Die Einflussmöglichkeiten der Verkehrsunternehmen auf die Kundenzufriedenheit im ÖPNV lassen sich wie in Abbildung 2-2 dargestellt in die materiellen Bereiche Fahrzeug und Haltestelle/Bahnhof und in die strategischen Bereiche Strecken-, Zeit-, Informations- und Fahrpreismanagement gliedern. Zwischen den Bereichen bestehen Abhängigkeiten, die vom Verkehrsunternehmen nur unter großen Anstrengungen beeinflussbar sind. So steht z. B. die Anzahl der Fahrzeuge in Wechselwirkung mit dem Strecken-, dem Zeit- und dem Fahrpreismanagement. Es bestehen somit direkte Einflussmöglichkeiten des Verkehrsunternehmens auf die Kundenzufriedenheit z. B. durch Fahrpreissenkung, durch Steigerung der Taktfrequenz. Ziel des Verkehrsunternehmens muss es sein, seine Bemühungen in den einzelnen Bereichen so zu gestalten, dass ein gutes Mischungsverhältnis entsteht, damit der Fahrgast in einem wirtschaftlich vertretbarem Rahmen zufrieden gestellt werden kann.

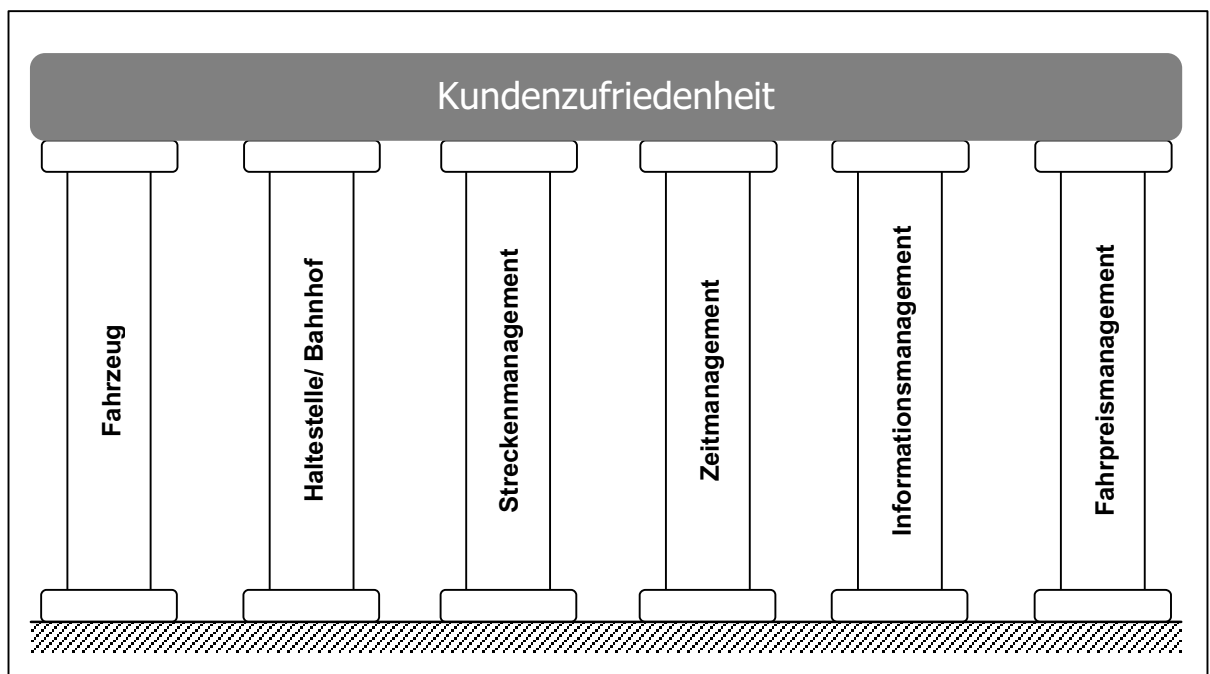


Abbildung 2-2: Einflussmöglichkeiten des Verkehrsunternehmens auf die Kundenzufriedenheit im ÖPNV

Die Fahrzeuge beeinflussen die Kundenzufriedenheit insbesondere durch ihre Zuverlässigkeit, ihren Komfort und die Möglichkeit der Fahrradmitnahme sowie indirekt über die Kosten für Instandhaltungsarbeiten, da sich diese auf den Kostendeckungsgrad auswirken. Der Komfort und die Kosten für die Instandhaltung nehmen auch im Bereich Haltestelle/Bahnhof eine wichtige Rolle ein. Weiterhin kann das Verkehrsunternehmen durch Erreichbarkeit der Haltestellen und die Möglichkeit dort Fahrräder oder PKW abzustellen, auf die Zufriedenstellung der Kunden einwirken. Für das Streckenmanagement stellen die Abdeckung des Einzugsgebietes und die Umsteigemöglichkeiten zwischen verschiedenen Linien eine entscheidende Funktion dar. Die Verkehrsunternehmen haben die Möglichkeit durch entsprechendes Zeitmana-

gement die Taktfrequenz, die Fahrzeit und die Pünktlichkeit zu steuern und dadurch den Erwartungen des Kunden gerecht werden. Das Informationsmanagement kann durch Bereitstellung von Abfahrtszeiten der Verkehrsmittel, von Informationen über Umsteigemöglichkeiten und eventuelle Fahrplanänderungen oder Änderungen der Streckenführung einen zusätzlichen Beitrag zur Kundenzufriedenheit leisten. Das Fahrpreismanagement nimmt eine Schlüsselfunktion in Bezug auf zufriedene Kunden ein. Viele der vom Kunden erwarteten Leistungen gehen über die ursprüngliche Funktion des ÖPNV, einen Fahrgast zwischen zwei Haltestellen zu befördern, hinaus. Diese Mehrleistung spiegelt sich möglicherweise im Fahrpreis wider. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Großzahl der Kunden des ÖPNV mit den aktuellen Fahrpreisen nicht zufrieden sind /TNS-05/. Das Verkehrsunternehmen muss hier seine Bemühungen entsprechend orientieren, um ein leistungsgerechtes Tarifsystem anzubieten.

2.3 Spannungsfeld Instandhaltung – zwischen Kosten und Kundenzufriedenheit

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass der Fahrpreis eine wichtige Rolle für die Kundenzufriedenheit spielt. Eine Reduzierung des Fahrpreises bei gleichzeitiger Beibehaltung der erbrachten Leistung, wird also immer eine Steigerung der Kundenzufriedenheit zur Folge haben. Für das Verkehrsunternehmen wird die Gestaltung der Beförderungstarife zu einem wichtigen Instrument für die Bindung und Gewinnung von Kunden. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des ÖPNV kommt es zu einem Spannungsfeld zwischen dem Fahrpreis und der Summe aller Kosten für die Erbringung der Transportleistung, das sich im Kostendeckungsgrad widerspiegelt. Diese wichtige Kennzahl für die Wirtschaftlichkeit eines Systems ist neben der Instandhaltung und dem Betrieb der Fahrzeuge von einer Vielzahl weiterer Einflüsse abhängig, u.a. politische Entscheidungen und Anforderungen des Bestellers. Der Besteller hat die Möglichkeit Qualitäten für zu erbringende Leistungen, z. B. Sauberkeit von Fahrzeugen und Taktfrequenzen, vorzugeben. Es werden somit Rahmenbedingungen geschaffen, die einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten der Verkehrsunternehmen haben können. Auf der Einnahmeseite steht das Fahrgeld und, unter der Annahme konstanter Fahrgastzahlen, somit direkt der Fahrpreis. Dieser hat derzeit im deutschen ÖPNV eher noch politischen Charakter, als dass darüber ein hundertprozentiger Kostendeckungsgrad erzielt werden kann.

Allgemein lassen sich die Kosten in einem Verkehrsunternehmen nach den Elementen seiner Funktionsstruktur wie folgt gliedern:

Kosten für

- Fahrbetrieb,
- Fahrzeuge,
- Infrastruktur,
- Kundenmanagement,
- Overhead und
- Subunternehmer.

Die Kosten für den Fahrbetrieb resultieren größtenteils aus den Kosten für den Fahrdienst sowie für die Betriebsplanung und -lenkung. Diese umfassen die Fahr- und Dienstplanung sowie die Leitstelle und die Stellwerker. Die Kosten für die Fahrzeuge setzen sich analog zu den Phasen des Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2-3) aus den Kosten für die Anschaffung, die Instandhaltung, den Betrieb und die Entsorgung zusammen. Zwischen den einzelnen Phasen bestehen Abhängigkeiten, die langfristig die Gesamtkosten im Lebenszyklus eines Transportmittels beeinflussen. So können beispielsweise größere Investitionen bei der Beschaffung, aufgrund erhöhter Anforderungen an die Fahrzeugzuverlässigkeit, die Summe der Instandhaltungskosten auf einem entsprechend niedrigerem Niveau halten.

Die Infrastrukturkosten werden größtenteils durch die Kosten für Gleise, Signal- und Kommunikationstechnik, Tunnel und Brücken sowie Haltestellen und Bahnhöfe inklusive deren Betriebskosten hervorgerufen. Der Bereich Kundenmanagement verantwortet die Kosten zur Gewährleistung der Fahrgastsicherheit auf den Bahnhöfen und in den Transportmitteln. Weiterhin verursachen in diesem Bereich das Marketing, die strategische Verkehrsplanung aber auch die Fahrausweisprüfung einen Großteil der Kosten. Zum Overhead zählen u. a. die Verwaltung, das Personalwesen und die Abteilung für die Datenverarbeitung. Kosten für Subunternehmer können z. B. entstehen, wenn ausgewählte Fahrstrecken durch externe Unternehmen bedient werden.

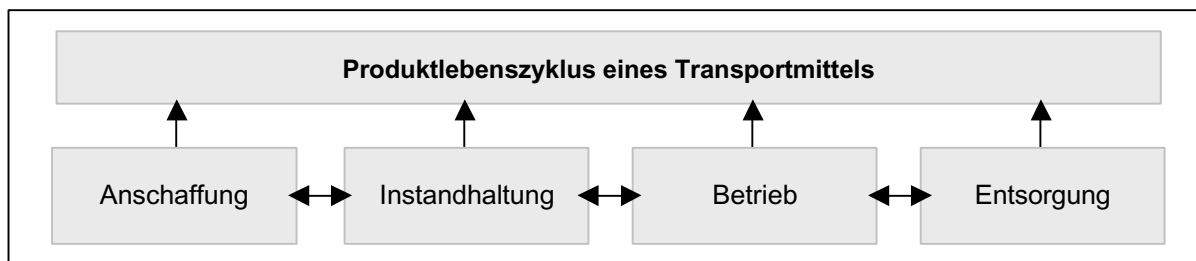


Abbildung 2-3: Phasen und deren gegenseitige Einflussnahme im Produktlebenszyklus eines Transportmittels

Einen großen Teil der Gesamtkosten für die Erbringung der Transportleistung verursachen die Fahrzeuge. So legt das Verkehrsunternehmen die Fahrzeugkosten langfristig auf den Fahrpreis um. Sie sind damit fahrgastwirksam und beeinflussen die

Kundenzufriedenheit. Einen besonderen Einfluss auf die Fahrzeugkosten haben die Instandhaltungskosten, da insbesondere Schienenfahrzeuge eine hohe Lebensdauer von teilweise über 35 Jahren aufweisen. Dadurch können in Summe die Instandhaltungs- und die Betriebskosten die Anschaffungskosten übersteigen. Weiterhin hängt die Kundenzufriedenheit von der Zuverlässigkeit und dem Komfort des Transportmittels ab. Die Zuverlässigkeit und der Komfort sind konstruktionsbedingt und werden im Leben eines Fahrzeugs durch die Instandhaltung beeinflusst. Es entstehen dadurch also Wechselwirkungen zwischen der Instandhaltung und der Kundenzufriedenheit. Nachfolgend werden diese Wechselwirkungen anhand Abbildung 2-4 näher beleuchtet.

Seit Entstehung des ÖPNV haben sich die Funktionen und die Sicherheitsstandards der Fahrzeuge ständig weiterentwickelt. So erwartet der Fahrgast heutzutage von einem Transportmittel einen gewissen Komfort, wie z. B. Infotainment und selbsttätig öffnende Türen, bei hoher Sicherheit und Sauberkeit sowie höchster Zuverlässigkeit. Weiterhin wird von Kunden ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis für die Transportleistung gefordert. Die Erfüllung der Kundenerwartungen wird stark durch die Instandhaltung der Transportmittel beeinflusst. Auf der anderen Seite ist die Instandhaltung von verschiedenen äußeren Einflüssen, wie Fahrzeugkonstruktion, Vandalismus, Gesetzen und Fahrbetrieb geprägt. Von der Instandhaltung wird demnach viel mehr erwartet, als die Transportmittel durch entsprechende Maßnahmen in einem funktionsfähigen und sicheren Zustand zu halten bzw. sie wieder in diesen zurückzuführen. Die Wünsche der Kunden und die äußeren Einflüsse auf die Instandhaltung, stehen, wie in Abbildung 2-4 auf der Folgeseite dargestellt, in Wechselwirkung mit den Kosten für die Inspektion, die Wartungs-, die Instandsetzungs- und Verbesserungsarbeiten.

Ausgangspunkt für notwendige Instandhaltungstätigkeiten bildet der Fahrbetrieb. Die durch den Betrieb entstehenden Belastungen führen zu einer ständigen Reduzierung des jeweiligen Abnutzungsvorrates einzelner Baugruppen. Um einen Fahrzeugausfall zu verhindern, werden meistens vorzubeugend oder zustandsorientiert Instandhaltungsarbeiten, wie Inspektion, Wartung oder Instandsetzung, durchgeführt. Der Fahrgast würde damit im Idealfall keine negative Auswirkung der Instandhaltung auf den Fahrbetrieb spüren. Leider zeigt die Realität, dass es trotz vorbeugender oder zustandsorientierter Ausrichtungen der jeweiligen Instandhaltungsstrategie, zu Ausfällen kommt, die fahrgastwirksam sind. Die Auswirkungen des Fahrbetriebs liegen damit zusätzlich in einer Beeinflussung der Zuverlässigkeit.

Die Zuverlässigkeit wird weiterhin maßgeblich durch die Konstruktion der Fahrzeuge beeinflusst. Je nach konstruktiver Gestaltung von Bauteilen und Baugruppen können diese auch zu unvorhersehbaren Ausfällen führen. Die Konstruktion bildet damit die Basis für die Instandhaltbarkeit der Fahrzeuge und für den Umfang des Ersatzteilwe-

sens. Die Fahrzeughersteller zwingen somit die Instandhaltung in einen Rahmen notwendiger Instandhaltungstätigkeiten, die entsprechende Kosten zur Folge haben. Der Hersteller ist insofern auch an der Erfüllung der Kundenerwartungen im Hinblick auf Fahrpreis und Zuverlässigkeit beteiligt. Die Fahrzeugkonstruktion hat weiterhin Einfluss auf die Sicherheit und den Komfort des Fahrzeugs.

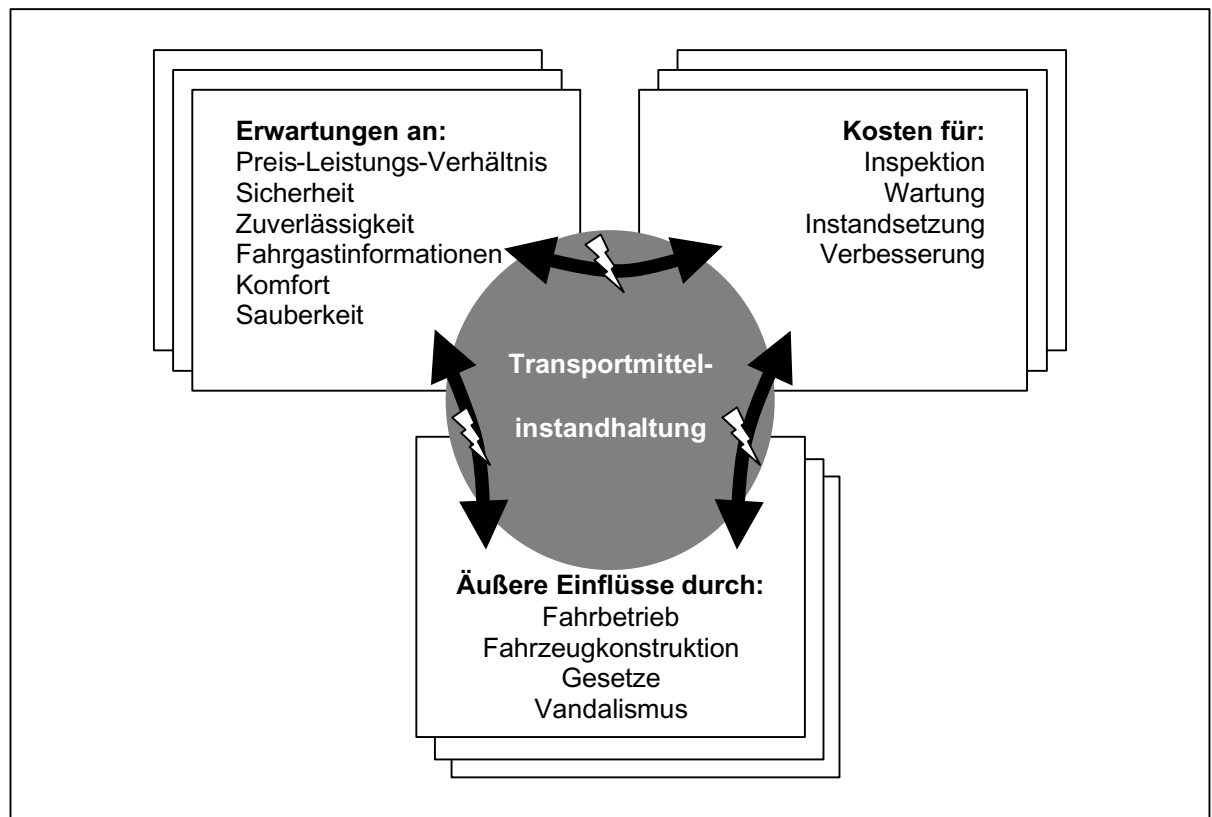


Abbildung 2-4: Wechselwirkungen der Instandhaltung zwischen Kundenerwartungen, äußeren Einflüssen und Kosten

Die Einhaltung der Sicherheit während des Betriebes liegt nicht nur in den Händen der Hersteller, sondern auch in denen der Instandhalter. Der Instandhaltende Betrieb ist laut Gesetz dazu verpflichtet, sicherheitsrelevante Bauteile und Baugruppen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren und ggf. entsprechende Maßnahmen zur Wiederherstellung eines sicheren Zustands des Fahrzeugs einzuleiten. Damit wird eine Risikoreduzierung im Hinblick auf Bauteilausfälle mit katastrophalen Folgen – wir erinnern uns an die Challenger Katastrophe 1986, bei der ein defekter Dichtungsring die Ursache für den Tod von sieben Astronauten war – erzielt. Die mit den gesetzlichen Randbedingungen verbundenen Instandhaltungstätigkeiten beeinflussen wiederum den Kostendeckungsgrad.

In der heutigen Zeit werden die Tätigkeiten im Rahmen der Instandhaltung nicht mehr ausschließlich durch betriebsbedingte Abnutzung hervorgerufen. Der zunehmende Vandalismus ist mittlerweile zu einer wichtigen Größe in Bezug auf die In-

standsetzungskosten, auf die Zuverlässigkeit und die Sauberkeit sowie auf den Komfort geworden. Er beeinflusst die Kundenzufriedenheit und hat sich zu einer bedeutsamen Störgröße für die Wirtschaftlichkeit von Verkehrsunternehmen entwickelt.

Die beschriebenen Wechselwirkungen führen die Verkehrsunternehmen in einen Zielkonflikt, der Kompromisslösungen im Hinblick auf das Zusammenspiel von Kundenzufriedenheit, Instandhaltungskosten und Einflüssen auf die Instandhaltung fordert. Diese sind geprägt durch die Philosophie jedes einzelnen Verkehrsunternehmens. Ziel dieser Dissertation ist, einen Beitrag zur langfristigen Steigerung der Kundenzufriedenheit durch eine kunden- und wettbewerbsorientierte Instandhaltungsstrategie zu liefern.

3 Instandhaltung – Grundmaßnahmen, Konzepte, Strategien

Die Instandhaltung langfristig betriebener, kapitalintensiver Fahrzeuge nimmt eine Schlüsselfunktion für die Wettbewerbsfähigkeit eines Fuhrparks ein. Sie hat entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Fahrzeuge, die sich direkt in deren Auslastung und Sicherheit widerspiegelt. Darüber hinaus verursacht die Instandhaltung erhebliche Kosten, die, je nach Lebensdauer des Fahrzeugs, die Anschaffungskosten übersteigen können.

Bahr /BAH-70/ sieht in allen Ausfällen die Ursache für wirtschaftliche Verluste und führt weiter aus, dass im Interesse einer ständigen Erhöhung der Effektivität, die Summe von Instandhaltungsaufwendungen und Produktionsverlusten auf ein Minimum zu reduzieren ist. Damit wird die Instandhaltung zu einem zentralen Instrument für den wirtschaftlichen Erfolg. In Europa wurden zu Beginn des zweiten Jahrtausends ca. 1.500 Mrd. €/a allein für Instandhaltung aufgewendet. Ein Sechstel von diesen Kosten, ca. 250 Mrd. €/a, wurden allein in Deutschland für Instandhaltungstätigkeiten investiert /KUH-03/.

Die Instandhaltung steht im engen Zusammenhang mit ökologischen Zielen, wie z. B. Schonung von Ressourcen und Ausnutzung erneuerbarer Energie- und Rohstoffressourcen. In der Instandhaltung kann durch Aufarbeitung von Altteilen ein großer Beitrag zur Schonung von Ressourcen und durch die vollständige Ausnutzung vorhandener Abnutzungsvorräte eine Reduzierung der Verschwendung von Rohstoffressourcen erreicht werden. Durch Umbaumaßnahmen in Rahmen der Instandhaltung können Anpassungen der Maschine an den neusten Stand der Technik erzielt werden. Damit wird der Einsatz modernster Antriebe und die Verbesserung oder Einführung von Energiekreisläufen möglich. Die Instandhaltung wird somit zu einem wichtigen Instrument auf dem Weg zur Nachhaltigkeit.

Schon aus dem Altertum ist bekannt, dass die Instandhaltung eine wichtige Einflussgröße auf den Lebenszyklus von Anlagen ist. Der Römer Agrippa übernahm im Jahre 34 v. Chr. die Verwaltung der schlecht funktionierenden Aquädukte und machte diese durch ständige Betreuung wieder funktions- und leistungsfähig /MER-99/. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts erkannte der Engländer Maudsley die Wichtigkeit instandhaltungsgerechter Konstruktionen und forderte die Standardisierung von Bauteilen, um deren Austausch zu erleichtern /BEC-94/. Die Notwendigkeit einer geplanten und gesteuerten Instandhaltung zur Steigerung der Verfügbarkeit und der Lebensdauer von Maschinen ist aus der Mitte des 20. Jahrhunderts bekannt. Eichler /EIC-77/ sieht die Aufgabe des Instandhalters darin, den Gebrauchswert der technischen Arbeitsmittel und technischen Gebrauchsgüter kostenoptimal so lange zu erhalten, wie es volkswirtschaftlich gerechtfertigt ist. Durch zusätzliche Anforderungen im Bereich der

Produktqualität und der Zuverlässigkeit wurde seit Beginn der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts die Forderung nach einer zustands- und zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung ausgelöst /MAT-99/. Einigkeit besteht heute in Fachkreisen darüber, dass die Bedeutung der Instandhaltung im Bereich der Investitionsgüter und der kostenintensiven Konsumgüter zunehmen wird. Dabei sind die zentralen Ziele der Instandhaltung die Maximierung von Zuverlässigkeit und Sicherheit bei gleichzeitiger Kostenminimierung /MAT-99/ /ROE-01/. Matyas leitet daraus sowohl technisch-organisatorische als auch wirtschaftliche Ziele der Instandhaltung ab (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Ziele in der Instandhaltung nach Matyas

Technisch-organisatorische Ziele	Wirtschaftliche Ziele
- Verbesserung des technischen Zustandes der Betriebseinrichtungen - Reduzierung der Folgeschäden - Reduzierung von Maschinenausfällen - Reduzierung des Instandhaltungsumfanges - Vereinheitlichung der Aufbau- und Ablauforganisation - Verbesserung der Kommunikation mit anderen Betriebsteilen	- Werterhaltung der Betriebseinrichtungen - Reduzierung der Materialkosten - Reduzierung der Ausfall- und Folgekosten - Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit - Reduzierung der Personalkosten

Rasch /RAS-00/ erweitert diese Ziele noch um die Forderung nach Steigerung der Arbeitssicherheit und Verringerung der Personalfluktuation. Aus Sicht von Rasch ist es durch die Optimierung aller Tätigkeitsfelder der Instandhaltung möglich, sich gegenüber den Konkurrenzunternehmen eine bessere Ausgangssituation in Bezug auf die Erfolgsfaktoren Kosten, Qualität, Zeit und Flexibilität zu verschaffen. Zur Generierung eines Wettbewerbspotentials auf Basis dieser Faktoren, unter Einbeziehung von Kundenzufriedenheit und Lebenszykluskosten, wird der Einsatz verschiedener Konzepte und Strategien notwendig. Die Elemente eines modernen Instandhaltungsmanagements und ihr Zusammenwirken sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

Instandhaltungsprozesse, die aus den Grundmaßnahmen der Instandhaltung (vgl. Kapitel 3.1) hervorgehen, bilden die Basis des Instandhaltungsmanagements. Ihre getrennte Betrachtung und Analyse ist ein elementarer Baustein für ein wettbewerbsfähiges Instandhaltungssystem. Auf die Instandhaltungsprozesse wirken, je nach Geschäftsstrategie, verschiedene Elemente, die die Güte und das Ergebnis der Prozesse beeinflussen. In ein modernes Instandhaltungsmanagement muss daher ne-

ben den Instandhaltungskonzepten und -strategien die Betrachtung der Lebenszykluskosten und die Analyse der Kundenzufriedenheit zur kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse und des Geschäftsergebnisses einbezogen werden. Die Orientierung am Kunden und an den Kosten zwingt zu einer permanenten Kontrolle der internen Zielsetzung.

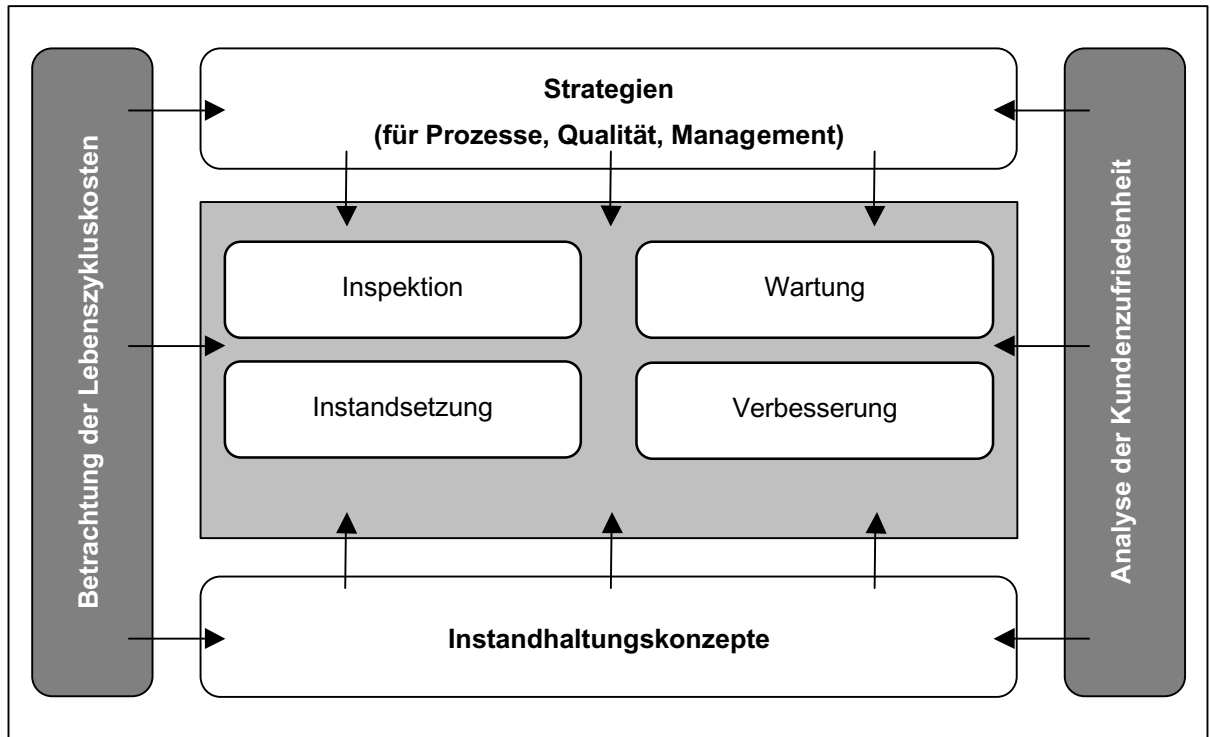


Abbildung 3-1: Zusammenwirken von Elementen eines modernen Instandhaltungsmanagements

Auf die Elemente der Kundenzufriedenheit und der Lebenszykluskosten geht bereits das vorangegangene Kapitel ein. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit den Prozessen der Instandhaltung. Gängige Konzepte und innovative Strategien werden vorgestellt und diskutiert.

3.1 Grundmaßnahmen in der Instandhaltung

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „Instandhaltung“ sehr eingeschränkt eingesetzt. „In (Zu)stand halten“ im eigentlichen Sinne ist allerdings nicht die einzige Aufgabe der Instandhaltung. Im technischen Verständnis verbirgt sich hinter der Instandhaltung ein komplexes Zusammenspiel aller Prozesse, die zur Erhaltung und zur Verbesserung des Zustandes einer Maschine erforderlich sind. Nach Norm /DIN-03/ ist die Instandhaltung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ definiert.

Die DIN-Norm /DIN-03/ unterteilt die Gesamtheit aller Maßnahmen der Instandhaltung in die vier Grundmaßnahmen:

- Inspektion,
- Wartung,
- Instandsetzung und
- Verbesserung.

Eichler /EIC-77/ gliedert weiterhin die Instandhaltung in die drei Konzepte:

Instandhaltung

- nach starrem Zyklus,
- nach Überprüfungen und
- nach Ausfall.

Der Instandhaltung „nach starren Zyklus“ sind definierte Tätigkeiten in festen Zeit- oder Kilometerabständen mit vorbeugendem Charakter zugeordnet. Sie wird im Folgenden als vorbeugende Instandhaltung bezeichnet. Die Maßnahmen bei der Instandhaltung „nach Überprüfungen“ sind die Folge einer vorhergehenden Inspektion. Sie wird daher auch zustandsorientierte oder inspektive Instandhaltung genannt. Die Instandhaltung „nach Ausfall“ wird in der Fachliteratur als ausfallbedingte oder als „korrektive“ Instandhaltung bezeichnet. In dieser Arbeit wird alleine der Begriff „ausfallbedingt“ verwendet, da dem Begriff „korrektiv“ von der Herkunft und im Sprachgebrauch eine andere Bedeutung zukommt. Der Begriff „korrektiv“ bedeutet laut Duden /DUD-05/ Fehlhaltungen, Mängel o. Ä. auszugleichen. Aus dem Lateinischen abgeleitet stammt korrekt von „corrigere“ und wird demnach mit „berichtigen“ oder „verbessern“ übersetzt /PER-02/. Unter zu Hilfenahme dieser Annäherung kann eine Gleichsetzung von ausfallbedingter und korrektiver Instandhaltung nicht getragen werden, da eine Korrektur nicht zwingend einen Ausfall von Bauteilen zur Voraussetzung hat.

Behrenbeck /BEH-94/ erweitert Eichlers drei Konzepte um eine perfektive Instandhaltung, die der zukunftsgerichteten Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Einheit dient.

Die vier genannten Konzepte werden im Kapitel 3.2 näher durchleuchtet.

Die Zuordnung der Grundinstandhaltungsarten nach DIN 31051 zu den von Eichler und Rasch genannten Konzepten ist Abbildung 3-2 zu entnehmen.

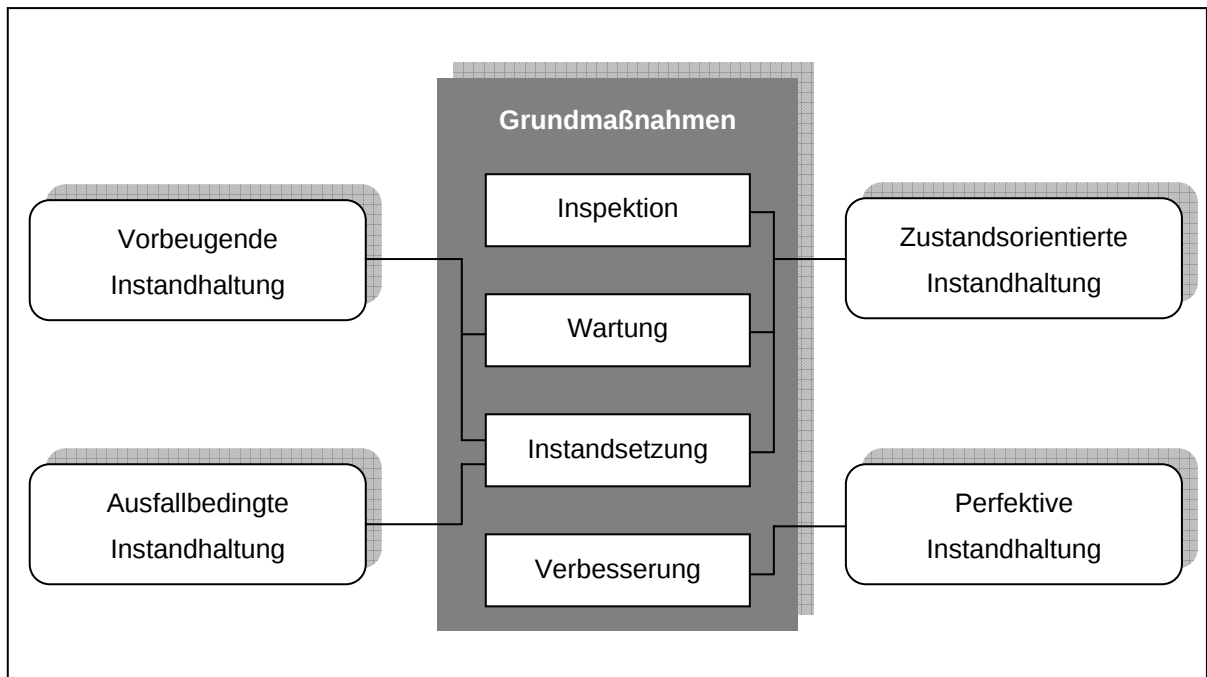


Abbildung 3-2: Grundmaßnahmen und Konzepte der Instandhaltung

In einem eigens durchgeführten Benchmark (12/2004) über bestehende Instandhaltungssysteme, zeigte sich, dass mehr als 80 % der befragten Unternehmen alle Grundmaßnahmen einsetzen. 10 % bieten Wartungsdienste, Inspektionen und Instandsetzungsmaßnahmen an. Weitere 10 % der Unternehmen führen nur einzelne Grundmaßnahmen und Kombinationen aus denen durch. Dabei gaben 62,5 % aller befragten Unternehmen an, dass sie ihre Instandhaltungstätigkeiten sowohl für den eigenen Fuhrpark als auch für Dritte anbieten. 20 % beschränkten ihre Maßnahmen auf die eigene Fahrzeugflotte. Die restlichen 17,5 % der Unternehmen gaben an, ihre Dienstleistungen ausschließlich Fremdfirmen anzubieten /PRZ-05/.

3.1.1 Inspektion

Die Inspektion (lat. inspectio = Durchsicht, Prüfung /PER-02/) ist nach DIN 31051 definiert als „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung“ /DIN-03/.

Die primäre Aufgabe der Inspektion besteht demnach in der intervallabhängigen, fundierten Bewertung des Ist-Zustands der Instandhaltungsobjekte (z. B. Anlagen, Anlagenteile, Bauteile) und damit in der Früherkennung von Störungen und Schäden, um ungeplante Ausfälle zu vermeiden. Die Beurteilung kann während des Stillstandes als auch bei laufendem Betrieb erfolgen. Inspektionsmethoden beinhalten visuelle Methoden, den zyklischen Einsatz von Messgeräten und kontinuierliche Messungen. Ausgehend von dieser Zustandsbewertung werden i. d. R. weitere Instandhaltungsmaßnahmen geplant. Aufgrund der Ergebnisse können aber auch die Wirksamkeit

bereits durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen geprüft oder konstruktive Schwachstellen der Betrachtungseinheit identifiziert werden /RAS-00/.

Die Inspektion gliedert sich in die vier Teilschritte:

- Ist-Zustand feststellen,
- Auswertung der Informationen (Ermittlung von Abweichungen od. Vergleich),
- Ist-Zustand beurteilen und
- Veranlassen von Maßnahmen, sofern aufgrund der Inspektionsauswertung notwendig .

Idealerweise sollten für einen Soll-/Ist-Vergleich konstante Betriebs- und Umweltbedingungen vorherrschen. In der Realität ist dies nur selten zu gewährleisten, so dass die zeitliche Entwicklung des Abnutzungsvorrates (vgl. Kapitel 3.1.2) eine Funktion in Abhängigkeit der variablen Betriebs- und Umweltparameter wird.

Des Weiteren ergeben sich folgende Anforderungen an die Inspektion:

- Gesetzliche Auflagen,
- Vorgaben des Herstellers und
- Anforderungen zur Gewährleistung des Versicherungsschutzes.

Zusammenfassend übernimmt die Inspektion die zentrale Koordinierung zwischen der Produktion, der Wartung und der Instandsetzung /MEY-81/.

3.1.2 Wartung

Die Wartung umfasst im Sinne der DIN 31051 /DIN-03/ alle Maßnahmen zum verzögerten Aufbrauch des vorhandenen Abnutzungsvorrats. Dabei definiert der Abnutzungsvorrat den Vorrat zur Erfüllung der möglichen Funktion unter festgelegten Bedingungen, der einer Betrachtungseinheit aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt. Der mit der Betriebsdauer nicht linear abfallende Abnutzungsvorrat ist schematisch in Abbildung 3-3 gemäß der DIN 31051 dargestellt.

Es handelt sich also bei der Wartung um vorbeugende Maßnahmen, die zustands- oder intervallabhängig durchgeführt werden. Sie haben das Ziel, Maschinenausfälle zu verhindern, die Lebensdauer der Bauteile zu verlängern und damit die Gesamtkosten der Anlage zu minimieren . Die Maßnahmen können manuell oder maschinell, kontinuierlich oder diskontinuierlich durchgeführt werden /WAR-92/.

Die Wartung beinhaltet u. a. Reinigungsarbeiten, die Versorgung der Schmierstellen, Nachstellen von durch Verschleiß veränderten Zustandsgrößen und dabei möglicherweise weitere notwendig werdende Arbeiten, wie Dichtungs- und Filterwechsel. Im Einzelnen besteht die Wartung aus folgenden Tätigkeiten:

- Reinigen und Konservieren,
- Schmieren,
- Nachstellen,
- Auswechseln und
- Ergänzen.

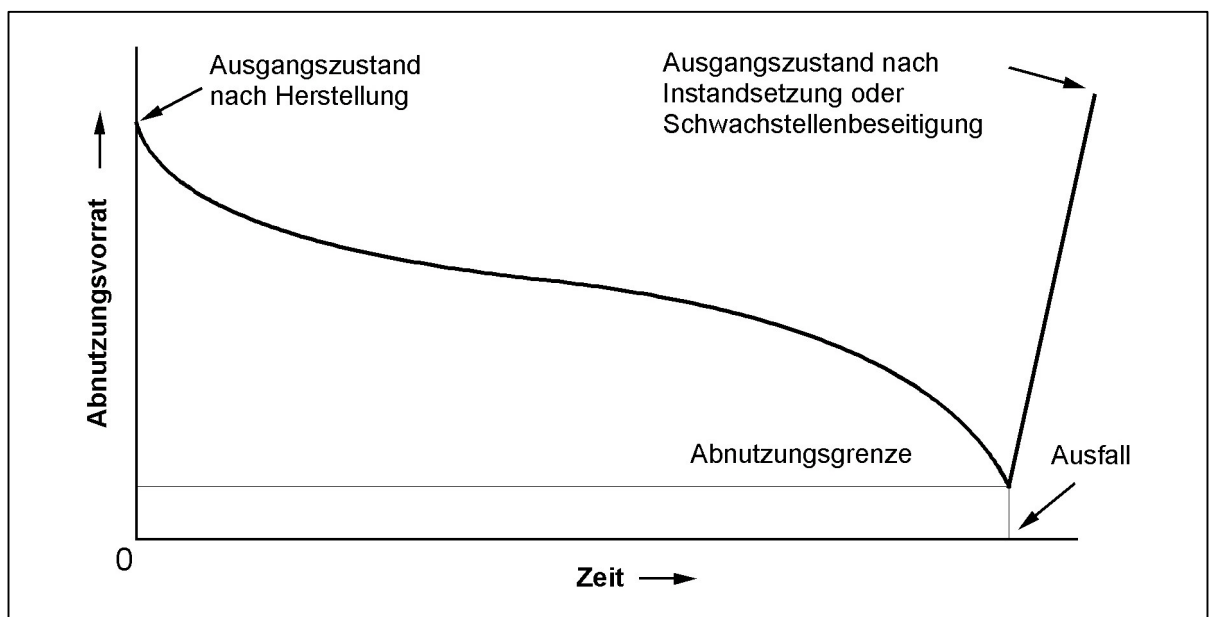


Abbildung 3-3: Abbau und Erstellung des Abnutzungsvorrats nach DIN 31051

3.1.3 Instandsetzung

Der Begriff Instandsetzung fasst alle „Maßnahmen zur Rückführung einer vorher ausgefallenen Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand“. Verbesserungen zählen nicht zur Instandsetzung /DIN-03/.

Das Ziel der Instandsetzung ist damit, im Gegensatz zur Wartung, bei der eine Verringerung der Abnutzungsgeschwindigkeit erreicht werden soll, die Beseitigung eines Schadens infolge einer technischen Abnutzung.

Nach der Empfehlung Nr. 2 des Deutschen Komitees Instandhaltung (DKIN) werden Instandsetzungsarbeiten in Anlehnung an Eichler intervallabhängig, zustandsabhängig oder schadensbedingt durchgeführt.

Das DKIN und Matyas /MAT-99/ gliedern die Instandsetzung wie in Abbildung 3-4 gezeigt. Demnach kann die Instandsetzung in die Teilmaßnahmen Ausbessern und Austauschen unterteilt werden.

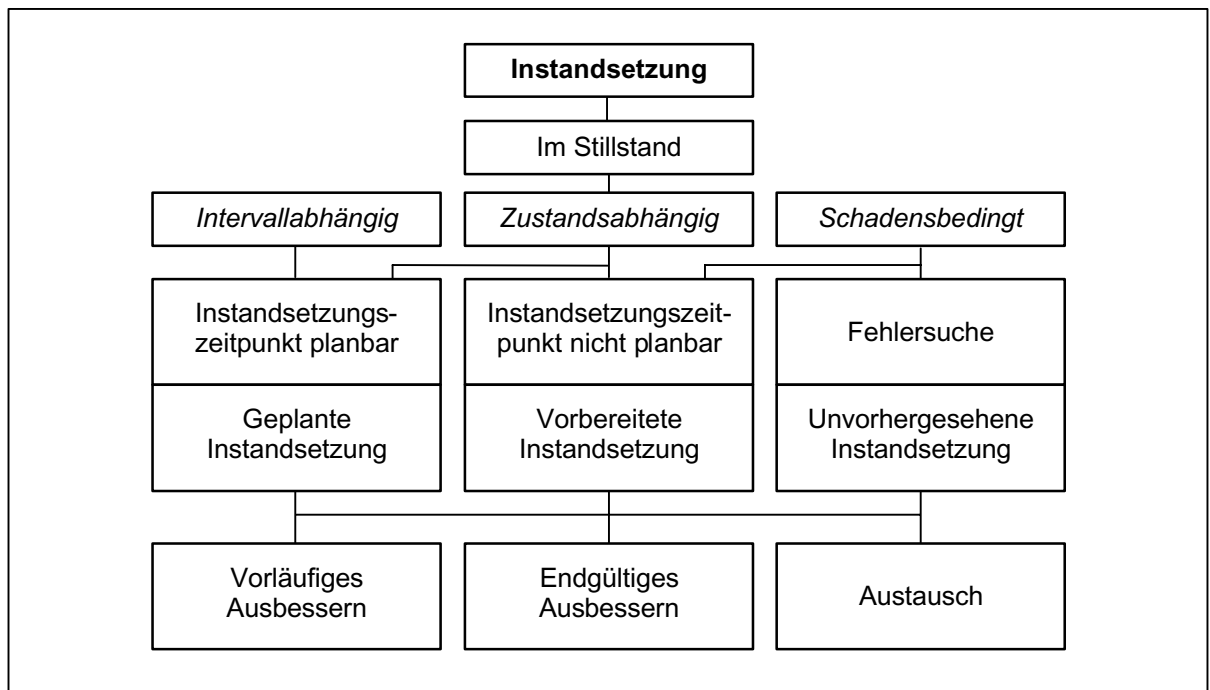


Abbildung 3-4: Gliederung der Instandsetzung nach Matyas

Eine große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Instandhaltungssystems hat die kurzzeitige Durchführung der Instandsetzung. Diese setzt u. a. einen hohen vorlaufenden Vorbereitungsgrad der Instandhaltungsmaßnahmen voraus. Dabei ist nach Rasch /RAS-00/ die effektive Nutzung aller vorhandenen Inspektionsergebnisse vorteilhaft.

3.1.4 Verbesserung

Die Europäische Norm EN 13306:2001, „Begriffe der Instandhaltung“, führt die Grundfunktionen „Verbesserung“ ein. Die DIN 31051 /DIN-03/ übernimmt diesen Begriff und definiert die Verbesserung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern“.

Bereits Mitte der siebziger Jahre wurde eine Erweiterung des Instandhaltungsbegriffs gefordert /RAS-00/. Diese Forderungen stützten sich auf betriebliche Erfahrungen. Insbesondere während der geplanten Instandsetzungsphasen wurde damals bereits der betriebsbedingte Stillstand zur Modernisierung und Durchführung von „Verbesserungen“ genutzt. Die DIN 31051 wurde in ihrer Fassung aus dem Juni 2003 um die Verbesserung als vierte Grundmaßnahme erweitert.

Rasch sieht in der Verbesserung von Bauteilen einerseits eine Steigerung ihres Abnutzungsvorrates, der durch besondere Maßnahmen auf über 100% gegenüber dem Urzustand erhöht werden kann und andererseits in manchen Fällen eine Steigerung der Effizienz der Betrachtungseinheit. Dazu zählen z. B. eine Steigerung der Kapazität oder eine Reduzierung der Herstell- bzw. Betriebskosten /RAS-00/.

In Anlehnung an die Gliederung der Instandsetzung nach DKIN und Matyas zeigt Abbildung 3-5 eine Gliederung der „Verbesserung“ in ihre Teilmaßnahmen nach Warnecke.

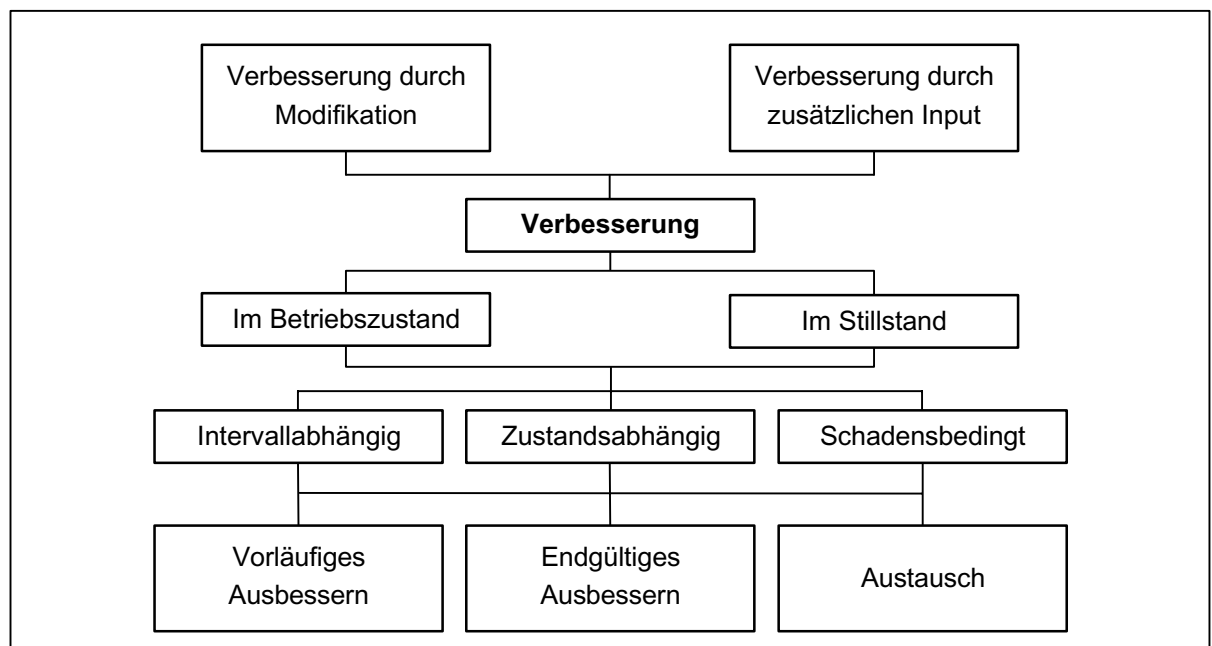


Abbildung 3-5: Teilmaßnahmen der Verbesserung /WAR-92/

3.2 Konzepte in der Instandhaltung

Der Brockhaus definiert Konzept mit den Worten „Entwurf“ und „Plan“. Wikipedia erweitert diese Definition und erklärt das Konzept zusätzlich als „Programm für ein Vorhaben“.

In der Instandhaltung haben sich im Laufe der Zeit aufgrund von Veränderungen in den Produktionsabläufen unterschiedliche Konzepte für herausgebildet. Sie verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen /LÜR-01/. So teilt Kalaitzis /KAL-90/ die Instandhaltungskonzepte in die drei möglichen Grundausrichtungen: personell, anlagenbezogen und maßnahmenorientiert. In Anlehnung an die maßnahmenorientierte Grundausrichtung existieren vier Konzepte (vgl. Abbildung 3-2), die die Basis für das Vorgehen und die Planung in der Instandhaltung bilden. Sie stellen die Grundlage für die Instandhaltungsstrategie dar, welche zeitlich und inhaltlich die Instandhaltungsmaßnahmen regelt, um die Ziele der Instandhaltung zu erreichen. Eichler /EIC-77/ führt

aus, dass die einzelnen Konzepte jeweils zunächst auf verschiedene Baugruppen anzuwenden sind und deren Kombination das Gesamtkonzept für ein System bildet.

Eine aktuelle eigene Umfrage /PRZ-05/ bei verschiedenen Instandhaltern im Bereich des Schienenverkehrs ergab, dass 41,7 % eine Kombination aller unter 3.2.1 bis 3.2.4 dargestellten Instandhaltungskonzepte verfolgen, wogegen 22,2 % sich allein auf das vorbeugende Instandhaltungskonzept stützen. 13,8 % legen ihrem Instandhaltungskonzept eine Kombination aus zustandsabhängiger und vorbeugender Instandhaltung und weitere 8,3 % allein die zustandsorientierte Instandhaltung zugrunde. Weitere 13,8 % der befragten Unternehmen kombinieren die Instandhaltungskonzepte in anderer Weise.

Nachfolgend werden die einzelnen Instandhaltungskonzepte vorgestellt.

3.2.1 Ausfallbedingte Instandhaltung

In der Mitte des letzten Jahrhunderts basierte die Instandhaltung in der Industrie vornehmlich auf dem ausfallbedingten Konzept (breakdown oder corrective maintenance). Der Grundgedanke dieses Konzepts verfolgt eine Vorgehensweise, bei der die Instandhaltung erst bei Ausfall eines Bauteils, einer Baugruppe oder der gesamten Anlage aktiv wird /KNE-97/. In Anlehnung an Knezevic sind die typischen Maßnahmen der ausfallbedingte Instandhaltung in Abbildung 3-6 dargestellt.

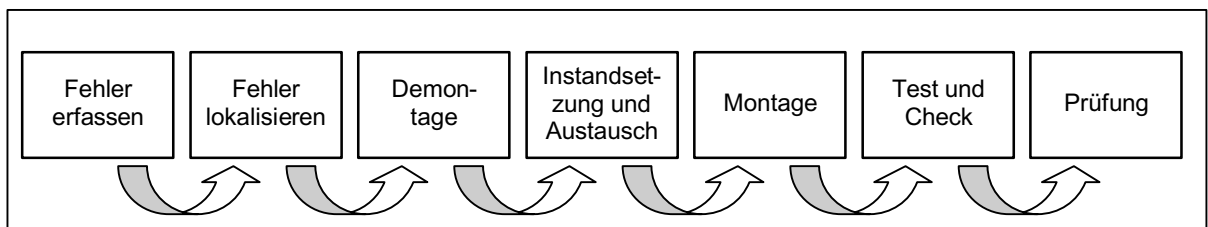


Abbildung 3-6: Maßnahmenfolge der ausfallbedingten Instandhaltung nach Knezevic

Die Vorteile der ausfallbedingten Instandhaltung liegen im vollständigen Verbrauch des Abnutzungsvorrates. Dabei wird die längstmögliche Lebensdauer für einzelne Bauteile oder Baugruppen erzielt. Es werden keine Ressourcen verschenkt, es sei denn, das Versagen des Bauteils bringt Folgeschäden mit sich. Außerdem reduziert sich der Planungsaufwand für die durchzuführenden Arbeiten erheblich, da meist nur eine kurze Zeitspanne zur Verfügung steht, bis die Maschine wieder einsatzbereit sein muss. Daneben kann man aus den Daten über die maximale Bauteillebensdauer statistische Kennwerte für eine Lebensdauerprognose ableiten. Diese wird in die Planung z. B. von Lagerwesen und Werkstattauslastung einbezogen.

Der kurze zur Verfügung stehende Planungszeitraum für die ausfallbedingte Instandhaltung wirkt sich allerdings nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens aus. Es entstehen dabei häufig höhere Kosten, als bei einer geplanten Instandhal-

tung, z. B. wenn die Fahrzeuge außerplanmäßig der Werkstatt zugeführt werden müssen. Außerdem kommt es vermehrt zu längeren Stillstandzeiten, die sich negativ auf den Dienstleistungs- oder Produktionsprozess und letztendlich auf die Kundenzufriedenheit auswirken. Das Personal arbeitet unter Zeitdruck, der meist eine schlechtere Qualität des Prozessergebnisses und dadurch eine geringere Zuverlässigkeit der Maschine mit sich führt /LÜR-01/. Aufgrund der geringen Planbarkeit werden ausfallanfällige Bauteile oder Baugruppen häufig mehrfach redundant gelagert und dadurch eine effiziente Lagerhaltung verhindert. Das ausfallbedingte Konzept stellt weiterhin komplexe Anforderungen an Zulieferer oder fremde Instandhalter. Diese resultieren aus der Forderung einer möglichst schnellen Instandsetzung der Maschine. Um die Kundenzufriedenheit oder eine vertraglich vereinbarte Mindestverfügbarkeit eines Produktions- oder Dienstleistungssystems zu gewährleisten, ist es bei diesem Konzept teilweise erforderlich, zusätzlich komplette Maschinen als Reserve vorzuhalten.

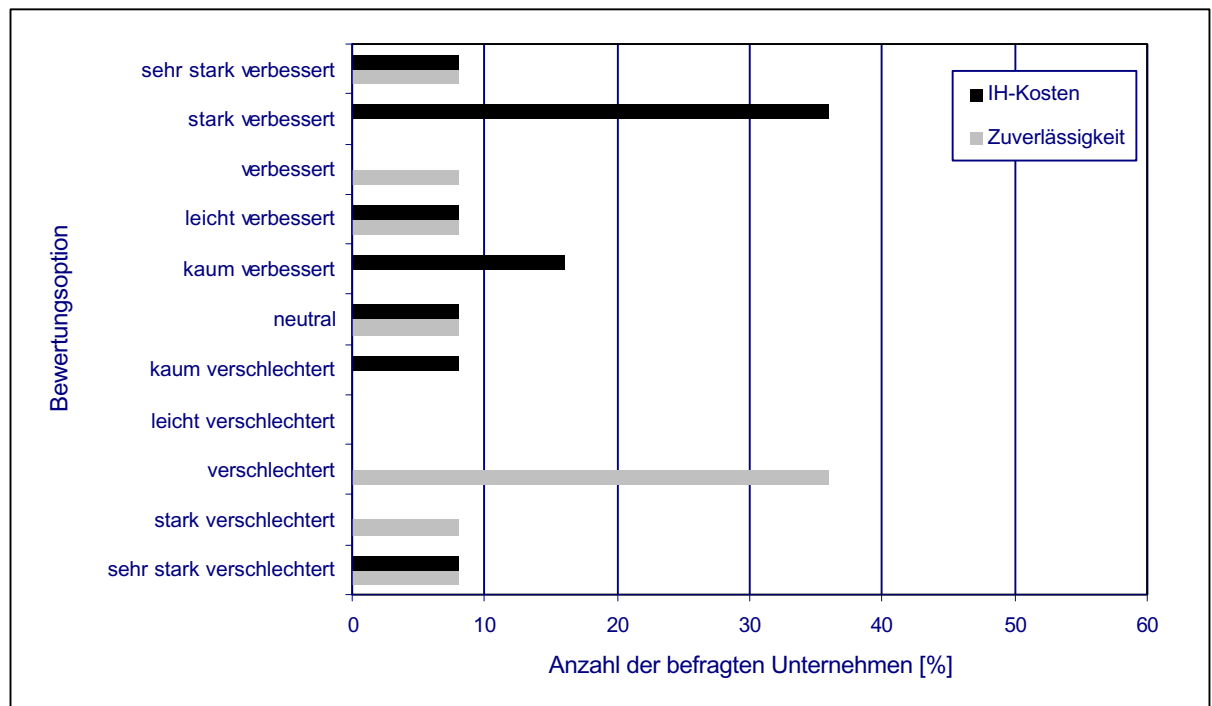


Abbildung 3-7: Auswirkungen der ausfallbedingten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten

Anmerkung: Die Summen über alle Bewertungsoptionen können unter 100 % liegen, da sich die Auswertung auf die Gesamtheit aller Unternehmen bezieht und nicht alle Unternehmen eine Bewertung vorgenommen haben.

Eigene aktuelle Ergebnisse eines Benchmarks von Instandhaltungsbetrieben von Schienenfahrzeugen zeigen die Auswirkungen der ausfallbedingten Instandhaltung auf die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und auf deren Instandhaltungskosten in Abbildung 3-7. Dabei bewerten 52 % der Unternehmen die Auswirkungen auf die

Zuverlässigkeit ihrer Schienenfahrzeuge mit schlechter als neutral. Dem entgegen stehen 24 % der Betriebe, die unerwarteterweise eine positive Auswirkung der ausfallbedingten Instandhaltung auf die Zuverlässigkeit sehen. In Bezug auf das Bewertungskriterium der Instandhaltungskosten beurteilen 16 % die Auswirkungen durch die Anwendung der ausfallbedingten Instandhaltung negativer als neutral ein. 68 % der befragten Unternehmen sehen durch ihre Anwendung hingegen eine positive Kostenentwicklung /PRZ-05/.

3.2.2 Vorbeugende Instandhaltung

Die vorbeugende Instandhaltung (preventive maintenance) verdrängte mit fortschreitender Mechanisierung die ausfallbedingte Instandhaltung. Der Stillstand von Produktionsanlagen verursachte große Kosten, sodass es sich lohnte, vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen /LÜR-01/. Ein Ziel der vorbeugenden Instandhaltung ist es, die Fehlerwahrscheinlichkeit in einem System zu reduzieren /KNE-97/. Dazu sind hinreichend große Kenntnisse über den möglichen Ausfallzeitpunkt des Objektes erforderlich. Für den optimalen Zeitpunkt des Austausches eines Objektes ist im Sinne der vorbeugenden Instandhaltung ein breites Spektrum an Informationen über Ausfallverhalten, Belastungsintensität und Betriebsdauer unerlässlich. Die Durchführung von Maßnahmen am Instandhaltungsobjekt geschieht dabei zu einem fest vorgegebenen Zeitpunkt /RAS-00/. Rasch gliedert die vorbeugende Instandhaltung nach Art der Auswahl der Instandhaltungszeitpunkte in das periodische (fest vorgegebene Instandhaltungszeitpunkte über die gesamte Lebensdauer) und in das sequentielle (Instandhaltungszeitpunkte orientieren sich flexibel an den Erkenntnissen der zuletzt durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme) Vorbeugekonzept.

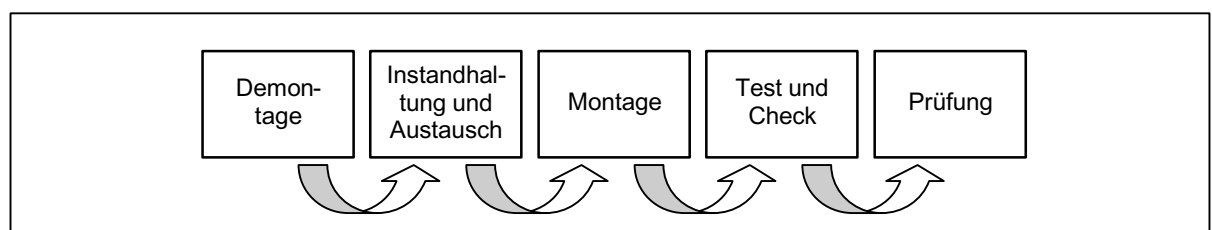


Abbildung 3-8: Maßnahmenfolge der vorbeugenden Instandhaltung nach Knezevic

Die vorbeugende Instandhaltung zeigt im Vergleich zur ausfallbedingten einen deutlichen Vorteil in der Planbarkeit der Maschinenstillstände und in der Reduzierung der Stillstandzeit. Die Maßnahmen können im Vorfeld in Bezug auf Termin, Personal- und Werkstattkapazitäten sowie Material detailliert vorbereitet werden. Dadurch wird die Gefahr der Nichtverfügbarkeit von Material reduziert und Zeitdruck vermieden, was eine Verbesserung des Prozessergebnisses mit sich bringt. Standardisierte Abläufe steigern dieses zusätzlich. Durch die Bündelung zeitlich nahe beieinander liegender Instandhaltungsmaßnahmen kann in Summe der Zeiten für Demontage- und Montagevorgänge erheblich reduziert werden /LÜR-01/. Weiterhin erleichtert die vor-

beugende Instandhaltung die Vergabe der Tätigkeiten an Fremdfirmen und erlaubt eine größere Maschinenverfügbarkeit durch erhöhte Zuverlässigkeit /RAS-00/.

Dem stehen in der vorbeugenden Instandhaltung erhöhte Planungskosten (einerseits für die Ermittlung der Instandhaltungsintervalle, andererseits für die Planung der Maßnahmen selbst) und verlorenes Kapital durch den Tausch von Bauteilen mit einem Restabnutzungsvorrat gegenüber /LÜR-01/. Durch vorzeitigen Austausch gehen häufig wichtige Informationen über die maximal mögliche Betriebsdauer und damit über das Ausfallverhalten der Bauteile verloren. Eine Bündelung zeitnaher Instandhaltungsvorgänge verschenkt zusätzlich vorhandenen Abnutzungsvorrat. Weiterhin erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Frühausfällen aufgrund von Montage- und Inbetriebnahmefehlern durch die höhere Zahl der Instandsetzungen /RAS-00/.

Die Qualität und Quantität der Kenntnis über das Verschleiß- und Ausfallverhalten einzelner Instandhaltungsobjekte kann im freien Wettbewerb über den Erfolg und Misserfolg bei Einsatz dieser Instandhaltungsstrategie in der Praxis entscheiden. Kalaitzis /KAL-90/ empfiehlt daher den Einsatz der vorbeugenden Instandhaltung in besonders sicherheitssensiblen Bereichen. Dort ist man bereit, zur Gewährleistung einer höheren Verfügbarkeit eine kostenintensivere Instandhaltungsstrategie zu verfolgen.

Für die Organisation und Durchführung der Instandhaltungstätigkeiten nach dem vorbeugenden Prinzip, sind idealerweise die einzelnen Verschleißmechanismen und der auftretende Verschleiß bereits in der Entwicklungsphase der Maschine zu berücksichtigen. Besteht zu diesem Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess genaue Kenntnis über das zukünftige Verschleißverhalten einzelner Bauteile, können deren Abnutzungsvorräte so gestaltet werden, dass definierte Bauteile immer zum selben Zeitpunkt die Verschleißgrenze erreichen. Damit wäre eine Reduzierung der Ressourcenverschwendung gewährleistet.

Abbildung 3-9 zeigt auf Basis einer Umfrage die Auswirkungen der vorbeugenden Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten. Dabei sind von keinem Unternehmen negative Auswirkungen der vorbeugenden Instandhaltung auf die Fahrzeugzuverlässigkeit genannt worden. Lediglich 4 % beurteilen dieses Kriterium mit neutral. Die Auswirkungen auf die Entwicklung der Instandhaltungskosten werden dagegen unterschiedlich beurteilt. 56 % der befragten Unternehmen bewerten hier die Auswirkungen der vorbeugenden Instandhaltung als positiv und 32 % als negativ.

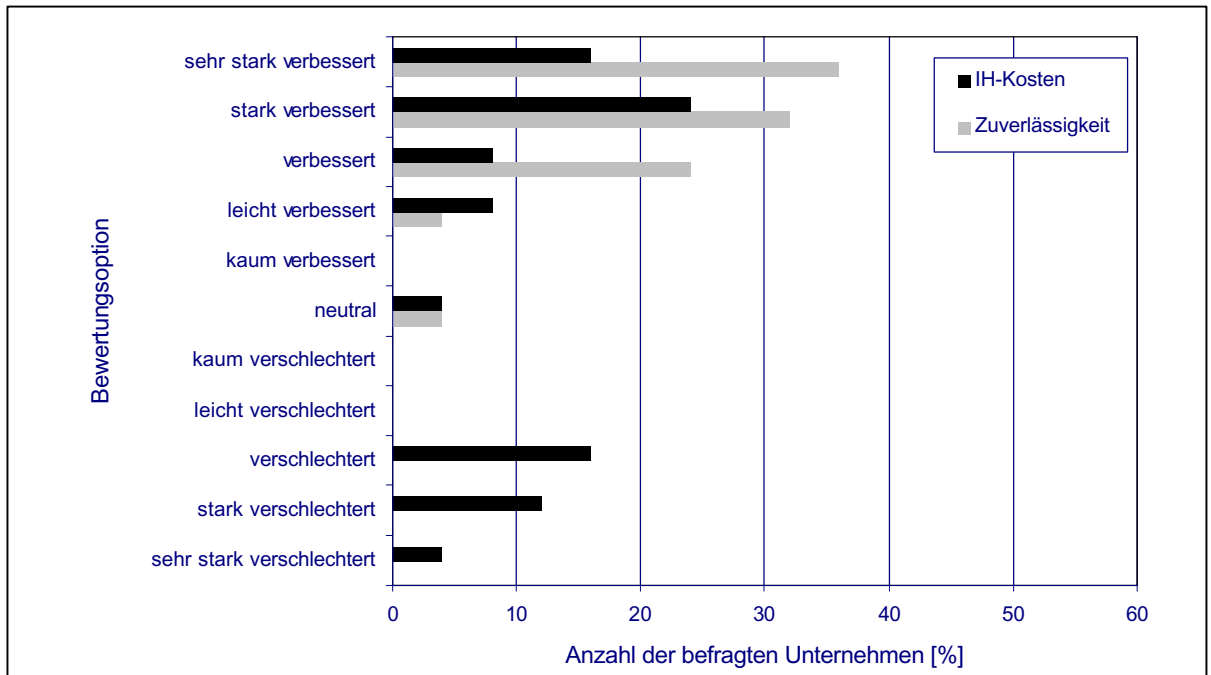


Abbildung 3-9: Auswirkungen der vorbeugenden Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten

3.2.3 Zustandsorientierte Instandhaltung

Das Konzept der zustandsorientierten Instandhaltung (condition based oder predictive maintenance) stützt sich direkt auf den aktuellen Zustand der Maschine oder einzelner Bauteile und greift daher im Gegensatz zu den bisher genannten Konzepten erstmalig den inspektiven Aspekt in der Instandhaltung auf. Sie wurde als Konzept verstärkt in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts eingesetzt. Die Unternehmen erkannten, dass die Zustände von Anlagen und Bauteilen mittels verbesserter Diagnosemethoden eindeutig ermittelt werden können /LÜR-01/. Man versuchte damit eine die Wettbewerbsfähigkeit des Instandhaltungssystems beeinflussende Schwachstelle der vorbeugenden Instandhaltung zu eliminieren, indem man durch intervallabhängige oder permanente Inspektionen den Zustand einzelner Bauteile ermittelte und somit die Instandhaltungsmaßnahmen möglichst kurz vor dem Erreichen der Ausfallgrenze einleitete. Man erzielte damit eine hohe Sicherheit und Maschinenverfügbarkeit bei gleichzeitig sinkenden Instandhaltungskosten.

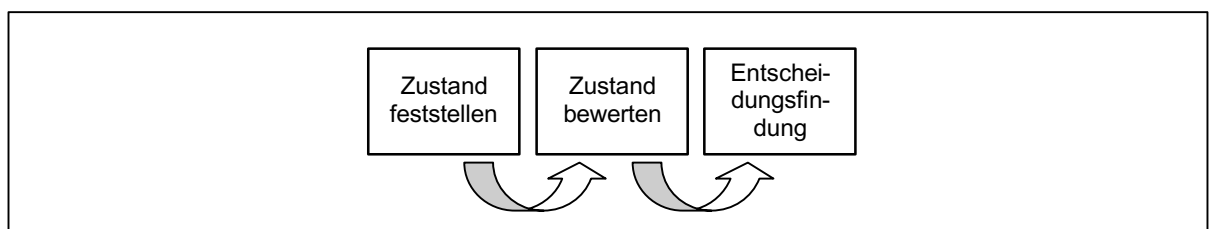


Abbildung 3-10: Maßnahmenfolge der zustandsorientierten Instandhaltung nach Knezevic

Analog zur vorbeugenden Instandhaltung gliedert Rasch /RAS-00/ die zustandsorientierte Instandhaltung in das periodische und in das sequentielle Inspektionskonzept.

Im Vergleich zur ausfallbedingten und zur vorbeugenden Instandhaltung haben sich die typischen Maßnahmen einer zustandsorientierten Instandhaltung wesentlich in Richtung Inspektion, Bewertung der Inspektionsergebnisse und Ableitung von Lebensdauerprognosen verlagert. Damit wird sie zu einem komplexen Konzept, welches umfassendes Fach- und Methodenwissen voraussetzt.

Das Charakteristische der zustandsorientierten Instandhaltung ist die weitgehende Ausnutzung des Abnutzungsvorrates und die gegenüber den anderen Konzepten hohe Maschinenzuverlässigkeit und -verfügbarkeit.

Zwischen Inspektion und Instandsetzung bleibt i. d. R. ausreichend Zeit für eine detaillierte Planung /LÜR-01/. Damit können die Maßnahmen zeitlich und inhaltlich exakt durchgeplant werden. In Bezug auf die Prognose der Lebensdauer eines Bauteils liefert die zustandsorientierte Instandhaltung aufgrund ihrer Inspektionen umfassende Daten.

Als Nachteil der zustandsorientierten Instandhaltung ist vorrangig der hohe Inspektionsaufwand zu sehen. Dieser übersteigt den Aufwand bei Einsatz des vorbeugenden Instandhaltungskonzeptes /RAS-00/. Der Aufwand resultiert aus der Inspektionsdauer und aus dem Einsatz kostenintensiver Messinstrumente. Hinzu kommt, dass für die Inspektionen häufig hochqualifiziertes Personal benötigt wird.

Analog zu den Konzepten der ausfallbedingten und der vorbeugenden Instandhaltung wurde in dem angesprochenen Benchmark auch die zustandsorientierte Instandhaltung bewertet (vgl. Abbildung 3-11). Dabei ist besonders auffällig, dass die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und die Kosten in der Instandhaltung von den meisten der befragten Unternehmen durch Einführung eines Konzeptes auf Basis der zustandsorientierten Instandhaltung als verbessert bewertet werden. Damit gehen Kosten und Zuverlässigkeit einher. Insgesamt bewerteten 90% aller Unternehmen die Auswirkungen der zustandsabhängigen Instandhaltung auf die Zuverlässigkeit von Schienenfahrzeugen mit besser als neutral, indessen sehen nur 5% der Stichprobe diese Entwicklung negativer als neutral. In Bezug auf die Instandhaltungskosten wird dieses Instandhaltungskonzept von den Unternehmen mit 73% positiver und mit 11% negativer als neutral beurteilt /PRZ-05/.

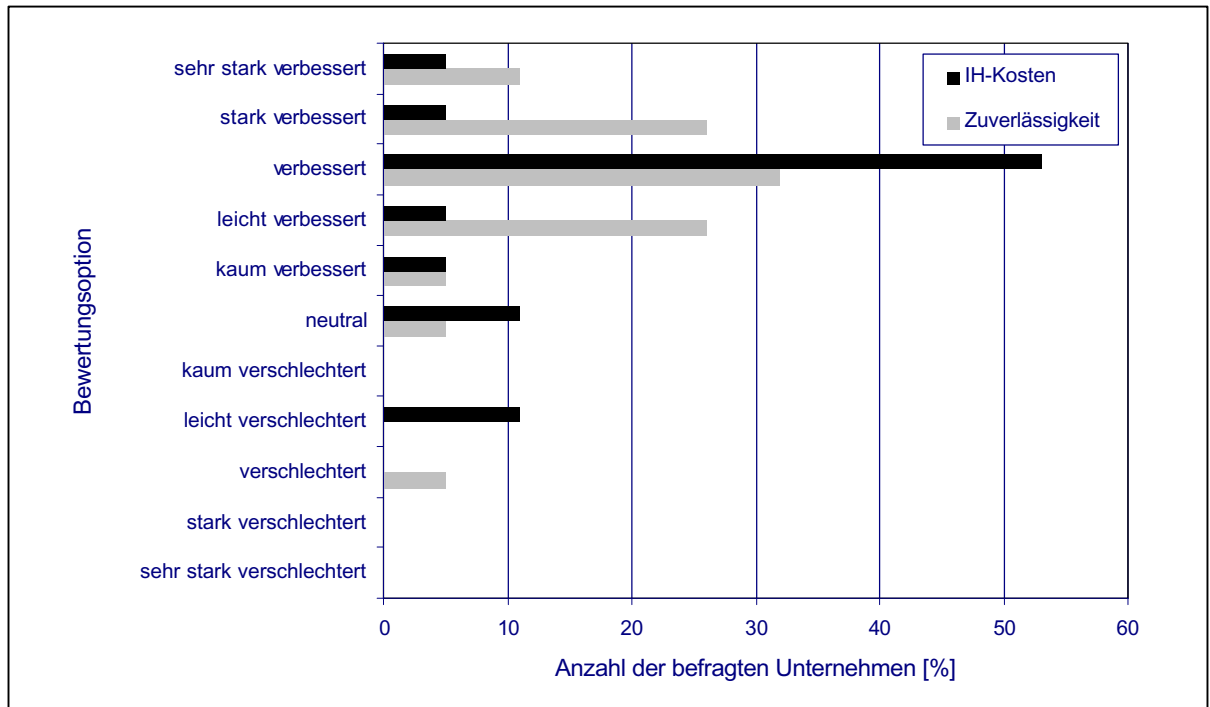


Abbildung 3-11: Auswirkungen der zustandsorientierten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten

Als eine Sonderform der zustandsorientierten Instandhaltung hat sich das Konzept der kostenaufwändigen diagnoseoptimierten Instandhaltung etabliert. Dabei werden stationäre oder onbaord Diagnosesysteme eingesetzt, die den Zustand der Maschinen und Bauteile selbständig aufnehmen. Die stationären Diagnosesysteme gehören auf einigen Gebieten bereits seit vielen Jahren zum Stand der Technik und werden heute hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten laufend verbessert. Dagegen besteht im Bereich der onboard Diagnosesysteme noch großer Entwicklungsbedarf an systemoptimierten Lösungen.

Krüger /KRÜ-95/ gliedert die Verfahren der Diagnose nach den Gesichtspunkten:

- Volumetrische Diagnostik,
- Oberflächendiagnostik,
- Thermische Diagnostik,
- Schwingungsdiagnostik,
- Schallemissionsdiagnostik und
- Partikel- und Betriebsmediendiagnostik.

Die Diagnosesysteme ermöglichen eine permanente Kontrolle der entsprechenden Parameter. Sie machen damit eine dauerhafte Inspektion von Maschinen erst wirtschaftlich. Weiterhin können Fehler damit eigenständig erkannt werden. Durch die Vielzahl der aufgenommenen Messdaten zu unterschiedlichsten Zeitpunkten kann

mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit der Ausfallzeitpunkt automatisch ermittelt und entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden /RAS-00/.

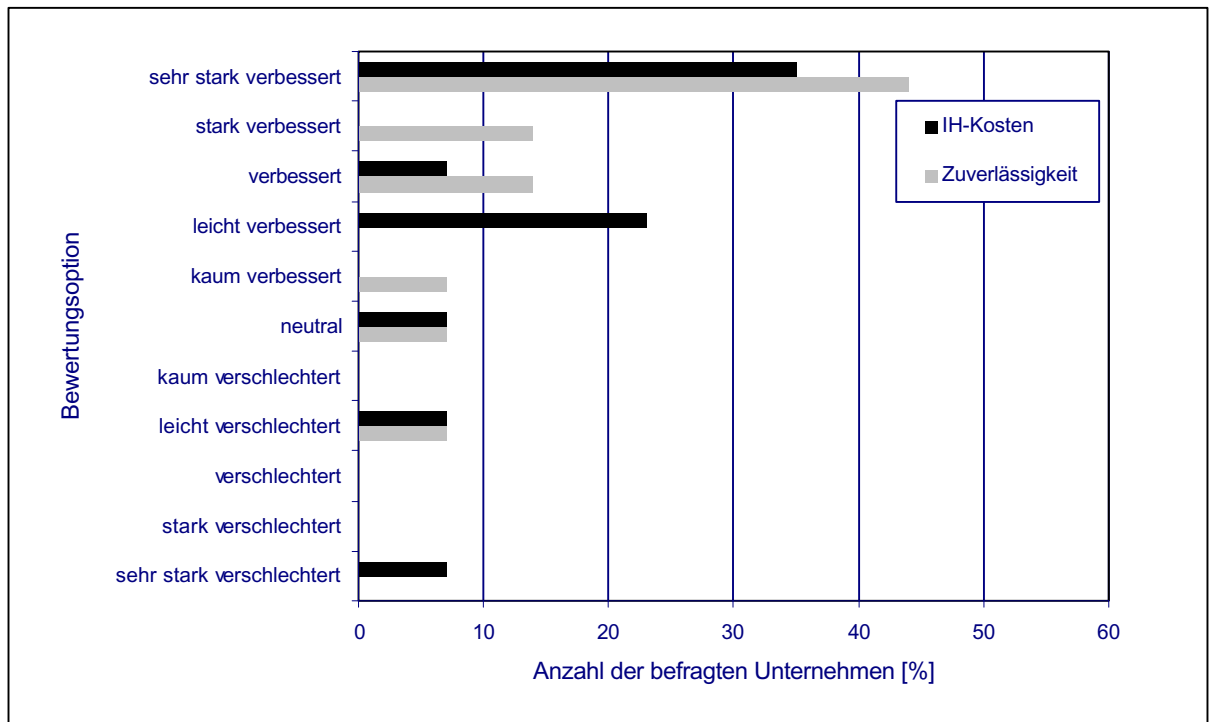


Abbildung 3-12: Auswirkungen der diagnoseoptimierten Instandhaltung von Schienenfahrzeugen auf Fahrzeugzuverlässigkeit und Instandhaltungskosten

Bei der aktuellen Befragung von Instandhaltungsbetrieben, erreichte das Konzept der diagnoseoptimierten Instandhaltung mit 44 % der Nennungen der höchsten Verbesserungsoption einen Bestwert bei den Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit und mit 35% ebenfalls in Bezug auf die Entwicklung der Instandhaltungskosten. 79 % der Anwender von diagnoseoptimierter Instandhaltung beurteilten ihre Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit positiv, lediglich 7 % der Bewertungen waren schlechter als neutral. Die Auswirkungen diagnoseoptimierter Instandhaltung auf die Entwicklung der Instandhaltungskosten wurden von 65 % der Befragten positiv und von 14 % negativ beurteilt /PRZ-05/. Die detaillierten Ergebnisse sind Abbildung 3-12 zu entnehmen.

3.2.4 Perfektive Instandhaltung

Der Begriff „perfektiv“, abgeleitet aus dem Lateinischen, wird mit „vollenden“ übersetzt /PER-02/. Demnach zielt die perfektive Instandhaltung hauptsächlich auf die Verbesserung von Anlagen ab. Eine Erweiterung des Funktionsumfangs und eine Anpassung von Anlagen an veränderte Umweltbedingungen werden als zusätzliche Elemente der perfektiven Instandhaltung gesehen /BEH-94/.

Damit strebt die perfektive Instandhaltung eine Anpassung der Fahrzeuge an die spezifischen Betriebsbedingungen an. Langfristig wird so eine Steigerung der Ver-

fügarkeit durch Vermeidung von Betriebsausfällen erzielt. Dieser folgt eine leistungsabhängige Reduzierung der Instandhaltungskosten und eine nachhaltige Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Verkehrsunternehmens.

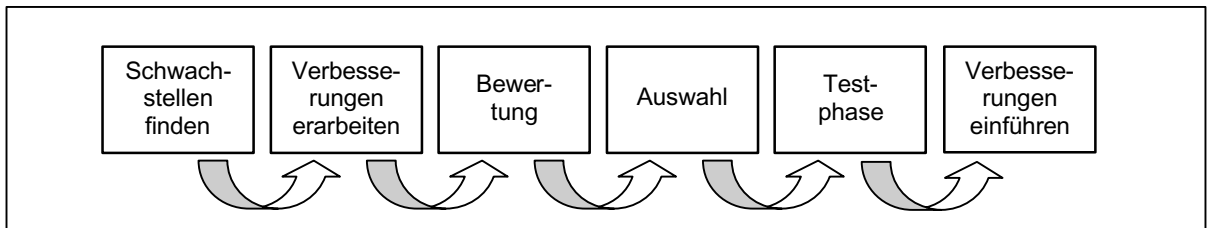


Abbildung 3-13: Maßnahmenfolge der perfektiven Instandhaltung

Nakajima /NAK-88/ weist auf vermehrte Schwachstellen und Probleme bei der Erst-inbetriebnahme insbesondere bei Sonderanfertigungen von Anlagen hin. Diese gilt es zur Erschließung von Leistungsreserven zu beseitigen. Gefordert ist daher gegebenenfalls eine konstruktive Überarbeitung der Fahrzeuge, um diese von ihren Mängeln zu befreien.

Die perfektive Instandhaltung bildet somit die Grundlage für eine ständige Verbesserung der Fahrzeuge durch Ausmerzung von Konstruktionsmängeln, zur Erfüllung betriebsspezifischer Anforderungen.

3.3 Strategien zur Verwirklichung der Instandhaltungskonzepte

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die verschiedenen Instandhaltungskonzepte vorgestellt. Ihre Verknüpfung erfolgt über eine gesamtheitliche Instandhaltungsstrategie, die dem Erreichen der durch das Management definierten Zielstellung folgt. Der Brockhaus definiert den Begriff Strategie, der ursprünglich aus dem Militärischen kommt, mit dem genauen Plan des Vorgehens, um ein Ziel zu erreichen.

Im Bereich der Industrie und im Dienstleistungsbereich gibt es derzeit eine Vielzahl von Strategien, die zum Erreichen und ggf. zum Übertreffen der individuellen Ziele des Unternehmens eingesetzt werden. Die Ziele lassen sich u. a. für die Zielkategorien Kosten, Qualität und Zeit definieren. Die Einführung und Umsetzung dieser Werkzeuge ist eine Frage der Firmenphilosophie und wird idealerweise durch das Managementebene bestimmt. Welche Strategien eingeführt und verfolgt werden, orientiert sich an den Spezifika der Unternehmen. Häufig bilden sich im Laufe der Zeit unternehmensindividuelle Vorgehensweisen aus, die durch allgemeingültige oder branchenspezifische innovative Werkzeuge ergänzt und damit einer optimalen Gesamtlösung zugeführt werden.

Bezogen auf einen Fahrzeugpark im ÖPNV und seine Instandhaltung haben sich einerseits neue, speziell auf diesen Bereich abgestimmte Strategien entwickelt, und andererseits hat sich die Einführung neuer Strategien, z. B. aus dem Produktionsbereich, als zukunftsweisend herausgestellt /PRZ-05/.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit den derzeit gängigen Strategien, denen in einem eigenen Benchmark eine nachhaltige Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Schienenfahrzeuginstandhaltung bescheinigt wurde /PRZ-05/.

3.3.1 Total Quality Management (TQM)

Total Quality Management (TQM) ist prozessorientiert und gründet sich auf die Überzeugung, dass Qualität eine Frage der Ausrichtung an den Erfordernissen der Kunden ist /TQM-05/¹⁾.

Grundlage für das Entstehen des Total Quality Management bilden um 1950 eingeführte Prüftätigkeiten, die sich im Laufe der Zeit über die Qualitätskontrolle und die Qualitätssicherung bis hin zum TQM entwickelt haben. Differenzierte Ansätze zu dieser Strategie, z. B. Total Quality Control, finden sich erstmalig Anfang der 80er Jahre /HER-03/.

Philip B. Crosby, der Promoter der Qualitätsoffensive in den USA, definierte den Begriff Qualität als Erfüllung von Anforderungen. Damit kam er der Qualitätsdefinition der DIN ISO 8402 /DIN-92/ nahe, die Qualität als Gesamtheit aller Merkmale einer Einheit bezeichnet, welche die bezüglich ihrer Eignung festgelegten und vorausgesetzten Erfordernisse erfüllen. Unter dem Begriff Management versteht man im betriebswirtschaftlichen Sinn um die Unternehmensführung. Die Zusammenfassung der Begriffe Qualität und Management führt durch die Ergänzung des Wortes „Total“ zur eigentlichen Bedeutung von TQM, als umfassender Führungsstrategie, die die Qualität alle Prozesse und Produkte eines Unternehmens in den Vordergrund stellt. Die DIN ISO 8402 /DIN-92/ definiert TQM als eine „auf die Mitwirkung aller ihrer Mitglieder gestützte Managementmethode einer Organisation, die Qualität in den Mittelpunkt stellt und durch Zufriedenstellung der Kunden auf langfristigen Geschäftserfolg sowie auf den Nutzen für die Mitarbeiter der Organisation und für die Gesellschaft zielt“. Hermann /HER-03/ konkretisiert TQM als eine durch planmäßiges und systematisches Vorgehen gekennzeichnete Führungsmethode, die sich auf das Gesamtsystem bezieht und auf eine umfassende Qualität abzielt. Er fügt hinzu, dass das Qualitätsmanagementsystem nach DIN ISO 9000 eine transparente Grundlage für ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem sei. Bei TQM handelt es sich also nicht um eine feststehende Formel, sondern um einen anspruchsvollen Prozess.

¹⁾ Internetquelle

Dies spiegelt sich auch in unterschiedlichen Ansätzen verschiedener Unternehmen wider. Geiger /GEI-98/ fügt hinzu, dass es beim umfassenden Qualitätsmanagement keineswegs um eine neue Betrachtungsweise der Qualität geht, sondern vielmehr um die gesamtheitliche Anwendung bewährter Gedankenmodelle und Techniken des Qualitätsmanagements in allen Bereichen und Hierarchieebenen eines Unternehmens.

In Anlehnung an die DIN ISO 8402 /DIN-92/ lassen sich folgende Zielkriterien für TQM ableiten:

- Kundenzufriedenheit,
- Mitarbeiterzufriedenheit,
- Nutzen für die Gesellschaft,
- ausreichende Qualität,
- bei möglichst kleinem Zeitaufwand und
- möglichst kleinen Kosten.

Damit wird deutlich, dass Qualität zwar ein zentrales Ziel des TQM ist, die Strategie jedoch weit über dieses alleinige Ziel hinausgeht. Insbesondere die Faktoren Kundenzufriedenheit und Kosten nehmen im heutigen Wettbewerb eine Schlüsselfunktion ein. Aber auch die Zufriedenheit der Mitarbeiter hat langfristig entscheidenden Einfluss auf den Geschäftserfolg, da sie sich in der Arbeitsleistung, also in der Qualität, in den Kosten und in der aufgewendeten Zeit widerspiegelt.

Außer der Vision eines verbesserten Geschäftsergebnisses wurden Motivationshilfen für die Einführung eines umfassenden Qualitätsmanagementsystems in Form von nationalen und internationalen Auszeichnungen ins Leben gerufen. Dazu zählen u. a. der Deming Prize (DP) und der European Quality Award (EQA) sowie der Ludwig Erhard Preis (LEP) und der regionale Qualitätspreis Berlin Brandenburg (QP-BB) /HER-03/.

Erfolge bei Anwendung des TQM werden sich jedoch nur langfristig einstellen, wobei größere Unternehmen erfahrungsgemäß mit diesem Qualitätskonzept bessere Ergebnisse als kleinere Betriebe erzielen konnten /TRA-04/. Bezugnehmend auf die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen hat eine eigene Studie gezeigt /PRZ-05/, dass TQM durchaus in diesem Bereich erfolgreich eingesetzt wird, um Kundenzufriedenheit, Fahrzeugzuverlässigkeit und Arbeitsabläufe zu verbessern, sowie Fehlleistungen und Kosten zu reduzieren.

3.3.2 *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

Historisch gesehen liegen die Wurzeln der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung - Reliability Centered Maintenance (RCM) - am Ende der fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts. Damals kam es in der Luftfahrtindustrie erstmals zu Untersuchungen über Praktiken in der Instandhaltung von Flugzeugen, da Ausfälle und Fehler trotz intensiver Instandhaltungstätigkeiten weder verringert noch verhindert werden konnten /FIR-04/¹⁾. Nowlan und Heap arbeiteten im Auftrag des US-Verteidigungsministeriums ein Entscheidungsdiagramm für eine zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung aus, dass von Moubray in den achtziger Jahren weiterentwickelt wurde. RCM ist eine Methode, die der Erreichung eines vorgegebenen Zuverlässigkeitsniveaus dient. Dabei steht nicht die Reduzierung der Instandhaltungskosten im Vordergrund, sondern die Steigerung der Zuverlässigkeit /HOL-05/.

John Moubray /MOU-96/ stützt seine Analysen von Instandhaltungsprozessen auf sieben Fragen:

- Welche Funktionen und welche Leistungsnormen erfüllt die Anlage unter Berücksichtigung der augenblicklichen Betriebsbedingungen?
- In welcher Weise kann die Anlage bei den von ihr geforderten Funktionen gestört sein?
- Welche Ursachen haben die Funktionsstörungen?
- Welche Folgen hat jede der Störungen?
- Auf welche Weise wirkt sich die Störung aus?
- Wie kann man der einzelnen Störung vorbeugen?
- Was ist zu unternehmen, wenn keine annehmbare vorbeugende Lösung gefunden werden kann?

Die Fragen, wie eine Anlage in ihrer Funktion gestört werden kann und wo die Ursachen für diese Störung liegen, stehen im Mittelpunkt einer RCM-Analyse. Die Untersuchung der Folgen einer Störung schließt sich an, wodurch jede Fehlfunktion entsprechend ihres Gewichts eingestuft werden kann. Aus dieser Grundlage werden die Entscheidungen über weitere Instandhaltungsaktivitäten festgelegt /MAT-02/.

Beispiele aus der Stromversorgung zeigen, dass mit Hilfe von RCM die Aufwendungen für die Instandhaltung durch die Berücksichtigung individueller Qualitätsanforderungen der Kunden reduziert werden können /BAL-03/.

3.3.3 *RAMS- LCC Management*

Die Norm DIN EN 50126 /DIN-00/ definiert RAMS als die Kombination aus Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (Reliability, Avialability, Main-

¹⁾ Internetquelle

tainability, Safety). Unter Einbeziehung der Lebenszykluskosten (LCC - Life Cycle Cost) vereint diese Methode alle Maßnahmen und Verfahren zum Erkennen des Zustandes und der Veränderung eines technischen Produktes einerseits und die langfristige Reduzierung der Lebenszykluskosten andererseits. Weiterhin zielt RAMS-LCC Management auf die dauerhafte Kontrolle und Prognose der einzelnen Elemente Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit /JUN-01/. Es handelt sich also um eine Führungsmethode, die die technischen Fragen im Instandhaltungsbereich im Zusammenhang mit den auftretenden Kosten gesamtheitlich betrachtet, analysiert und verbessert und damit die Effizienz des Gesamtsystems steigert.

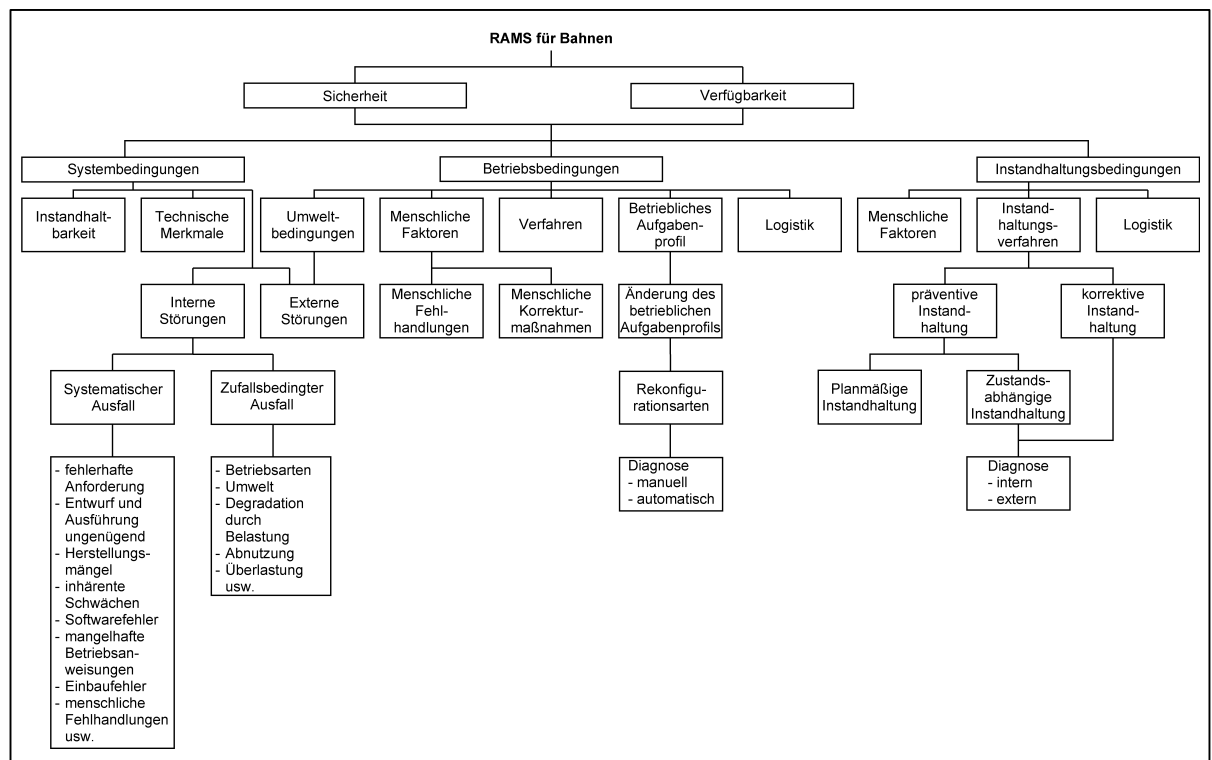


Abbildung 3-14: Faktoren, die RAMS für Bahnen beeinflussen nach DIN EN 50126

Der technische Aspekt dieser Vorgehensweise stützt sich auf die DIN EN 50126 „Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit“, die sich speziell auf Anwendungen in der Schienenfahrzeugtechnik bezieht. Demnach trägt RAMS in erheblichem Maß zur Qualität der Betriebs- und Dienstleistungen eines Bahnunternehmens bei. RAMS beschreibt die Vertrauenswürdigkeit, mit der das System das Erreichen des Ziels, nämlich einen fahrplanmäßigen und sicheren Schienenverkehr zu gewährleisten, garantieren kann. Die DIN EN 50126 /DIN-00/ gliedert die RAMS beeinflussenden Faktoren in drei Gruppen, nämlich für das System, für den Betrieb und für die Instandhaltung, die in Abbildung 3-14 weiter untergliedert sind.

Die Norm DIN EN 50126 /DIN-00/ verlangt weiterhin eine Risikoanalyse, mit dem Ziel der Bewertung und Akzeptanz von Risiken. Diese muss über die einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines Fahrzeugs durchgeführt und entsprechend dokumentiert werden. Sie wird in mehreren Stufen für verschiedene Detaillierungsebenen mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt und dient der Identifikation von möglichen Gefährdungen und Ereignissen, die mit dem System verbunden sein können /SOL-04/. Erweitert werden die bisher genannten Forderungen um die der Sicherheitsintegrität (Safety Integrity) und das Fail-safe-Konzept. Die Safety Integrity bezieht sich auf die Begrenzung der Ausfallwahrscheinlichkeit, die notwendig ist, um die geforderte sichere Funktionsfähigkeit zu erzielen. Das Fail-safe-Konzept stützt sich auf die Verwendung von Bauteilen mit klar erkanntem Ausfallverhalten und darauf, dass trotz Ausfall eines Bauteils ein sicherer Zustand des Systems gewährleistet ist /DIN-00/.

Tabelle 3-2 zeigt die einzelnen Phasen im Lebenszyklus eines Systems und die jeweiligen Verantwortlichkeiten im RAMS-Prozess.

Tabelle 3-2: Verantwortlichkeiten im RAMS-Prozess während des Lebenszyklusses nach DIN EN 50126

	Kunde/ Betreiber	Genehmi- gung Behörde	Haupt- auftrag- nehmer	Unter- auftrag- nehmer	Lieferant
Konzeptphase	X				
Systemdefinition und Anwendungsbedingungen	X				
Risikoanalyse	X		X		
Systemanforderungen	X	(X)			
Zuteilung der Systemanforderungen	(X)		X		
Konstruktion und Implementierung			X	(X)	
Fertigung			X	X	X
Montage			X	(X)	
System-Validierung	X	X	X	(X)	
Systemabnahme	X	X			
Betrieb und Instandhaltung	X		(X)	(X)	
Erfassung der Leistungsfähigkeit	X		(X)	(X)	
Änderung und Nachrüstung	X		X	X	
Stilllegung und Entsorgung	X		(X)		

X = volle Verantwortung

(X) = geteilte Verantwortung

Der Kostenaspekt beim RAMS-LCC Management wird durch folgende fünf Kostensäulen getragen /ERB-00/:

- Einmalkosten (z. B. Anschaffung),
- Kosten durch externe Ereignisse (z. B. Unfälle),
- Betriebskosten (z. B. Energie),
- Instandhaltungskosten und
- Folgekosten für Ersatzmaßnahmen (z. B. Schienenersatzverkehr).

Die Abschätzung der Lebenszykluskosten erfordert detaillierte Kenntnisse über das System und über die Einsatzbedingungen, um die Vollständigkeit der erfassten Kosten zu gewährleisten /ERB-00/.

Die Deutsche Bahn AG nutzt RAMS-LCC u. a. für die Prognose und Empfehlung von Instandhaltungszeitpunkten z. B. für Tauschtermine unter Einbeziehung der Kostengesichtspunkte. Sie bescheinigt, dass diese Methode durch dauerhafte Verifizierung und Anpassung der Instandhaltungsabläufe unter Einbindung abgesicherte Verfahren und Werkzeuge sowie motivierter Fachexperten ein guter Ansatz zu einer zuverlässigkeitsbezogenen Instandhaltungsoptimierung ist /BUT-03/.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das RAMS-LCC Management weit über die Instandhaltung hinausgeht und sich in alle Phasen des Lebenszyklus verzweigt. Diese Methode nimmt eine zentrale Stellung zur Bewertung und Akzeptanz von Risiken bei gleichzeitiger Verknüpfung von Sicherheit und Zuverlässigkeit ein /BUT-03/. Sie vereint die wichtigsten Grundlagen für einen sicheren, zuverlässigen und kostengünstigen Betrieb von Bahnanlagen und beugt durch die gesamtheitliche Betrachtung Konflikten zwischen den Einzelaspekten Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit und Lebenszykluskosten vor.

3.3.4 Kaizen

„Wenn man einen Mann drei Tage nicht gesehen hat, sollten seine Freunde gut darauf achten, welche Veränderungen an ihm vorgegangen sind.“ (japanisches Sprichwort) Diese Grundhaltung, das Streben nach kontinuierlichen Veränderungen, spiegelt sich in Kaizen wider. Die Philosophie des Kaizen fordert nicht nur eine Veränderung sondern vielmehr eine unendliche Verbesserung in allen Bereichen eines Unternehmens und die Flexibilität, sich den Veränderungen der Umwelt anzupassen /MAN-05/¹⁾ /MAS-93/. Aus dem Japanischen übersetzt steht das Wort „kai“ für Veränderung und „zen“ für das Gute. Es ist demnach unter Kaizen wörtlich die Veränderung zum Guten zu verstehen.

¹⁾ Internetquelle

Die Wurzeln von Kaizen liegen in dem Streben der Japaner nach Fortschritt, das sich aus der desolaten Situation vieler japanischer Firmen als Folge des 2. Weltkrieges entwickelte /MAN-05/¹⁾. In Deutschland wird Kaizen mit dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) gleichgesetzt. Jedoch sind die verfolgten Ziele in Japan und Deutschland unterschiedlich. Während in Japan der Prozess und die kontinuierliche Verbesserung an erster Stelle stehen, wird in der westlichen Welt das Resultat und die Innovation im Vordergrund gesehen /TSU-05/. Nach Kubran /KUB-03/ findet die Innovation im mittleren und im Top Management statt, Kaizen hingegen erstreckt sich auf alle Bereiche in einem Unternehmen, angefangen beim Arbeiter bis hin zum Manager.

In Bezug auf die Schrittweite mit der die Verbesserungen erzielt werden, unterscheiden sich die Sichtweisen in Japan und in Europa sehr stark. Während die Japaner eher kleine kontinuierliche Verbesserungen ihrer Arbeitsmethoden, Werkzeuge, Prozesse etc. durch die Einbeziehung aller Mitarbeiter bei geringen Investitionen bevorzugen, neigen die Europäer eher zu temporären Anstrengungen mit größerem Investitionsvolumen, die vorrangig einen Neuaufbau gegenüber einer Verbesserung und Erhaltung verfolgen.

Imai /IMA-92/ beschreibt Kaizen nicht nur als Methode zur Verbesserung einzelner Abläufe o. ä., sondern vielmehr als eine Strategie des Managements entlang der gesamten Geschäftsprozesskette. Diese beginnt mit der strikten Orientierung am Kunden und endet schließlich in der Erfüllung der Kundenzufriedenheit und den damit verbundenen Aktivitäten. Dazu zählen u. a. Qualitätskontrolle, Total Quality Control (TQC) etc.. Kaizen geht davon aus, dass es keinen Betrieb ohne Probleme gibt und diese durch Etablierung einer Unternehmenskultur, in der jeder ungestraft das Vorhandensein von Problemen eingestehen kann, gelöst werden /MAN-05/¹⁾. Kaizen zu leben bedeutet eine permanente Analyse und gleichzeitig die Verbesserung aller Prozesse durch eine evolutionäre Vorgehensweise in kleinen Schritten, die nie als abgeschlossen betrachtet wird. Demnach wird fortlaufend ein Regelkreis nach dem Modell des Deming-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) durchlaufen, wobei alle Arbeitsmethoden, Werkzeuge und Prozesse in Frage gestellt werden. Es entsteht eine Art der Selbstkontrolle, die Zweifel an der eigenen Tätigkeit und dem Ergebnis suggeriert und damit automatisch neue Ideen für eine Verbesserung hervorruft.

Nach Kubran /KUB-03/ beschreibt Kaizen den Weg für das Erreichen der Unternehmensziele nämlich „Gewinn und Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit bei gleichzeitiger Zufriedenstellung der Kunden und Erfüllung ihrer Anforderungen an Qualität, Kosten und Lieferung.“ Die Kundenzufriedenheit wird aus Sicht von Imai und Masaaki durch das Schirmkonzept erreicht, das Techniken und Methoden des modernen Qualitätsmanagements zusammenfasst /IMA-92/. Dazu zählen u. a. Kundenorientierung,

¹⁾ Internetquelle

TQC, Vorschlagswesen, Arbeitsdisziplin, Kanban, Just-in-Time. Alle Elemente des Schirmkonzeptes sind Abbildung 10-1 im Anhang zu entnehmen.

Brunner /BRU-04/ fasst die grundlegenden Voraussetzungen und Elemente von Kaizen wie folgt zusammen:

- Anwendung der sieben Qualitätswerkzeuge (Q 7),
- Ordnung, Sauberkeit, Disziplin,
- Vermeidung von Verschwendung (Muda), Überlastung (Muri), Abweichung (Mura),
- gründliches Hinterfragen jedes Problems mit den sechs Ws: wer, was, wann, warum, wo, wie,
- Problemzerlegung mit Ishikawa Diagramm nach den sechs M: Mitarbeiter, Management, Material, Maschine, Methode, Mitwelt (Umwelt) und
- Verbesserungsarbeit in Gruppen, z. B. Qualitätszirkeln.

3.3.5 Six Sigma

Mikel Harry und Richard Schroeder, Gründer der Six Sigma Academy in Arizona, /HAR-00/ beschreiben Six Sigma als einen Prozess, der es Unternehmen erlaubt, ihren Gewinn deutlich zu verbessern, indem sie die alltäglichen Geschäftstätigkeiten so konzipieren und überwachen, dass sich der Einsatz von Ressourcen und der Anfall von Abfallprodukten verringern und die Kundenzufriedenheit erhöht.

Der Grundgedanke von Six Sigma liegt darin, Prozesse und Produkte anhand von nach statistischen Methoden ermittelten Kennzahlen zu analysieren, zu bewerten und zu verbessern. Dieser Gedanke basiert auf der Idee, die Streubreite einer z. B. durch den Fertigungsprozess bestimmten Größe zu verringern und gleichzeitig deren Mittelwert in Richtung einer Verbesserung zu verschieben /HER-03/. Die Vorgehensweise verdeutlicht Abbildung 3-15.

Ein 1-Sigma-Prozess liegt vor, wenn die Verteilung der betrachteten Größe einer Normalverteilung entspricht und die Standardabweichung s mit der oberen und unteren Toleranzgrenze zusammenfällt (vgl. Abbildung 3-15a). In diesem Fall liegen 32 % der gemessenen Werte außerhalb der Toleranzbreite. Die Verbesserung dieses Prozesses z. B. in einen so genannten 6-Sigma-Prozess geschieht gemäß Abbildung 3-15b dadurch, dass bei Beibehaltung der alten Toleranzgrenzen die Streubreite der betrachteten Größe reduziert wird, so dass die Standardabweichung der neuen Verteilung nur noch $1/6$ der alten beträgt. In einem weiteren Schritt kann nun die betrachtete Größe selbst im Sinne einer Verbesserung verändert werden, z. B. wie in Abbildung 3-15c dargestellt durch die Verschiebung des Mittelwertes um den Betrag $1,5 s$ in Richtung der oberen Toleranzgrenze. In diesem Fall würden

dann lediglich 3,4 DPMO (Defects Per Million Opportunities) außerhalb des Toleranzbereichs liegen. Der Prozess oder das Produkt wären damit nahezu fehlerfrei. Auf den Frankfurter Flughafen angewendet, würden sich bei einem Sigma-Niveau von 3,85 täglich rund zehn außerplanmäßige Ereignisse bei Start und Landung der Flugzeuge ereignen /SIE-02/.

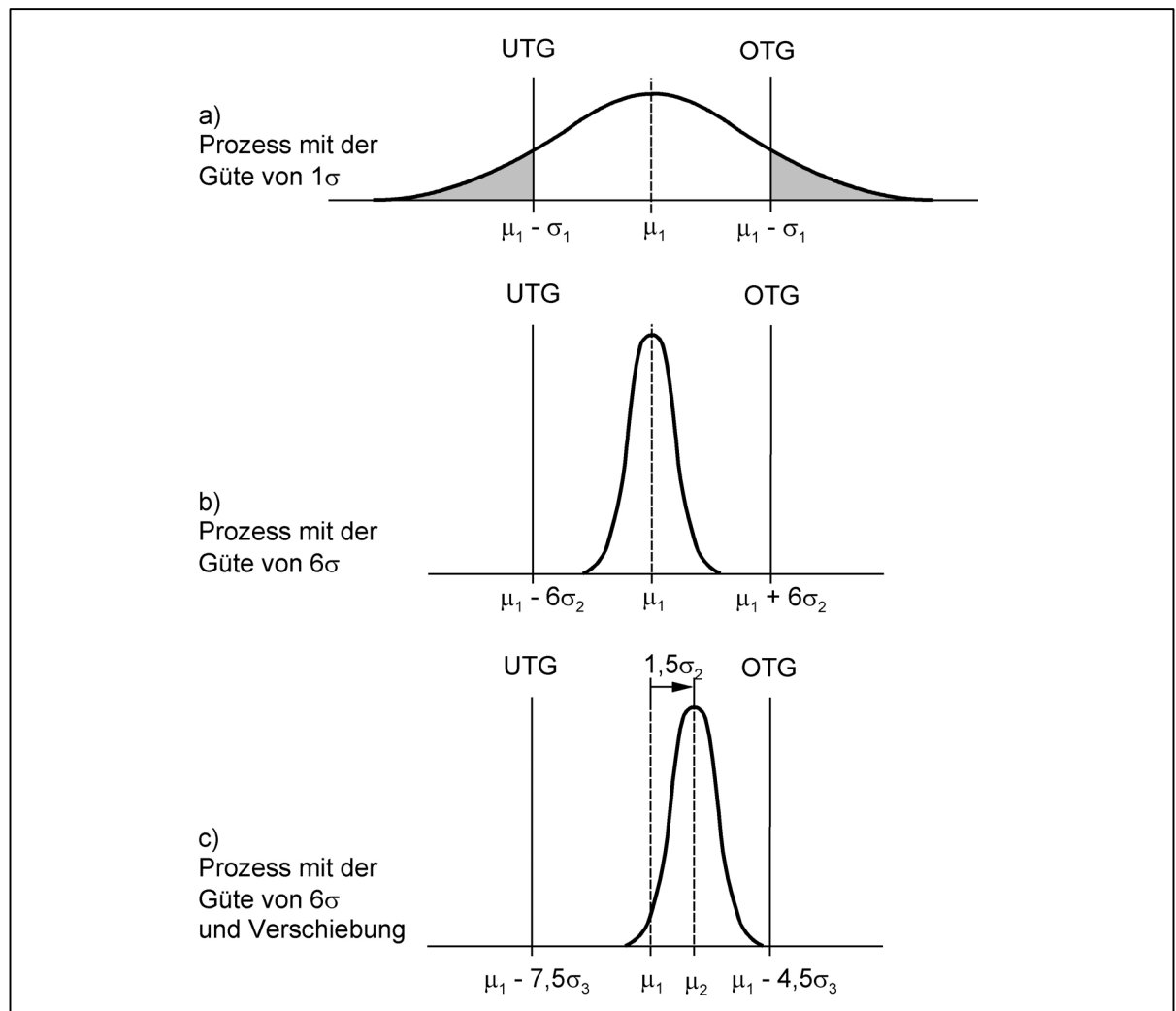


Abbildung 3-15: Grundgedanke von Six Sigma

Welche Vorgehensweise liegt Six Sigma zugrunde? Grundlage bildet ein Werkzeugkasten mit einer Vielzahl von erprobten statistisch begründeten Tools /BAN-04/, die innerhalb des Problemlösungszyklus, dem so genannten DMAIC, angewendet werden. Der Name leitet sich aus den Bezeichnungen der fünf Phasen Define, Measure, Analyze, Improve und Control eines solchen Zyklus ab. Die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Phasen des Problemlösungszyklus stellt die Tabelle 3-3 vor. Anregungen dazu gaben Veröffentlichungen von Herrmann /HER-03/ und Rath & Strong /RAT-00/.

Tabelle 3-3: Inhalte und Ergebnisse des Six Sigma Problemlösungsmodells

	Inhalte	Ergebnisse
Define	• Definition von Projektzweck und -umfang • Sammeln von Informationen über den zu betrachtenden Prozess und den Kunden • Verstehen der (finanziellen) Auswirkungen des Prozesses	• Definition der angestrebten Verbesserung sowie des Maßstabs • Grober Ablauf des betrachteten Prozesses (SIPOC) • Liste von kundenrelevanten Merkmalen
Measure	• Entwicklung eines Datenerfassungsplans (welche Daten, was wie messen, das Ergebnis Beeinflussende Faktoren, wer ist verantwortlich)	• Daten zur gegenwärtigen Prozessleistung • Basisdaten, die das Problem und dessen Auftreten näher beschreiben • Differenzierte Problembeschreibung
Analyze	• Theorien über Ursachen aufstellen • Theorien mit Daten bestätigen • Entscheidende Ursachen des Problems klar identifizieren • Quantifizieren von Alternativen	• Begründete Theorien zu den Problemursachen
Improve	• Lösungen zum Abstellen der verifizierten Ursachen entwickeln • Lösungen umsetzen und bewerten	• Lösung des Problems • Bewertungsmethode der geplanten Verbesserung
Control	• Überwachung der Verbesserungen • Ergebnisse sichern • Neue Methoden ständig weiterentwickeln	• Analyse des verbesserten Prozesses • Überwachungssystem • Dokumentation (Ergebnisse, Erkenntnisse, Empfehlungen)

In der Literatur werden Six Sigma verschiedene Aufgaben zugewiesen /LAN-03/:

- statistische Methode zur Verbesserung von Prozessen und Produkten,
- strukturierte Vorgehensweise, um Prozessverbesserungen zu erreichen,
- Methode der unbedingten Ausrichtung am Kunden und
- ganzheitliches Managementkonzept für dauernden Kulturwandel, um ein Unternehmen auf höhere Kundenzufriedenheit, Profitabilität und Wettbewerbsfähigkeit einzustellen.

Die Anwendung der Six Sigma Methode hilft Prozesse zu verstehen und zu definieren. Das genaue Verständnis über den Prozessablauf und den Einfluss einzelner Prozessschritte und -parameter auf das Prozessergebnis ermöglicht die nachhaltige Verbesserung der Prozessqualität und reduziert damit die Fehlleistungskosten. Six Sigma fordert stabile Prozesse, die hinsichtlich Fehlleistungen und deren eventuellen Folgen, kostengünstiger sind. Weiterhin unterstützt Six Sigma die objektive Betrachtung von Prozessgüte und Prozessverbesserungen in direkter Abhängigkeit vom

Kundenwunsch. Vergleiche der Prozessgüte (intern oder extern) können somit unabhängig vom betrachteten Prozess gezogen werden.

3.4 Kritische Beurteilung der angeführten Strategien

Die im Kapitel 3.3 erläuterten Strategien zur Verwirklichung der Instandhaltungskonzepte werden verstärkt im Bereich der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen eingesetzt, um die Wirtschaftlichkeit und den Gewinn des eigenen Unternehmens zu steigern und die Wettbewerbsposition am Markt zu verbessern.

Welche Strategie eignet sich nun am Besten, um die Instandhaltung einer Schienenfahrzeugflotte wettbewerbsfähig zu gestalten? Allgemeingültig ist diese Frage nicht zu beantworten. Die Stärken der jeweiligen Strategien können jedoch, gepaart mit der eigenen Unternehmensphilosophie und den eigenen strategischen Ansätzen, zur Verwirklichung einer spezifisch guten Lösung genutzt werden.

Die Strategien RCM und RAMS-LCC sind speziell auf die Instandhaltung von Fahrzeugen zugeschnitten und fordern eine langfristige Steigerung der Zuverlässigkeit und damit eine Verbesserung der Fahrzeugqualität. RAMS-LCC verfolgt darüber hinaus einen gesamtheitlichen Ansatz durch die weitere Analyse von Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit und Kosten. RAMS-LCC liefert dadurch teilweise detaillierte Verfahrensansätze, die von RCM nicht abgedeckt werden. Die Reduzierung von Kosten ist für RCM zweitrangig. RAMS-LCC plant weiterhin eine direkte Rückkopplung zum Hersteller und verzweigt sich umfassend in alle Phasen des Lebenszyklus. Dadurch wird einerseits eine dauerhafte Analyse und Kontrolle durchgeführt. Andererseits ist der Aufwand für langfristige Statistiken, Analysen u. ä. gerade bei inhomogenen Fahrzeugparks mit Fahrzeugen verschiedener Fahrzeugtypen und Hersteller sehr hoch. Hinzu kommt ein kostenintensiver Aufwand für die Schulung der auf diesem Gebiet spezialisierten Mitarbeiter. Im Vergleich dazu ist dieser bei RCM eher gering. Die beiden Strategien grenzen sich damit deutlich von einander ab, wobei RAMS-LCC einige Elemente von RCM mit weiteren vereint und mehrschichtige Ziele verfolgt.

Im Gegensatz zu RCM und RAMS-LCC sind die Strategien TQM, Kaizen und Six Sigma nicht auf Schienenfahrzeuge fokussiert. Sie sind in vielen Bereichen anwendbar und ermöglichen damit einen gesamtheitlichen Ansatz zur Verbesserung eines Instandhaltungssystems. Ebenso fordern alle drei Strategien eine Ausrichtung am Kunden (intern/extern). Das Total Quality Management erweitert diese Forderung durch den Ansatz, alle Prozesse qualitativ zu analysieren, zu verbessern und zu dokumentieren, um im Gesamtergebnis den besten Erfolg zu erzielen. Problempunkt dieser Strategie ist die unzureichende Strukturierung sowie eine ungenügende Führung durch Verbesserungsprojekte und die unternehmensweite Einführung eines

TQM-Systems. Viele Unternehmen sind nicht in der Lage sich von den existierenden Vorgehens- und Denkweisen zu lösen, da sie den Fortschritt veränderter Ansätze nicht messen und damit auch nicht bewerten können. Damit vollzieht sich eine Veränderung häufig eher emotional als von Kennzahlen gesteuert. Ebenso verhält sich der Umgang mit Kaizen. Allerdings wird hier im Gegensatz zu TQM ein klarer Vorteil in der kontinuierlichen Verbesserung, d. h. dem nicht stagnierenden Prozess der ständigen Annäherung an ein Optimum, gesehen. Kaizen unterstützt die Evolution aller Prozesse und Produkte durch die Eigeninitiative der Verantwortlichen. Weiterhin zeigt sich nicht nur die Einbindung aller Mitarbeiter wie bei TQM, sondern auch das Leben dieser Grundhaltung als Erfolgsfaktor.

Six Sigma grenzt sich vor allem durch die systematische und phasenbezogene Vorgehensweise von den anderen Strategien ab. Dabei werden erprobte Werkzeuge miteinander kombiniert und in Anhängigkeit der jeweiligen Projektphase konsequent angewendet. Die Orientierung am vorgegebenen Problemlösungszyklus, dem DMAIC, hilft die Prozesse zu verstehen, sie zu analysieren und strukturiert und zielorientiert zu verbessern. Durch das strenge Projektmanagement werden zeitliche Verzögerungen und personelle Engpässe vermieden. Weiterhin fordert und unterstützt Six Sigma die Ausrichtung an kundenorientierten Kennzahlen. Darüber hinaus verfolgt die Strategie uneingeschränkt die Steigerung der Wirtschaftlichkeit und die Steigerung des Gewinns eines Unternehmens. Nicht zu vernachlässigen hingegen ist der hohe Schulungsaufwand für die Mitarbeiter in allen Bereichen und Hierarchieebenen, um Six Sigma entsprechend im Unternehmen zu implementieren.

Eine eigene Untersuchung /PRZ-05/ über den Einsatz von Instandhaltungsstrategien unterstreicht, dass Kaizen und Six Sigma von den hier vorgestellten Strategien die größten Erfolge in den Bereichen Arbeitsdurchführung, Kundenorientierung, Reklamations- und Ersatzteilwesen erzielen. Besonders positiv zeigen sich hier die Optimierung von Arbeitsabläufen, die Steigerung der Qualität, die Reduzierung von Fehlleistungen, die verbesserte Arbeitsdokumentation und Termintreue. Dabei bescheinigen die meisten der befragten Unternehmen den Erfolg nicht durch den Einsatz nur einer Strategie, sondern aus einer Kombination beider Strategien. Durchschnittlich kann mit dieser Kombination eine Kosteneinsparung von 10 - 20 % erreicht werden.

3.5 Gesetzliche Vorgaben für die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen

In Deutschland ist die Zulassung von Fahrzeugen im Spurgebundenen Verkehr in zwei Rechtsverordnungen geregelt. Die Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) bildet die Rechtsgrundlage für den Bau und Betrieb von Straßenbahnen im Sinne des Personenbeförderungsgesetzes (§ 4). Demnach gelten „als Straßenbahnen auch Bahnen, die als Hoch- und Untergrundbahnen, Schwebbahnen oder ähnliche Bahnen besonderer Bauart angelegt sind oder angelegt werden, ausschließlich oder überwiegend der Beförderung von Personen im Orts- oder Nachbarschaftsbereich dienen und nicht Bergbahnen oder Seilbahnen sind.“ Die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) regelt den Bau und Betrieb von Vollbahnen.

Für Straßenbahnen im Sinne des Personenbeförderungsgesetzes, unter die in der BOStrab auch die U-Bahnen fallen, sind die Vorschriften zur Instandhaltung im Paragraphen 57 der BOStrab festgelegt. Demnach sind Inspektionen planmäßig wiederkehrend innerhalb von 500.000 km, spätestens jedoch nach acht Jahren durchzuführen /BOS-87/. Der Nachweis über die Durchführung dieser Inspektion ist gegenüber der Technische Aufsichtsbehörde (TAB) zu liefern. Diese kann in Sonderfällen die Fristen verlängern oder verkürzen.

Die Instandhaltung, die Wartung, Inspektionen und Instandsetzungen umfasst, muss sich mindestens auf die Teile erstrecken, deren Zustand die Betriebssicherheit beeinflussen können. Dabei haben sich Art und Umfang von Wartung und Inspektionen nach Bauart und Belastung der Betriebsanlagen und der Fahrzeuge zu richten /BOS-87/. Der § 57 sieht weiterhin vor, dass Fahrzeuge nach schweren Unfallschäden, insbesondere die Fahrzeuge, bei denen sicherheitsrelevante Bauteile beschädigt wurden, einer Inspektion unterzogen werden. Die VDV Schrift 170 /VDV-00/ empfiehlt die Instandhaltung nach BOStrab direkt in die laufende Instandhaltung zu integrieren, damit die geforderte Fahrzeugqualität laufend gesichert ist.

Für Eisenbahnen ist die Abnahme und Untersuchung der Fahrzeuge im § 32 der EBO geregelt. Dieser sagt aus, dass Neufahrzeuge erst nach Abnahme in Betrieb genommen werden dürfen. Weiterhin sind die Fahrzeuge planmäßig wiederkehrend mindestens alle 6 Jahre zu untersuchen. Allerdings darf die Frist zwischen zwei aufeinander folgenden Untersuchungen auf acht Jahre verlängert werden, wenn festgestellt ist, dass der Zustand des Fahrzeugs dies zulässt /EBO-67/. Darüber hinaus erweitert der § 33 die Untersuchung von Druckbehältern, Dampfkesseln und sonstigen überwachungsbedürftigen Anlagen. Für sämtliche Verlängerungen von Fristen sind Nachweise zu führen.

Die gesetzlichen Vorgaben beeinflussen damit hauptsächlich die Instandhaltung der sicherheitsrelevanten Bauteile und Baugruppen. Sie bieten damit ein gewisses Maß an Sicherheit für Fahrzeugbetreiber und Instandhalter. Allerdings haben die Gesetze auch großen Einfluss auf die Fristenstruktur und die Fristeninhalte und damit auf die Kosten in der Instandhaltung. Eine genaue Abgrenzung zwischen pflichtmäßigen und freiwilligen Maßnahmen ist durch die Gesetzgebung nicht geregelt. Im weiteren Sinn ist der gesetzlich geforderten Instandhaltung auch eine Kontrollfunktion über die sonstige Instandhaltung zuzuordnen, damit die Sicherheit im Schienenverkehr aus Sicht der Fahrzeuge in allen Bereichen gewährleistet ist.

4 Erstellung der Datenbanken zur Untersuchung der Kostenstruktur und Qualitätsparameter von U-Bahnfahrzeugen

Grundlage für die Untersuchungen zur „Reduzierung von Lebenszykluskosten schie-nengebundener Fahrzeuge im ÖPNV“ bilden mehrere eigens erstellte Datenbanken. Sie beinhalten alle für die nachfolgenden Analysen erforderlichen Daten. Damit bilden sie ein umfassendes Fundament, das zur Untersuchung der Kostenstruktur und Qualitätsparameter von U-Bahnzügen und für die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen erstellt wird. Der Aufbau der Datenbanken erfolgt in mehreren Schritten.

Zunächst werden die Anforderungen an die Datenbank aus den geplanten Untersuchungen abgeleitet. Darin sind abhängig von der jeweiligen Phase im Produktlebenszyklus Kennzahlen definiert. Aus den Kennzahlen und der notwendigen Untersuchungstiefe ergeben sich die Anforderungen an die Inhalte und die Struktur der Datenbank sowie an den Detaillierungsgrad der Datenerhebung. In einem weiteren Schritt werden die Daten erhoben, aufbereitet und harmonisiert. Damit wird sichergestellt, dass die Daten vereinheitlicht und unter einander vergleichbar sind. Abschließend werden alle Daten in mehreren Datenbanken zusammengeführt.

Die folgenden Abschnitte befassen sich vertiefend mit den einzelnen Schritten von der Grundidee bis zur Aufstellung der eigentlichen Datenbanken. Der Ablauf der Datenerhebung bis hin zu einer fertigen Datenbank ist in Abbildung 4-1 aufgezeigt.

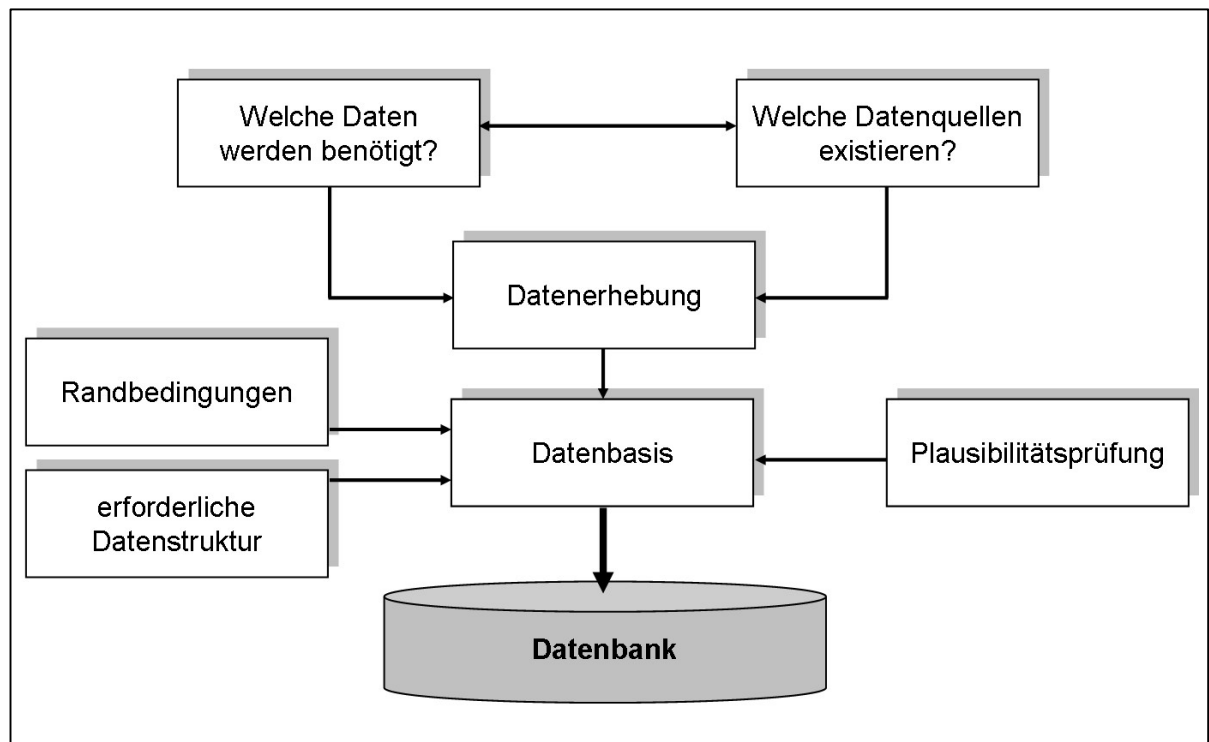


Abbildung 4-1: Ablauf beim Erstellen der Datenbanken

4.1 Umfang der zu untersuchenden Fahrzeugparameter

Welche Anforderungen muss die Datenbank erfüllen, um die nachfolgenden Untersuchungen anhand dieser durchführen zu können? Zunächst werden die Randbedingungen durch Betrachtung der anstehenden Untersuchungsinhalte abgesteckt und in einem weiteren Schritt die zu erhebenden Messwerte festgelegt.

Für beide Untersuchungen steht die gesamte der Fahrzeugflotte der Berliner U-Bahn als Datenlieferant zur Verfügung.

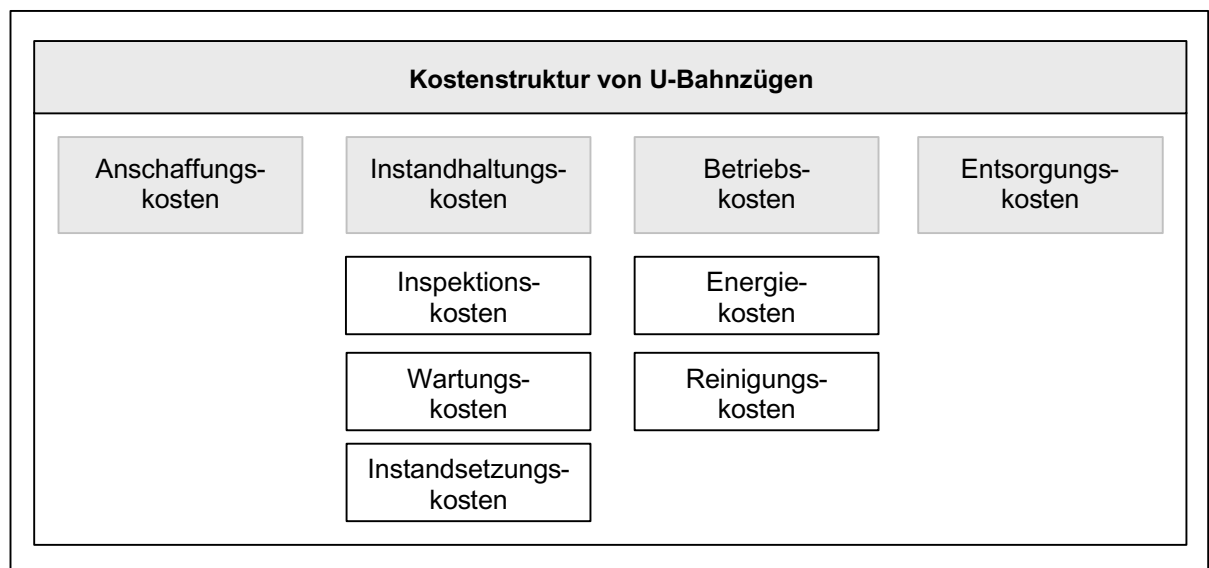


Abbildung 4-2: Kostenstruktur von U-Bahnzügen

Kapitel 5 durchleuchtet die Kostenstruktur von U-Bahnzügen in Abhängigkeit der Phasen des Lebenszyklus von der Neuanschaffung über den Betrieb und die Instandhaltung bis hin zu den Aufwendungen für die Beseitigung von Vandalismusschäden. Die Kosten für die Instandhaltung werden zusätzlich nach Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungskosten, die Betriebskosten nach Kosten für Energie und Reinigung in Abhängigkeit von der Kilometerlaufleistung unterteilt. Um eine langfristige Entwicklung der Kosten im Bereich der Instandhaltung nachvollziehen zu können, beträgt der Betrachtungszeitraum mehrere Jahre. Die Analysen werden detailliert pro Nutzwagen für eine Fahrzeugserie durchgeführt. Dabei werden die Kosten für Instandhaltung, Betrieb und die Kosten zur Beseitigung der Vandalismusschäden in Jahresscheiben abgebildet. Einerseits ist eine differenziertere Datenerhebung über den Betrachtungszeitraum von 12 Jahren aufgrund der Struktur der Datenquelle nicht möglich, andererseits wird die gewählte Erhebungstiefe für eine Untersuchung zur langfristigen Kostenentwicklung als ausreichend angesehen. Die Kosten für die Neuanschaffung werden als einmaliger Betrag pro Nutzwagen aufgeführt.

Für eine differenzierte Betrachtung der Instandhaltungskosten ist es erforderlich, diese in ihre Instandhaltungsleistungsarten aufzugliedern. Daher gilt die detaillierte Abbildung der Kosten je Nutzwagen und Jahr für jede zu betrachtende Instandhaltungsleistungsart als Anforderung an die Datenbank.

Die Untersuchung im Kapitel 6 fordert eine noch differenziertere Aufschlüsselung der Instandhaltungskosten über ein Jahr. Diese werden bis auf die Ebene der Fertigungsaufträge detailliert und jeweils auf die Instandhaltungsleistungsart aufgeschlüsselt. Die Datenbank muss in der Lage sein, für jeden Nutzwagen aller Fahrzeugserien die Kosten pro Fertigungsauftrag auf die einzelnen Instandhaltungsleistungsarten herunterzuberechnen. Dabei muss jedem Auftrag ein Datum und entsprechend die Fristenstufe zugeordnet sein.

In der Untersuchung wird die Instandhaltung nicht nur an den Kosten aus den Bereichen Lohn und Material bewertet, sondern auch an zwei qualitätsorientierten Kennzahlen, dem Instandhaltungsbedarf und den fahrgastwirksamen Ausfällen, die in eigenständigen Datenbanken abgelegt werden. Der Instandhaltungsbedarf soll täglich für alle Fahrzeugserien in Abhängigkeit der Werkstatt, die fahrgastwirksamen Ausfälle getrennt nach Serien und Linien bestimmt werden können. Weiterhin sind jedem Nutzwagen die monatlichen Fahrkilometer zuzuordnen.

Den Datenbanken soll im Hinblick auf alle Untersuchungen zusätzlich die Fahrzeugserie und die Antriebsart für jeden Nutzwagen zugeordnet werden.

4.2 Vorgehensweise bei der Datenaufnahme

4.2.1 Datenaufnahme für die Kostenanalyse

Die Daten für die Kostenanalysen werden direkt aus dem ERP-System (Enterprise Resource Planning System) SAP R/3 selektiert. Für jede Instandhaltungsleistungsart sind die Kosten für jeden Auftrag unterteilt nach Lohn, Material- und sonstigen Kosten über einen Report abzurufen. Alle für die Gesamtheit der Untersuchungen notwendigen Instandhaltungsleistungsarten sind im Definitionsteil aufgelistet und ihre Inhalte erklärt.

Eine erste Analyse gibt Aufschluss über die Vertrauenswürdigkeit der Daten. Dazu werden alle Datensätze einzeln für jeden Doppeltriebwagen chronologisch sortiert und die Reihenfolge der angefallenen Fristenarbeiten mit dem Fristenplan (vgl.

Abbildung 10-2) abgeglichen. Eventuelle Widersprüche werden detailliert verfolgt und entsprechend eingearbeitet. Weiterhin sind überschlägige Abschätzungen für die Kosten je Instandhaltungsleistungsart und je Kostenart durchzuführen und diese mit Erfahrungswerten aus den Vorjahren zu vergleichen. In einem dritten Schritt werden die Kosten für jeden einzelnen Auftrag für jeden Doppeltriebwagen in Diagrammen (z. B. Punktediagramm) aufgetragen und nach Besonderheiten und Unstimmigkeiten untersucht. Diese sind detailliert zu betrachten und ggf. nachzubessern.

Bei der Voruntersuchung der Daten zeigte sich, dass die Trennung von Aufträgen für Arbeiten infolge Inspektion & Wartung und für Arbeiten aufgrund von Schadwagen (Fahrzeug, bei dem außerplanmäßige Arbeiten zwischen zwei aufeinander folgenden Fristen aufgrund von Defekten erforderlich sind) wegen einer Überschneidung in den Instandhaltungsleistungsarten nicht eindeutig möglich war. Um dennoch diese Daten zu trennen, wurden anhand des Auftragsdatums die Aufträge mit einem Datum unmittelbar nach Inspektion & Wartung auftreten, den Arbeiten infolge Inspektion & Wartung und damit den Fristenarbeiten zugeordnet. Arbeiten, die nicht im direkten zeitlichen Umfeld lagen, wurden dem Schadwagen zugeordnet. Der Katalog der Instandhaltungsleistungsarten der BVG wurde daher so modifiziert, dass zukünftig eine Trennung in einzelne Leistungsarten exakt erfolgen konnte. Es folgte ein Vergleich zwischen den Daten, die anhand des alten Katalogs und denen die nach der Anpassung des Katalogs im ERP-System hinterlegt wurden. Dieser Vergleich unterstreicht die gelungene Trennung für die Kosten, die nach dem alten Katalog selektiert wurden.

Ein Ausschnitt aus dem alten Katalog der Instandhaltungsleistungsarten im Anhang (Abbildung 10-3) verdeutlicht die dargelegte Problematik.

Für eine vergleichsfähige Bewertung der einzelnen Fahrzeuge, werden deren Kosten in Euro/Nwkm angegeben. Dazu ist die Angabe der Nutzwagenkilometer (Nwkm) für ein Jahr für die betrachteten Fahrzeuge notwendig. Zu deren Generierung stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Selektion der Km-Daten aus dem SAP oder
- Übernahme der km-Daten aus separat geführten Km-Listen des Fahrzeugbetreibers (Fahrdienst).

Die in SAP gespeicherten km-Daten werden zuvor über ein elektronisches System (LISI - integriertes Leit-, Informations- und Sicherungssystem) aufgenommen und täglich an das SAP übertragen. Zur Bestimmung der km-Leistung sind im gesamten U-Bahn Streckennetz Messpunkte installiert. In einem Zentralsystem sind jeweils die km-Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten hinterlegt. Beim Überfahren ei-

nes Messpunktes werden die durchfahrenen Kilometer für jedes Fahrzeug entsprechend gebucht. Der Fahrzeugbetreiber hingegen bestimmt die Kilometer über die aktuellen Fahrpläne und die den einzelnen U-Bahn-Linien zugeordneten Streckenlängen. Der Vergleich der km-Daten aus beiden Quellen zeigte eine Abweichung von weniger als 0,2 %. Da die Datenqualität aus dem LISI höher angesehen und eine einheitliche Datenquelle angestrebt wird, werden die km-Daten aus dem SAP für die weiteren Analysen verwendet.

4.2.2 Datenaufnahme für die Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle

Ein Ausfall gilt als fahrgastwirksam, wenn die Fahrgäste den Wagen oder Zug aufgrund von technischen Defekten verlassen müssen. Es handelt sich dabei um Defekte, die für die Fahrgäste im Falle eines Weitertransportes ein Sicherheitsrisiko darstellen.

Die Daten über die fahrgastwirksamen Ausfälle werden aus Tabellen für den jährlichen Qualitätsreport des Bereichs U-Bahnfahrzeuge entnommen. Sie enthalten die Ausfälle aufgetragen nach Linien und Serien. Den Tabellen können nicht nur die Summen der fahrgastwirksamen Ausfälle, sondern auch detaillierte Angaben über die Anzahl der Ausfälle von Türen, Hilfsbetrieben, Druckluft u. ä. entnommen werden. Als Kenngröße werden die fahrgastwirksamen Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm angegeben. Entsprechend der Analyse der Kosten wurden die Nwkm aus dem ERP-System verwendet.

4.2.3 Datenaufnahme für die Analyse des Instandhaltungsbedarfs

Für den Instandhaltungsbedarf sind grundsätzlich zwei Definitionen zu unterscheiden:

- (1) Gesamter Instandhaltungsbedarf: Quotient aus der „Summe aller Wagen, die der Werkstatt zugeführt sind“ und der „Summe aller Wagen, die in der Verkehrsspitze benötigt werden“. Damit werden alle Fahrzeuge unabhängig vom Grund für den Werkstattaufenthalt mit in die Betrachtung eingezogen.
- (2) Beeinflussbarer Instandhaltungsbedarf: Quotient aus der „Summe aller Wagen, die der Werkstatt aus einem selbst beeinflussbaren Grund zugeführt sind“ und der „Summe aller Wagen, die in der Verkehrsspitze benötigt werden“. Es werden demnach Fahrzeuge, die durch andere Einflüsse z. B. aufgrund von Vandalismus, Garantieschäden oder durch Versuche dem Verkehrsbedarf nicht zur Verfügung stehen, nicht in die Berechnung des Instandhaltungsbedarfs einbezogen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird meist nur noch der Begriff Instandhaltungsbedarf verwendet. Er ist gleichbedeutend mit dem „gesamten“ Instandhaltungsbedarf.

Außer Acht bleibt in dieser Definition der Überhang an Fahrzeugen, der so genannten Betriebsreserve. Diese definiert sich nach VDV801 als: „Fahrzeugbestand, der zusätzlich zum verkehrlich erforderlichen Fahrzeugeinsatz am Regelwerktag in der Verkehrsspitze notwendig ist, um bei unvorhergesehenen Fahrzeugausfällen im Betrieb das Leistungsangebot zu erbringen“. Jedoch wird die Betriebsreserve in dieser Arbeit zusätzlich zum IH-Bedarf betrachtet. Die Schrift VDV801 sieht für Schienenfahrzeuge einen Instandhaltungsbedarf von maximal 10% vor /VDV-98/.

Um Vergleiche zwischen den beiden Sichtweisen ziehen zu können, werden die Daten so selektiert, dass der gesamte und der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf bestimmt werden können.

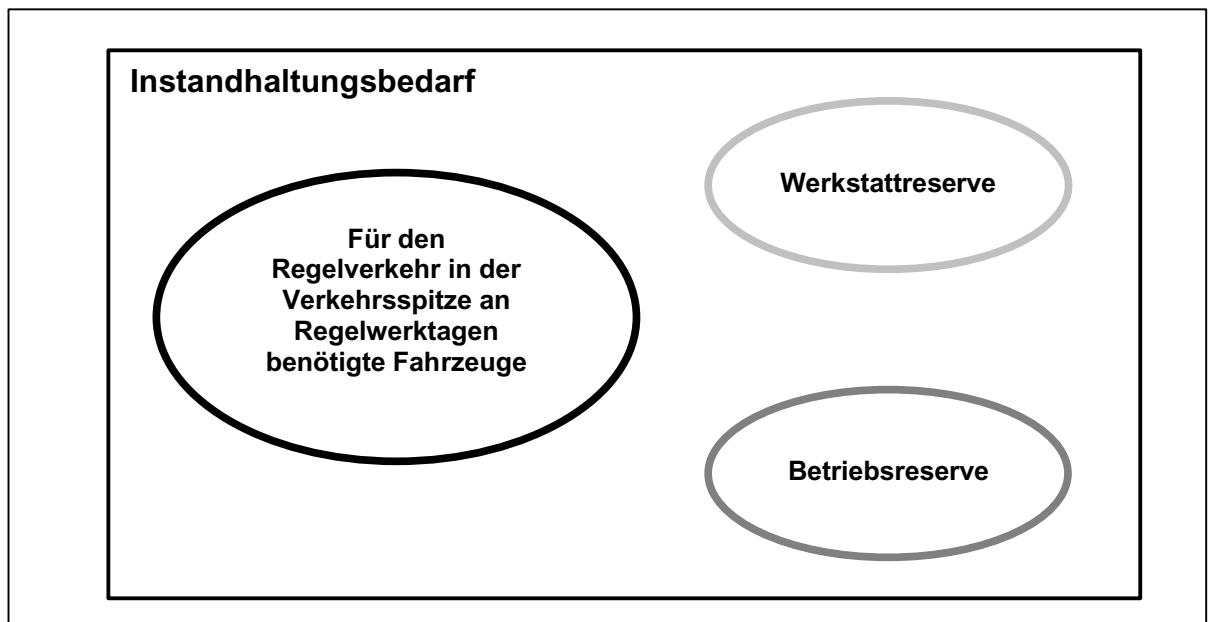


Abbildung 4-3: Komponenten zur Bestimmung des Instandhaltungsbedarfs

Als Basis für die Bestimmung des Instandhaltungsbedarfs werden Datenaufnahmen aus den jeweiligen Werkstätten ausgewertet. Aus diesen Daten können tagesgenau der Werkstatt- und der Verkehrsbedarf an Fahrzeugen ermittelt werden. Die detailliert aufgenommenen Daten erlaubten es, die Anzahl der Fahrzeuge abzuleiten, die sich in der Werkstatt befinden und die Gründe für den Werkstattaufenthalt (z. B. Inspektion, Vandalismus) zu identifiziert. Der Verkehrsbedarf wird in Abhängigkeit der Fahrpläne durch den Betreiber, den so genannten Fahrdienst bestimmt und den Werkstätten vorgegeben.

4.3 Aufbereitung der Daten

Alle aufgenommenen Daten sind von guter Qualität. Die Prüfung der Vertrauenswürdigkeit der Daten für die Kostenanalyse zeigt zwar nachbesserungsbedürftige Datensätze auf, die Daten für alle anderen Analysen können nahezu ohne Nachbesserung der Datenaufbereitung zugeführt werden.

4.3.1 Kosten

Die Daten werden im Anschluss an die Nachbesserung für die Zusammenführung in der Datenbank aufbereitet und harmonisiert. In einem ersten Schritt erfolgt die Zusammenfassung der Kosten aller Doppeltriebwagen und Züge nach Monaten und Jahren unterteilt in die jeweiligen Instandhaltungsleistungsarten und die Kostenarten. Jeder planmäßigen Frist sind im SAP ein Auftrag und eine Fristenstufe zugeordnet. Allerdings ist diese Zuordnung im SAP teilweise fehlerhaft bzw. unvollständig gepflegt. Daher werden hier über zu Hilfenahme des Fristenplans und der Kontrolle der Inhalte über die Auftragstexte im SAP, die jeweiligen Fristenstufen zugeordnet und außerplanmäßige Aufträge separat gekennzeichnet. Die Kosten werden anschließend auf den einzelnen Nutzwagen umgerechnet und den monatlichen Nutzwagenkilometern zugeordnet. Diese werden zuvor aus den Kilometerleistungen der einzelnen Doppeltriebwagen je U-Bahnlinie bestimmt. Zusätzlich werden für jeden Nutzwagen, der im Betrachtungszeitraum einer gesetzlich vorgeschriebenen Instandhaltung (BOStrab) zugeführt wurde, die Soll- und die Ist-Kilometer, die zwischen den letzten gesetzlichen Instandhaltungen gefahren wurden, in die Datenbank eingetragen. Abschließend erfolgt die Zuordnung von Fahrzeugserie, Fahrzeugprofil und Antriebsart.

Die Berliner Verkehrsbetriebe verfügen über Fahrzeugserien, bei denen zwei Nutzwagen eine autarke Einheit bilden. Diese Einheit wird als Doppeltriebwagen bezeichnet. Es existieren aber auch Züge, die mit Übergängen ausgestattet sind, so dass während der Fahrt ein Wechsel von einem Wagen in den nächsten möglich ist. Diese sind nur im Verbund von vier bzw. sechs Nutzwagen als eigenständige Einheit einsetzbar. Aus diesem Grund müssen für eine einheitliche Betrachtungsgrundlage die Kosten auf den Nutzwagen umgerechnet werden.

4.3.2 Fahrgastwirksame Ausfälle

Die Aufbereitung der Daten für die Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle gestaltet sich im Vergleich zu der der Kostenanalyse als weniger umfangreich. Es werden die fahrgastwirksamen Ausfälle pro Monat bezogen auf die Fahrzeugserie und U-Bahnlinie aufgenommen. Dabei werden die U-Bahn Linien U1 und U15 mit Ihren Ausfällen und Kilometern sowie U2 und U12 zusammengefasst und nachfolgend nur noch als U1 bzw. U2 betrachtet und diskutiert, um eine objektive Betrachtung zu gewährleisten. Die U-Bahn Linie U4 wird für die Gesamtbetrachtung einbezogen, aller-

dings für die detaillierte Betrachtung der einzelnen Linien aufgrund sehr geringer Kilometerleistungen vernachlässigt. Für die einzelnen Fahrzeugserien und U-Bahnlinien erfolgt weiterhin eine Zuordnung der Laufkilometer je Monat und der jeweiligen Schadensbilder, die den fahrgastwirksamen Ausfall verursachen.

4.3.3 Instandhaltungsbedarf

Der Instandhaltungsbedarf berechnet sich unter Vernachlässigung der Betriebsreserve aus dem Quotienten der Summe aller Fahrzeuge, an denen in allen Werkstätten pro betrachteten Tag Instandhaltungsarbeiten ausgeführt werden, und dem Fahrzeugbedarf des Verkehrs, also des Fahrzeugbetreibers. Zusätzlich wird der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf bestimmt. Hierbei werden Fahrzeuge, die aufgrund von Vandalismus- oder Garantieschäden sowie aufgrund von Versuchen oder Umbauten in der Werkstatt stehen, nicht mit berücksichtigt.

Für die Datenbank wird demnach für jeden Arbeitstag im Betrachtungszeitraum die Anzahl der Fahrzeuge in den Werkstätten aufgenommen. Diese stehen in Abhängigkeit von der jeweiligen Instandhaltungsleistungsart. Somit kann der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf separat bestimmt werden. Weiterhin werden die Werkstattaufenthalte nach den jeweiligen Werkstätten unterteilt. Der Verkehrsbedarf wird den jeweiligen Werkstätten tagesgenau zugeordnet.

4.4 Aufstellen der Datenbanken

Im Anschluss an die Aufbereitung der Daten im Hinblick auf die erforderliche Datenstruktur sowie sonstige Randbedingungen und die Prüfung der Plausibilität werden mehrere Datenbanken aufgestellt. Dazu werden die bereinigten und harmonisierten Daten gegliedert nach verschiedenen Schwerpunkten zusammengefasst. Um bei der Zusammenführung Fehler zu vermeiden, werden zunächst digitale Verknüpfungen zwischen den Basisdaten hergestellt und diese anschließend in der jeweiligen Datenbank zusammengeführt und gespeichert. Damit ist ein durchgängiger Informationsfluss von der Datenaufnahme bis in die Datenbank ohne Medienbruch gewährleistet.

Insgesamt werden fünf einzelne Datenbanken erstellt, die für die einzelnen Auswertungen benötigt werden. Eine Datenbank wird für die Untersuchungen im Kapitel 5 benötigt, die anderen vier sind für die Analysen im Kapitel 6 erforderlich. Sie dienen als Basis für die Untersuchungen von:

- Kosten aufgrund betrieblicher Instandhaltung,
- Kosten aufgrund gesetzlicher Instandhaltung,

- Instandhaltungsbedarf und
- fahrgastwirksamen Ausfällen.

Um einen Überblick über den Umfang und die Struktur der Datenbanken zu bekommen, ist beispielhaft ein Ausschnitt aus der Datenbank für die Fristenuntersuchungen in Abbildung 4-4 dargestellt. Diese hat einen Umfang von 37 Spalten und 7896 Zeilen.

DTW	Serie	Profil	Antrieb	NW / DTW	Monat	NwKm	Frist	Mat	Loh	Sons	Ges
A1	S1	KP	GS	2	3	16.358	3	224,1	2.652,4	1.973,5	4.850,0
A1	S1	KP	GS	2	6	15.426	2	296,7	2.171,9	2.099,1	4.567,7
A1	S1	KP	GS	2	9	14.456	4	601,7	3.738,2	4.338,2	8.678,1
A1	S1	KP	GS	2	12	9.150	2	786,0	2.683,8	1.400,6	4.870,4
A1	S1	KP	GS	2	3	1.468	2	336,1	2.774,5	541,5	3.652,0
A2	S1	KP	GS	2	7	14.128	4	135,8	3.003,4	2.204,9	5.344,1
A2	S1	KP	GS	2	9	17.634	2	0,0	1.912,5	438,1	2.350,6
A2	S1	KP	GS	2	12	14.210	3	1.154,5	4.046,9	5.169,5	10.370,8
A3	S2	KP	GS	2	2	16.226	2	50,6	1.923,5	560,4	2.534,4
A3	S2	KP	GS	2	5	15.132	4	0,0	3.199,5	1.944,9	5.144,4
A3	S2	KP	GS	2	8	13.888	2	1.059,9	4.075,5	7.454,1	12.589,5
A3	S2	KP	GS	2	10	16.612	3	622,4	3.810,2	296,3	4.728,9
A4	S2	KP	GS	2	1	14.914	2	65,8	2.721,3	896,1	3.683,2
A4	S2	KP	GS	2	4	1.244	4	151,8	4.536,0	1.729,0	6.416,8
A4	S2	KP	GS	2	7	14.350	2	0,0	3.001,5	2.011,4	5.012,9
A4	S2	KP	GS	2	10	15.816	3	498,4	2.392,8	0,0	2.891,2
A5	S2	KP	GS	2	3	1.478	2	625,1	4.470,2	2.656,7	7.752,0
A5	S2	KP	GS	2	6	12.370	4	1.067,9	3.863,3	342,5	5.273,8
A5	S2	KP	GS	2	9	12.746	2	745,7	2.763,7	527,2	4.036,6
A5	S2	KP	GS	2	12	8.276	3	626,1	3.842,7	1.003,3	5.472,1
A6	S2	KP	GS	2	2	11.408	2	71,0	1.883,9	239,7	2.194,7
A6	S2	KP	GS	2	5	10.218	4	596,3	3.707,6	2.996,4	7.300,3
A6	S2	KP	GS	2	8	14.060	2	573,4	2.191,7	801,2	3.566,3
A6	S2	KP	GS	2	11	12.458	3	1.020,1	5.197,4	5.981,3	12.198,8

Abbildung 4-4: Ausschnitt aus der Datenbank für die Fristenuntersuchung

5 Kostenstruktur langfristig betriebener U-Bahnfahrzeuge

Heutzutage werden U-Bahnfahrzeuge teilweise mehr als 35 Jahre für den Transport von Fahrgästen eingesetzt. Dabei erreichen sie jährlich eine Kilometerleistung von über 110.000 km. Damit entstehen hohe Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung der Fahrzeuge. Neben der jährlichen Laufleistung haben gesetzliche Vorschriften, wie die Betriebsordnung Straßenbahn (BOStrab), die Fahrzeugkonstruktion und der verstärkte Vandalismus einen besonderen Einfluss auf die Fahrzeuginstandhaltung und die damit verbundenen Kosten. Die Instandhaltung wird aufgrund ihrer vielfältigen Einflüsse auf die entstehenden Kosten zu einer variablen Größe im Lebenszyklus eines Fahrzeugs.

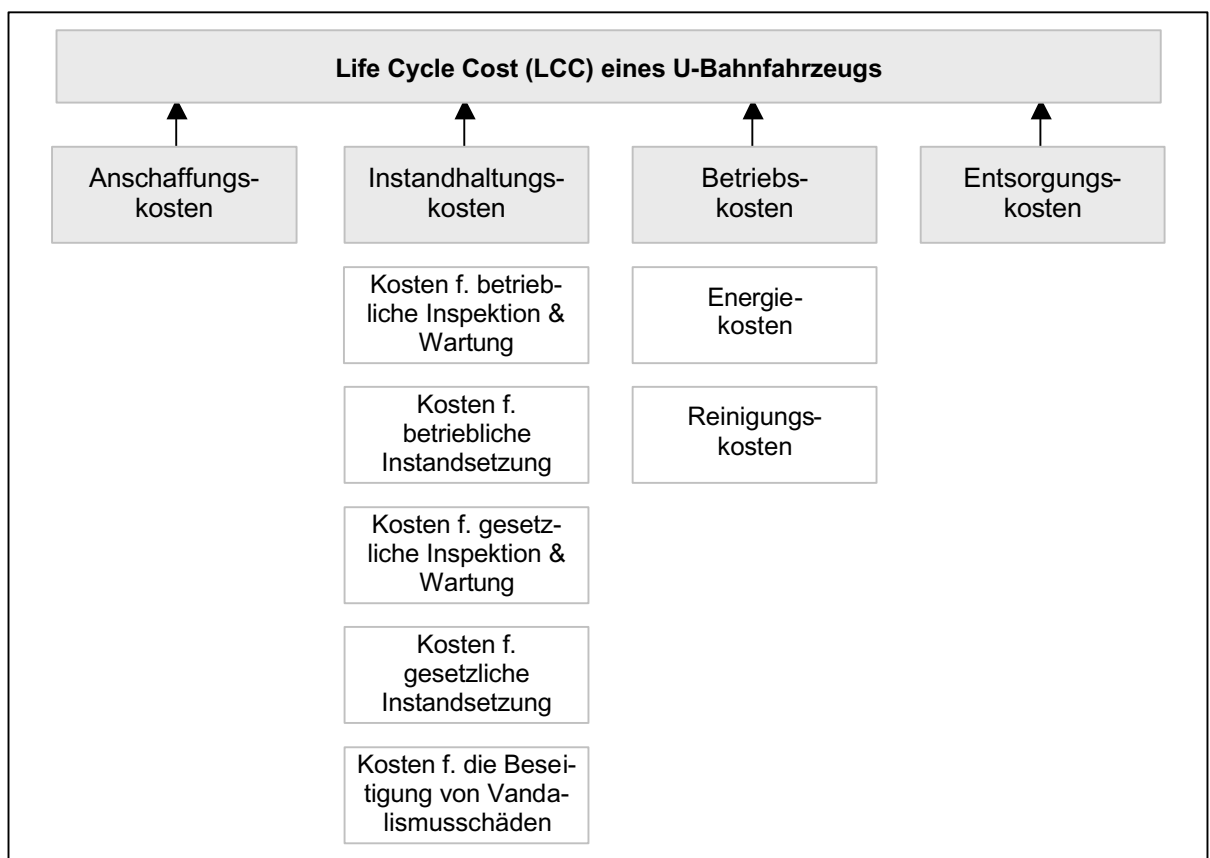


Abbildung 5-1: Lebenszykluskosten von U-Bahnfahrzeugen

Die Summe von Anschaffungskosten, Instandhaltungskosten, Betriebs- und Entsorgungskosten wird als Lebenszykluskosten bezeichnet. Abbildung 5-1 zeigt die Elemente der Lebenszykluskosten aus Sicht des Verkehrsunternehmens. Die Kosten Betriebsmittel sind hier in den Kosten für die Wartung enthalten.

Für ein Verkehrsunternehmen ist die langfristige Entwicklung der Lebenszykluskosten von großer Wichtigkeit, da die Kostenentwicklung maßgeblichen Einfluss auf das Geschäftsergebnis des Verkehrsunternehmens hat. Insbesondere die Instandhaltungskosten stellen eine über das gesamte Leben eines U-Bahnfahrzeugs ungenau

vorhersagbare Größe dar. Im Gegensatz dazu sind die Anschaffungskosten fix, und die Betriebskosten sowie die Kosten für die Entsorgung in weitem Maße planbar. Die Entscheidung über die Lebensdauer eines Fahrzeugs oder einer Fahrzeugserie, ist größtenteils auf deren Wirtschaftlichkeit zurückzuführen. Diese wird wiederum stark durch die Instandhaltung beeinflusst. Für eine langfristige Planung eines Fuhrparks und für eine Entscheidungsfindung über die Lebensdauer eines Fahrzeugs ist somit die Kostenentwicklung und daraus abgeleitet eine Kostenprognose für die weiteren Betriebsjahre notwendig. Weiterhin können die Philosophie des Verkehrsunternehmens oder kundenpolitische Parameter entscheidend für die Lebensdauer eines Fahrzeugs sein.

In diesem Kapitel wird die Kostenentwicklung für 55 Doppeltriebwagen der Fahrzeugserien S16/S17 (vgl. Kapitel 6) von 1992 bis 2004 dargestellt und analysiert. Ziel ist es, die Doppeltriebwagen in ihrer Kostenentwicklung gegenüberzustellen und daraus eine Kostenprognose sowie eine wirtschaftlich optimale Lebensdauer abzuleiten. Weiterhin wird untersucht, ob eine Abhängigkeit zwischen gefahrenen Kilometern und entstandenen Kosten besteht und welcher Kostenblock nach Abbildung 5-1 den größten Einfluss auf die langfristige Kostenentwicklung hat.

Die Untersuchung basiert auf realen Daten der Berliner Verkehrsbetriebe. Die fahrzeugspezifischen Informationen entstammen einer eigens erstellten Datenbank (vgl. Kapitel 4). Die Untersuchungsstruktur orientiert sich an der Gliederung der Lebenszykluskosten in Abbildung 5-1. Dazu wurden die einzelnen Instandhaltungsleistungsarten wie folgt zu den verschiedenen Kostenblöcken zusammengefasst bzw. diese direkt übernommen:

- Betriebliche Inspektion & Wartung,
- Betriebliche Instandsetzung: Instandsetzung Schadwagen, Instandsetzung infolge betrieblicher Inspektion & Wartung, Instandsetzung zustandsorientiert, Baugruppenwechsel, Radprofilkorrektur, Fehlersuche, Diagnose & Prüfung,
- Gesetzliche Inspektion & Wartung,
- Gesetzliche Instandsetzung: Instandsetzung infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung,
- Vandalismus: allg. Vandalismus, Graffitiabeseitigung, Verkleidungsschaden (infolge Vandalismus), Glasschaden (infolge Vandalismus), Polsterschaden (infolge Vandalismus) und
- Reinigung.

Für eine durchgängige und objektive Vergleichbarkeit zwischen den Kosten der verschiedenen Fahrzeuge in den einzelnen Jahren, wurden die Kostenwerte unter Einbeziehung der Inflationsrate, bezogen auf das Jahr 2004, umgerechnet. Die jeweili-

gen Inflationsraten sind Abbildung 10-4 im Anhang zu entnehmen. Die dort angegebenen Werte stammen aus Angaben des statistischen Bundesamtes /STA-05/.

Die Analyse ist nach Anschaffung, Betrieb und Instandhaltung gegliedert. Innerhalb der einzelnen Abschnitte werden die Kosten in eine tiefere Gliederungsebene aufgeschlüsselt und als Durchschnittswerte sowie für 15 ausgewählte Fahrzeuge einzeln abgebildet. Die Auswahl der Fahrzeuge erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Abschließend werden die kumulierten Lebenszykluskosten für die ausgewählten Fahrzeuge dargestellt und diskutiert. Im Rahmen der Analyse müssen die Kostenunterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen kritisch betrachtet werden, da Unterschiede in der jährlichen Kilometerleistung der Fahrzeuge bestehen. Die reduzierte Kilometerleistung im Jahr 1992 ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge zeitlich über das Jahr verteilt angeschafft wurden. Im Jahr nach der Inbetriebnahme wurden die Fahrzeuge umfangreichen technischen Untersuchungen unterzogen und erreichten daher noch nicht die Kilometerleistung wie im normalen Betrieb.

Wo notwendig und hilfreich für Vergleiche werden Kosten auf die Fahrleistung bezogen angegeben. Durchschnittlich wurden die Abbildung 5-2 zu entnehmenden Kilometerleistungen erzielt.

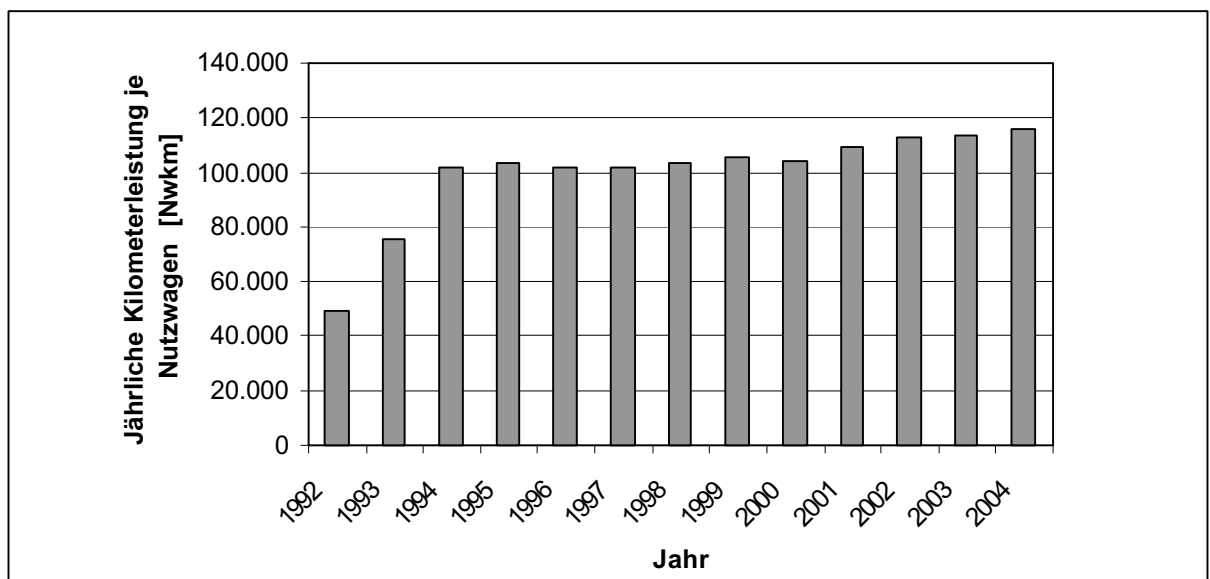


Abbildung 5-2: Durchschnittliche Kilometerleistungen je Nutzwagen pro Jahr

5.1 Anschaffungskosten

Für Verkehrsunternehmen stellt die Anschaffung von U-Bahnfahrzeugen eine bedeutende Entscheidung für die Wirtschaftlichkeit ihres Systems dar. Diese Bedeutung liegt vor allem in der langfristigen Bindung von Kapital und in den mit der Nutzung der Fahrzeuge auftretenden Kosten für Betrieb und Instandhaltung. Durch die langfristige Nutzung der Fahrzeuge, spielen daher im Lebenszyklus eines Fahrzeugs die

Energiekosten und die Zuverlässigkeit sowie die Instandhaltbarkeit der Fahrzeuge aber auch das Ersatzteilwesen und damit verbundene Kosten eine wichtige Rolle.

Dem Fahrzeughersteller wird ein entscheidender Einfluss auf die langfristige Kostenentwicklung für den Betrieb und die Instandhaltung zugesprochen. Die von ihm realisierte Fahrzeugkonstruktion und die eingesetzten Bauteile übernehmen eine Schlüsselfunktion im Leben eines U-Bahnfahrzeugs, da sie entscheidend für einen großen Anteil der Betriebs- und Instandhaltungskosten sind. Für den Fahrzeughersteller entwickelt sich ein Interessenkonflikt zwischen einem möglichst attraktiven Angebot an die Verkehrsunternehmen und den mit Entwicklung, Konstruktion und Fertigung verbundenen Kosten. Das Interesse der Fahrzeughersteller liegt vornehmlich in der Gewinnmaximierung. Eine instandhaltungsgerechte Gestaltung der Fahrzeuge bei gleichzeitigem Einsatz bewährter und zuverlässiger Konstruktionselemente und Baugruppen, rückt dadurch in den Hintergrund. Diese unternehmenspolitische Ausrichtung der Hersteller kann für die Verkehrsunternehmen zu unerwartet hohen Kosten insbesondere in der Instandhaltung führen. Häufig sind diese Kosten bei der Anschaffung der Fahrzeuge nur ungenau abschätzbar.

Den Verkehrsunternehmen bietet sich die Möglichkeit in gewissem Rahmen auf die Fahrzeugkonstruktion Einfluss zu nehmen. Diese Option ergibt sich vornehmlich aus der Erstellung eines Pflichtenheftes in Zusammenarbeit mit dem Fahrzeughersteller. Damit können Leistungs- und Qualitätsmerkmale der Fahrzeuge eindeutig definiert werden. Im Interesse der Verkehrsunternehmen muss es daher liegen, das Pflichtenheft so detailliert wie möglich zu gestalten und dort die Umsetzung eigener Forderungen in Absprache mit dem Fahrzeughersteller schriftlich festzuhalten. Die Gestaltung des Pflichtenheftes wird somit zu einem wichtigen Instrument, das entscheidenden Einfluss auf die konstruktive Gestaltung des Fahrzeugs und damit auf die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge sowie die Betriebs- und Instandhaltungskosten haben kann. Versäumnisse des Verkehrsunternehmens, die in dieser Phase gemacht werden, können schwerwiegende Folgen für den Lebenszyklus der Fahrzeuge und damit für den durch die Anschaffung von Neufahrzeugen angestrebten wirtschaftlichen Erfolg haben.

Um die mit der Neuanschaffung verbundenen Risiken zu reduzieren und die Fahrzeughersteller vor allem für Instandsetzungsarbeiten in die Verantwortung zu ziehen, versuchen Verkehrsunternehmen mit den Herstellern Verträge abzuschließen, die in gewissem Rahmen z. B. die Zuverlässigkeit und die Instandsetzungskosten nach der ersten Inbetriebnahme für einen festgelegten Zeitraum definieren. Ziel dieser Verträge ist es, den Hersteller mehr in die Verantwortung für Mängel infolge konstruktiver Fehlgestaltungen zu ziehen und damit zu entsprechender Sorgfalt im Konstruktionsprozess zu zwingen.

Die Forderungen der Verkehrsunternehmen können sich andererseits nachteilig auf die Anschaffungskosten auswirken, wenn beispielsweise besondere Anforderungen an die Konstruktion oder an die Zuverlässigkeit gestellt werden und so der Hersteller spezielle Baugruppen oder Werkstoffe einsetzen muss. Langfristig kann diese Entscheidung jedoch zu einer kostenreduzierten Instandhaltung im Vergleich zum „Standardfahrzeug“ führen.

Die in diesem Kapitel durchgeführte Analyse der Lebenszykluskostenentwicklung von U-Bahnfahrzeugen, wird an Fahrzeugen aus nur einer Fahrzeugserie durchgeführt. Die Anschaffungskosten sind daher für alle Fahrzeuge gleich. Sie werden als Basis für die weiteren Auswertungen verwendet und als 100% festgelegt. Die Lebenszykluskosten übersteigen dadurch mit dem ersten Fahrkilometer die 100%-Marke. Damit stehen die anfallenden Kosten für Betrieb und Instandhaltung im direkten Vergleich zu den Anschaffungskosten.

5.2 Betriebskosten

Als Betriebskosten werden die Kosten für den Fahrstrom, also die Energiekosten, und die Kosten für die reguläre Reinigung der Fahrzeuge betrachtet. Die Kosten spiegeln wider, wie groß der Aufwand für den Fahrzeugbetrieb ohne Berücksichtigung der Instandhaltungstätigkeiten ist.

5.2.1 Energie

U-Bahnfahrzeuge speisen ihren Fahrstrom direkt über Stromabnehmer von der Stromschiene. Dazu streicht, bei der hier untersuchten Fahrzeugserie, der Stromabnehmer von unten an der Stromschiene entlang.

Der Energieverbrauch wird größtenteils durch den Antriebsmotor, das Streckenprofil und die zu bewegende Masse inklusive Fahrgästen beeinflusst. Bei der untersuchten Fahrzeugserie wird der Bremsstrom genutzt und direkt wieder in das Stromnetz zurückgespeist. Die Berücksichtigung von Streckenprofil und Fahrgastanzahl in einer Analyse der Energiekosten im Rahmen einer Lebenszykluskostenbetrachtung steht in keinem Verhältnis zum damit verbundenen Aufwand. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich die Fahrten in Steigungen und Gefällen, sowie die volle Zuladung und Leerfahrten über einen langen Betrachtungszeitraum gegenseitig aufheben. Aus diesen Gründen wird ein statistisch bestimmter Mittelwert für die Angabe des Stromverbrauchs verwendet. Die Datenbasis dafür lieferten Versuche der Berliner Verkehrsbetriebe. Danach hat ein Doppeltriebwagen der hier zu untersuchenden Fahrzeugserie einen durchschnittlichen Stromverbrauch von 3,11 kWh/Nwkm. Die Rückspeisung ins Stromnetz während des Bremsvorganges ist dabei bereits berücksichtigt. Sie reduziert den Gesamtenergieverbrauch um ca. 25%.

Zur Bestimmung der mit dem Stromverbrauch einhergehenden Energiekosten, werden für jedes Jahr im Untersuchungszeitraum einzeln die durchschnittlichen Strompreise in die Analyse einbezogen. Im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse wird der jährliche Energieverbrauch zur Erbringung der Transportleistung anhand der gefahrenen Nutzwagenkilometer bestimmt und entsprechend mit den jeweils aktuellen Strompreisen zu den Energiekosten pro Jahr verrechnet.

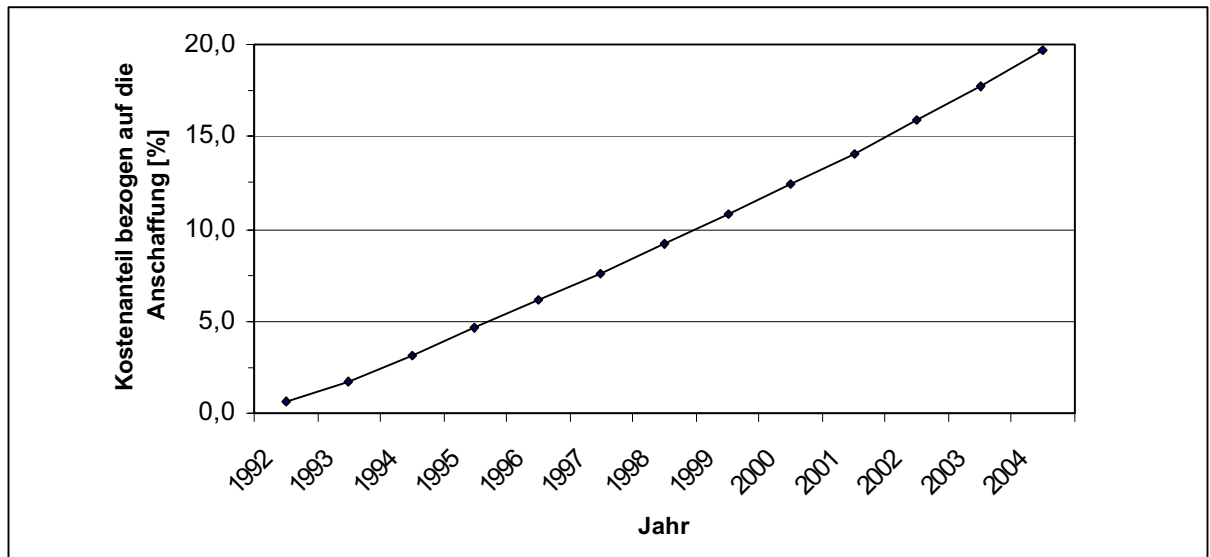


Abbildung 5-3: Durchschnittliche kumulierte Energiekosten für den Fahrbetrieb im Zeitraum 1992 bis 2004

Abbildung 5-3 zeigt die durchschnittlichen kumulierten Energiekosten für den Fahrbetrieb über dem bisherigen Lebenszyklus der Fahrzeuge. Dazu wurden die Mittelwerte der jährlichen Energiekosten aller untersuchten Fahrzeuge als kumulierte Kosten berechnet und aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Energiekosten einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Sie verursachten in 13 Jahren Betriebsdauer Kosten in Höhe von 19,6 % der Anschaffungskosten. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge wird so zu einem wichtigen Faktor in der Lebenszykluskostenentwicklung.

Zu beachten ist, dass die Fahrzeuge unterschiedliche Kilometerleistungen pro Jahr erbracht haben. Die Kosten entwickeln sich proportional zur Kilometerleistung.

5.2.2 Reinigung

Die Reinigung der Fahrzeuge wird hauptsächlich für die Zufriedenheit der Fahrgäste sowie für die langfristige Erhaltung der Fahrzeuge durchgeführt. Sie unterliegt ebenso wie die betriebliche Inspektion & Wartung definierten Fristen, deren Intervalle an feste km-Leistungen gebunden sind. Ebenso sind die Arbeitsinhalte für die verschie-

denen Reinigungsstufen festgelegt. Beispielhaft sind die Reinigungsintervalle und die Inhalte für die Fahrzeugserien S16/S17 im Anhang (Abbildung 10-2) dargestellt.

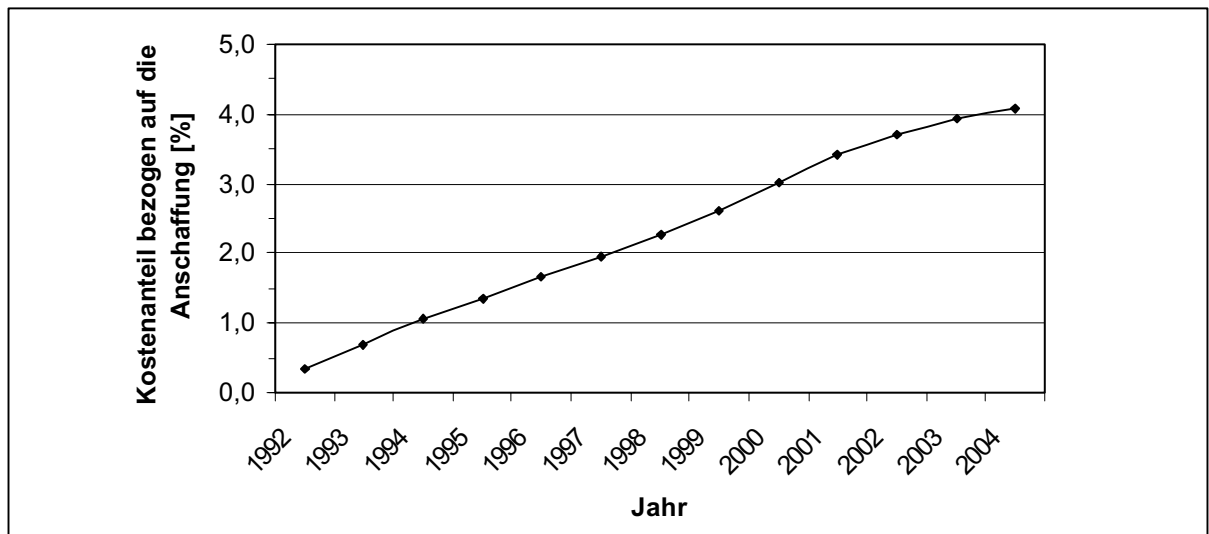


Abbildung 5-4: Durchschnittliche kumulierte Reinigungskosten im Zeitraum 1992 bis 2004

Die betrachteten Reinigungskosten enthalten keine Kosten zur Beseitigung von Verschmutzungen durch Vandalismus, wie z. B. Graffiti. Sie wurden für jeden Doppeltriebwagen der betrachteten Fahrzeugserie einzeln bestimmt.

In Abbildung 5-4 sind die durchschnittlichen Reinigungskosten pro Doppeltriebwagen in kumulierter Darstellung aufgezeigt. Insgesamt weisen diese einen nahezu konstant steigenden Verlauf auf. Dementsprechend sind im Betrachtungszeitraum durchschnittlich annähernd gleiche Kosten pro Jahr für die Reinigung angefallen. Daraus resultiert, dass nach 13 Jahren Fahrbetrieb die Summe der Reinigungskosten durchschnittlich 4,1 % der Anschaffungskosten ausmacht.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Reinigungskosten für einzelne Doppeltriebwagen werden jedoch Unterschiede in der jährlichen Steigerung der Kosten für die verschiedenen Fahrzeuge festgestellt (vgl. Abbildung 5-5). Bis zum Jahr 2004 werden für die ausgewählten Fahrzeuge im Maximum 4,6 % der Anschaffungskosten in die Reinigung investiert. Das Minimum liegt bei 3,4 %. Insgesamt ist seit dem Jahr 2000 ein leichter Rückgang der jährlichen Reinigungskosten zu erkennen. Unter Einbeziehung der Kostenentwicklung für die Reinigung seit dem Jahr 2000, würden, unter Annahme gleicher Reinigungskosten bis zum Jahr 2004 und ausgehend von einer 35-jährigen Gesamtlebensdauer der Fahrzeuge, die Reinigungskosten am Ende des Produktlebenszyklus zwischen 8,5 % und 10,9 % der Anschaffungskosten betragen. Bei einem Anschaffungspreis von 2,4 Mio. € je Doppeltriebwagen würden im ungünstigeren Fall in Summe ca. 262.000 € nur für die Reinigung ausgegeben werden.

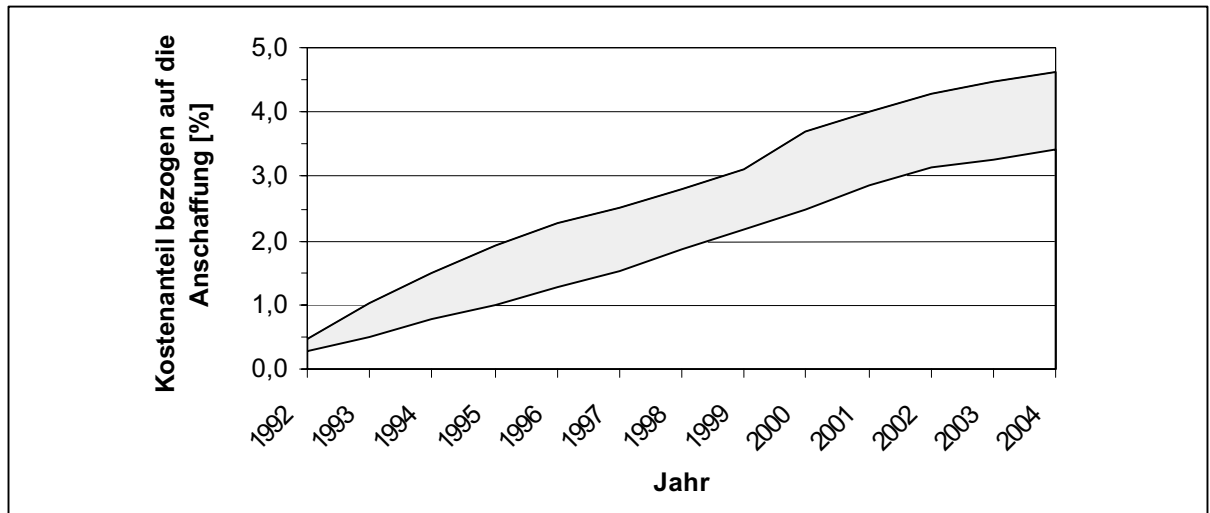


Abbildung 5-5: Kumulierte Reinigungskosten ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004

5.3 Instandhaltungskosten

Die Kosten für die Instandhaltung der Fahrzeuge werden in die Kosten für die betriebliche und für die gesetzliche Instandhaltung sowie für den Vandalismus unterteilt und entsprechend dieser Gliederung analysiert. Zusätzlich erfolgt für betriebliche und gesetzliche Instandhaltung eine Trennung von Inspektion & Wartung und Instandsetzung.

1997 wurde im Bereich U-Bahnfahrzeuge der BVG die Umstellung des ERP-Systems von SAP/R2 auf SAP/R3 sowie die Einführung neuer Instandhaltungsleistungsarten durchgeführt. Im Jahr 2000 erfolgte für die verbesserte Gliederung der Tätigkeiten im Rahmen der Instandhaltung eine Überarbeitung und Anpassung des bestehenden Katalogs der Instandhaltungsleistungsarten. Leichte Verschiebungen der Kosten innerhalb dieser Jahre sind auf die aus den Veränderungen resultierenden Buchungsgenauigkeiten zurückzuführen.

5.3.1 Betriebliche Inspektion & Wartung

Die betriebliche Inspektion & Wartung erfolgt laufleistungsabhängig. In wiederkehrenden km-Abständen werden dazu die Fahrzeuge fest definierten Inspektions- und Wartungsarbeiten unterzogen. Beispielhaft sind diese Intervalle und die Inhalte für die Fahrzeugserien S16/S17 in Abbildung 10-2 dargestellt.

Die Inhalte und die Intervalle selbst beruhen auf BVG-internen Erfahrungswerten, die teilweise in Anlehnung an Vorgaben des Fahrzeugherstellers festgelegt wurden. Die Inspektionsinhalte haben sich im Laufe der Jahre nur geringfügig verändert, sodass die Analyse ohne eine Harmonisierung der Daten durchgeführt werden konnte. Die

jährlichen Kosten für Inspektion & Wartung sind damit innerhalb der Fahrzeugserie, aber auch über die einzelnen Jahre vergleichbar, wenn man von nahezu konstanten Personalkosten ausgeht.

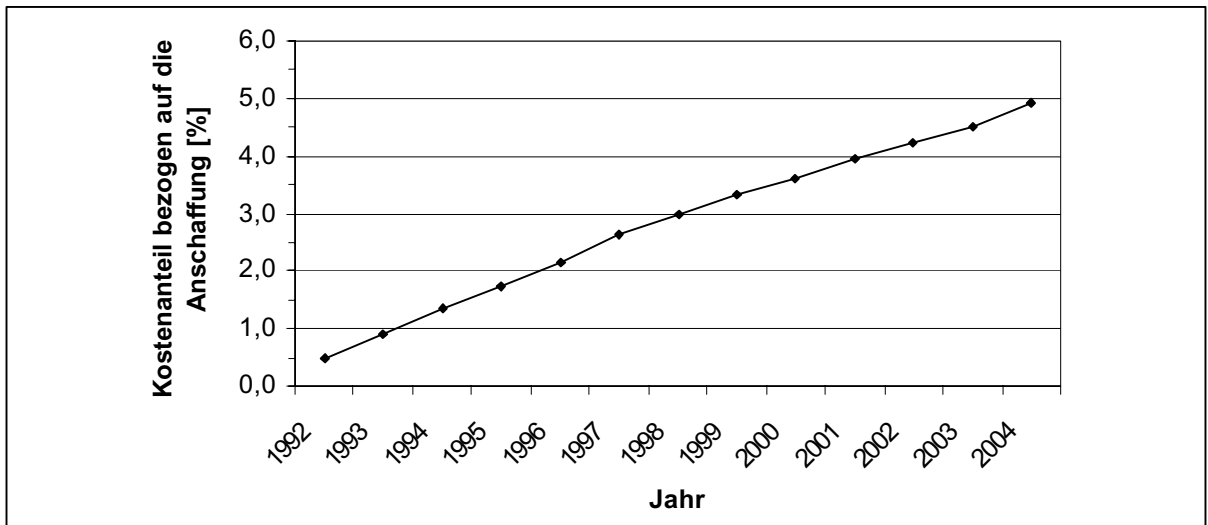


Abbildung 5-6: Durchschnittliche kumulierte Kosten für betriebliche Inspektion & Wartung im Zeitraum 1992 bis 2004

Die durchschnittlichen kumulierten Kosten für Inspektion & Wartung, die Abbildung 5-6 zeigt, steigen über den gesamten Analysezeitraum nahezu konstant. In der Einführungsphase 1992, in der die km-Leistung der Fahrzeuge deutlich niedriger liegt, als in den Folgejahren, verursachen Inspektion & Wartung widererwartend jährlich Kosten in Höhe von ca. 0,5 % der Anschaffungskosten und steigen bis 1997 relativ konstant. Ab 1998 zeichnet sich eine Reduzierung der jährlichen Kosten bis zum Jahr 2003 ab. Für das Jahr 2004 stieg der Durchschnittswert wieder an. Auf den gesamten Betrachtungszeitraum bezogen, werden im Durchschnitt jährlich für die Inspektion & Wartung eines U-Bahnfahrzeugs 0,38 % seiner Anschaffungskosten investiert.

Eine etwas differenziertere Sichtweise auf die Kostenentwicklung für Inspektion & Wartung erfolgt in Abbildung 5-7. Hier wird deutlich, dass im gesamten Zeitraum große Kostenunterschiede zwischen den Fahrzeugen bestehen, die bereits im Jahr der Inbetriebnahme um maximal plus 30 % und minus 40 % des Mittelwertes aller Fahrzeuge schwanken. Ausgenommen davon ist ein Doppeltriebwagen, der statistisch als Ausreißer betrachtet wird. Er weist mit 0,81 % der Anschaffungskosten 1992 mehr als 170 % und 2004 immer noch 116 % der Kosten des Mittelwertes auf. Insgesamt wird hier trotz der Kostenunterschiede zwischen den Fahrzeugen langfristig eine annähernd gleiche Kostenentwicklung festgestellt.

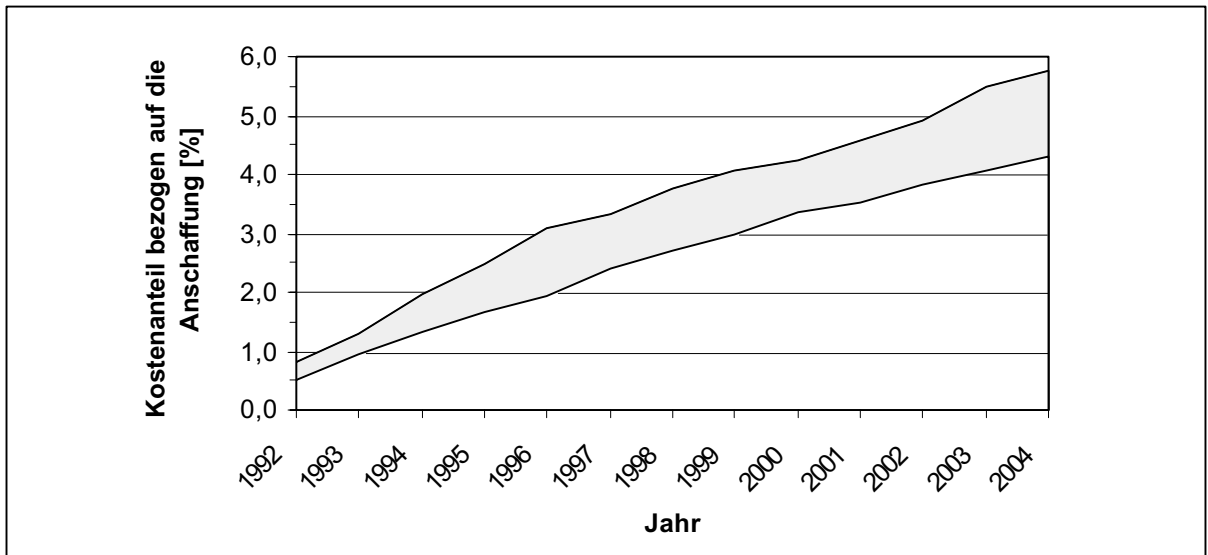


Abbildung 5-7: Kumulierte Kosten für betriebliche Inspektion & Wartung ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004

Unter Einbeziehung der jeweiligen Nutzwagenkilometerleistung relativieren sich die Kostenunterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen (vgl. Abbildung 5-8; jeder Datenpunkt markiert den Kostenanteil eines der 15 ausgewählten Fahrzeuge, d. h. für jedes Jahr sind jeweils 15 Datenpunkte aufgetragen). Danach sind die Kosten für die betriebliche Inspektion & Wartung bezogen auf die jährliche Kilometerleistung direkt nach der Inbetriebnahme der Fahrzeuge im bisherigen Lebenszyklus am Größten und sinken annähernd kontinuierlich bis zum Jahr 2004.

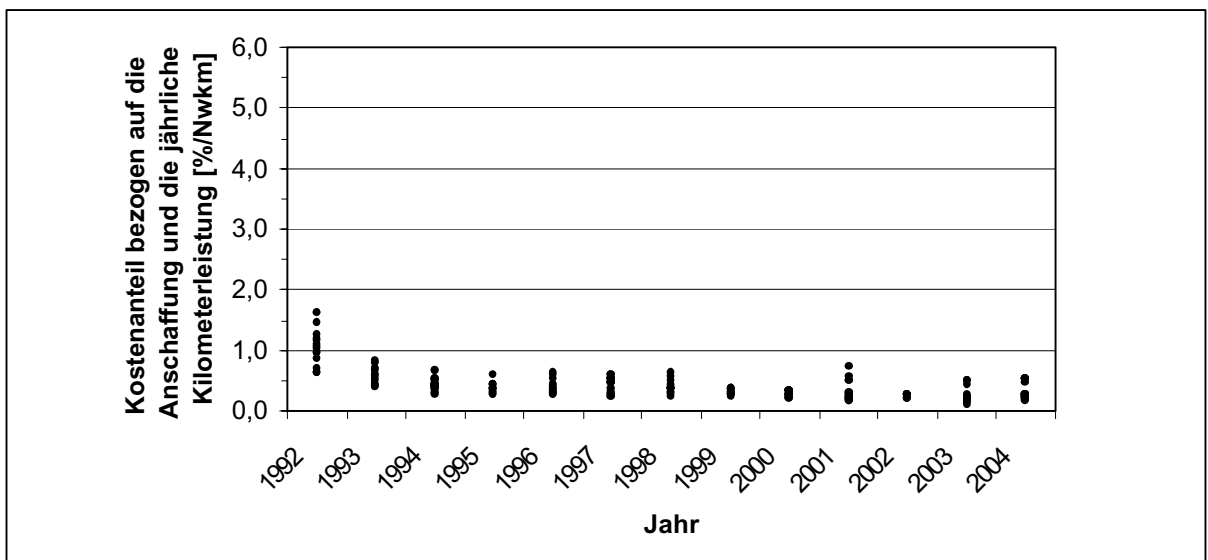


Abbildung 5-8: Kostenanteil der betrieblichen Inspektion & Wartung an den Anschaffungskosten unter Berücksichtigung der jährlichen Nutzwagenkilometerleistung

Die kilometerbezogenen Kostenunterschiede zwischen den Fahrzeugen sind 1992 deutlich größer als im Jahr 2004. Im Jahr der Anschaffung schwanken die Werte

zwischen 0,6 und 1,6 Prozent der Anschaffungskosten bezogen auf eine jährliche Kilometerleistung von 100.000 Nwkm. Am Ende des Betrachtungszeitraums liegen der Maximalwert bei 0,5 und das Minimum bei 0,2.

5.3.2 Betriebliche Instandsetzung

Der Verbrauch des Abnutzungsvorrates eines Bauteils oder sogar ein Bauteilausfall werden bei der betrieblichen und gesetzlichen Inspektion & Wartung oder während des Betriebes festgestellt. Damit verbunden sind Instandsetzungstätigkeiten, um die Fahrzeuge wieder in einen betriebsgerechten Zustand zu überführen.

Dieser Abschnitt befasst sich ausschließlich mit der betrieblichen Instandsetzung, die infolge betrieblicher Inspektion & Wartung oder aufgrund eines Bauteilausfalls während des Betriebes notwendig wird.

Die durchschnittlichen Kosten für die betriebliche Instandsetzung aller untersuchten Fahrzeuge sind pro Jahr weniger konstant, als die Kosten für die betriebliche Inspektion & Wartung (vgl. Abbildung 5-9). Im Mittel fallen jährlich Kosten für die betriebliche Instandsetzung in Höhe von 0,52 % der Anschaffungskosten an. Bezogen auf den Untersuchungszeitraum, schwanken die jährlichen Instandsetzungskosten zwischen 0,75 % der Anschaffungskosten im Jahr 1992 und 0,3 % der Anschaffungskosten im Jahr 2003. Die kumulierten Durchschnittskosten für die betriebliche Instandsetzung betragen 13 Jahre nach der Inbetriebnahme ca. 7 % der Anschaffungskosten.

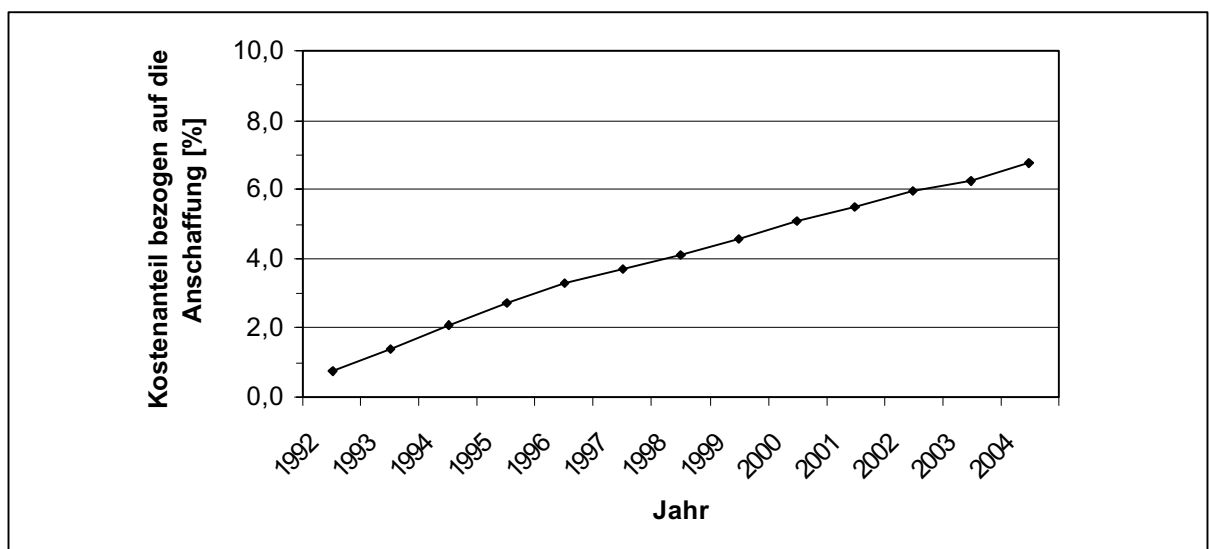


Abbildung 5-9: Durchschnittliche kumulierte Kosten für betriebliche Instandsetzung im Zeitraum 1992 bis 2004

In der betrieblichen Instandsetzung entstehen deutlich höhere Kosten, als in der betrieblichen Inspektion & Wartung. Der betrieblichen Instandsetzung ist also ein größerer Stellenwert in Bezug auf die langfristige Kostenentwicklung für das gesamte Instandhaltungssystem zuzuschreiben, als der betrieblichen Inspektion & Wartung.

Eine mögliche Kostenprognose für die Instandsetzung stützt sich auf Erfahrungswerte und nicht wie bei Inspektion & Wartung auf definierte Vorgaben. Die Prognose ist daher mit einer gewissen Unsicherheit verbunden, die sich auch in den Schwankungen der jährlichen Kostenwerte nach Abbildung 5-10 widerspiegelt.

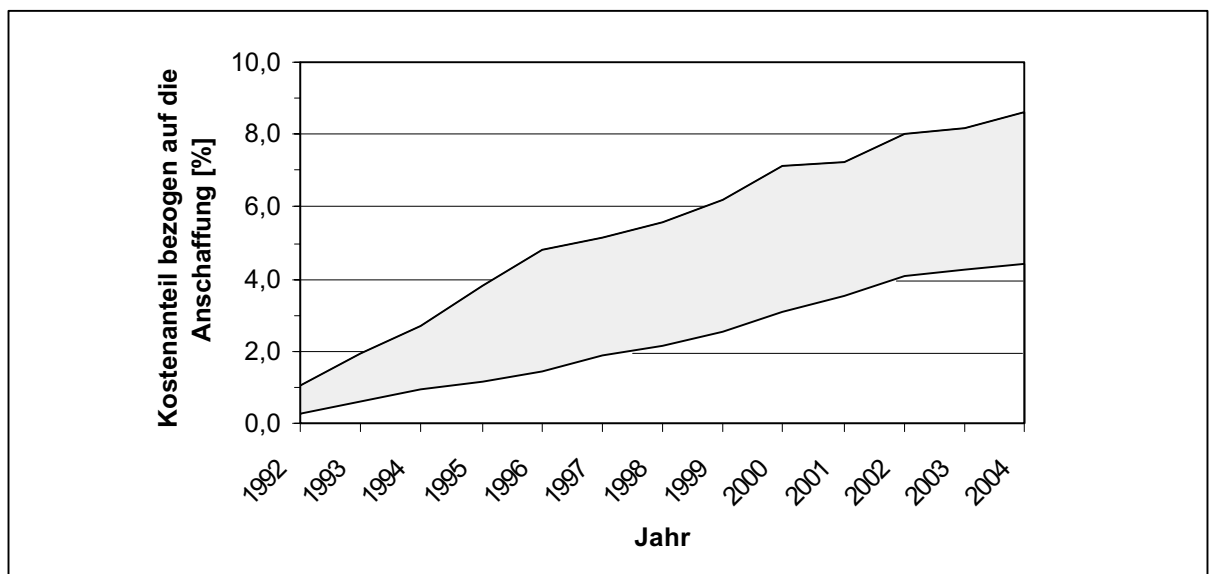


Abbildung 5-10: Kumulierte Kosten für betriebliche Instandsetzung ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004

Abgesehen von einigen Ausnahmen zeigt sich nach Abbildung 5-10 die Tendenz, dass bei Fahrzeugen mit einem hohen Instandsetzungsaufwand bereits im Jahr der Inbetriebnahme, die kumulierten Instandsetzungskosten im Verlauf des Lebenszyklus auch entsprechend mehr steigen. 1992 lag das Maximum der betrieblichen Instandsetzungskosten bei 1,1 % der Anschaffungskosten und das Minimum bei 0,3 %. Vergleicht man die kumulierten Instandsetzungskosten für dieselben Fahrzeuge, ist deren Differenz von 0,8 % in Jahr 1992 auf 4,2 % im Jahr 2004 angestiegen. Das entspricht einem jährlichen Kostenunterschied für die Instandsetzung von ca. 0,3 % der Anschaffungskosten. Nach 13 Jahren Betrieb wurden in die ausgewählten Fahrzeuge in Summe Kosten in Höhe von maximal 8,6 % und minimal 4,4 % der Anschaffungskosten in die betriebliche Instandsetzung investiert.

Bezieht man die jährlichen Kosten für die betriebliche Instandsetzung auf die jeweilige Kilometerleistung im selben Zeitraum, ist hier ebenso wie bei der betrieblichen Inspektion & Wartung in den ersten 6 Jahren durchschnittlich eine Reduzierung der Kosten pro Jahr seit der Inbetriebnahme zu verzeichnen (vgl. Abbildung 5-11). Inner-

halb einer Jahresscheibe treten hier fahrleistungsbezogene Kostenunterschiede von bis zu 1,7 % der Anschaffungskosten bezogen auf 100.000 Nwkm auf. Im Jahr 2003 liegt diese Differenz bei nur 0,24 %.

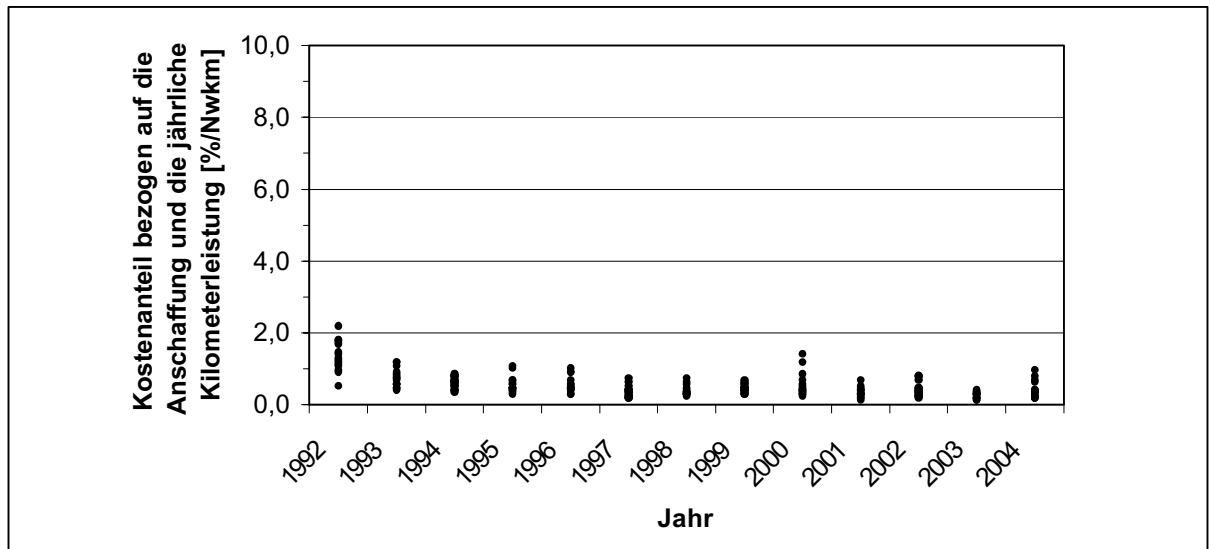


Abbildung 5-11: Kostenanteil der betrieblichen Instandsetzung pro Jahr an den Anschaffungskosten unter Berücksichtigung der jährlichen Nutzwagenkilometerleistung

5.3.3 Gesetzliche Inspektion & Wartung

Die gesetzliche Inspektion & Wartung wird laufeleistungsabhängig in festen Intervallen mit definierten Inhalten insbesondere zur Gewährleistung eines sicheren Fahrbetriebs durchgeführt. Innerhalb des Betrachtungszeitraums wurden an 15 verschiedenen Doppeltriebwagen der hier untersuchten Fahrzeugserie Inspektions- und Wartungstätigkeiten nach BOStrab durchgeführt.

Verglichen mit den Inhalten von Inspektion & Wartung der betrieblichen Instandhaltung werden die Fahrzeuge weitaus intensiver inspiziert und gewartet. Damit verbunden ist ein dementsprechend höherer Kostenaufwand für die gesetzlich vorgeschriebenen Tätigkeiten, der insbesondere auf Lohnkosten beruht. Der Mittelwert für eine gesetzliche Inspektion & Wartung liegt bei 2,8 % der Anschaffungskosten. Das entspricht in etwa den Kosten, die in 6 ½ Jahren für betriebliche Inspektionen und Wartungsarbeiten je Fahrzeug ausgegeben werden. Die gesetzliche Inspektion & Wartung stellt damit in Bezug auf die Entwicklung der Lebenszykluskosten eine bedeutende Größe dar. Je nach Freigabe der Technischen Aufsichtsbehörde (TAB) werden bei einer Fahrzeuglebensdauer von 35 Jahren ca. 4 bis 6 der gesetzlich vorgeschriebenen Instandhaltungspakete notwendig.

Beim Fahrzeug 3 fallen mit 3,4 % der Anschaffungskosten die größten Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung an. Im Gegensatz dazu sind es beim Fahrzeug 11 nur 2,4 %.

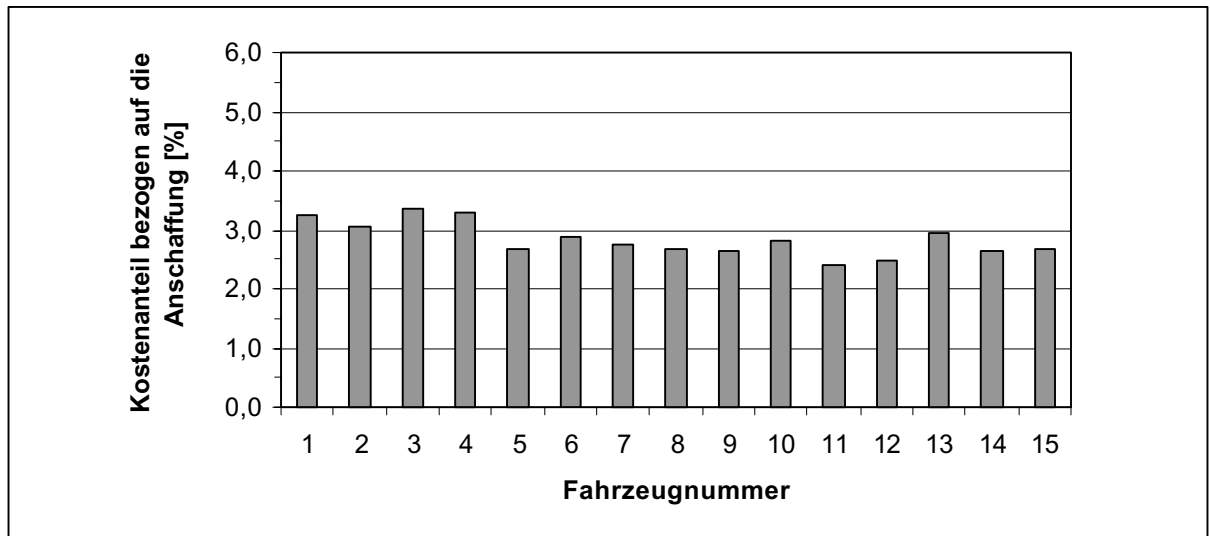


Abbildung 5-12: Kosten für eine gesetzliche Inspektion & Wartung je Fahrzeug

5.3.4 Gesetzliche Instandsetzung

Noch kostenintensiver als die gesetzliche Inspektion & Wartung zeigen sich die Instandsetzungstätigkeiten, die infolge der gesetzlichen Voruntersuchungen durchgeführt werden müssen. Sie sind erforderlich, um die Fahrzeuge wieder in einen funktionsfähigen und sicheren Zustand zu überführen. Dabei werden hier auch Instandsetzungstätigkeiten durchgeführt, die nicht zwingend nach BOStrab erforderlich sind, da sie aufgrund des Verbrauchs eines Abnutzungsvorrates oder aufgrund eines Bauteilausfalls notwendig sind und nicht bis zur nächsten betrieblichen Inspektion aufgeschoben werden können.

Im Durchschnitt treten infolge der gesetzlichen Inspektion & Wartung Kosten für Instandsetzungstätigkeiten in Höhe von 3,8 % der Anschaffungskosten auf (vgl. Abbildung 5-13). Diese Angabe basiert auf Auswertungen die analog zum vorangegangenen Abschnitt mit denselben 15 Fahrzeugen durchgeführt wurden.

Vergleicht man die Kosten für gesetzliche Inspektion & Wartung mit denen der dazugehörigen Instandsetzungstätigkeiten, zeigt sich, dass drei der hier untersuchten Fahrzeuge etwas höhere Kosten für die Vorarbeiten aufweisen, als für die Instandsetzung. Bei den anderen zwölf Fahrzeugen sind die Kosten für die Folgearbeiten i. d. R. deutlich größer als die Kosten für Inspektion & Wartung. Bei den Fahrzeugen 14 und 15 ist dieser Kostenunterschied mit 1,75-fachen Kosten für die Instandsetzung im Vergleich zu Inspektion & Wartung am Größten.

Die Instandsetzungskosten infolge Inspektion & Wartung nach BOStrab weisen bezogen auf die einzelnen Fahrzeuge Unterschiede von 1,7 % der Anschaffungskosten auf. Der Maximalwert liegt bei 4,7 % und der Minimalwert bei 3,0 %.

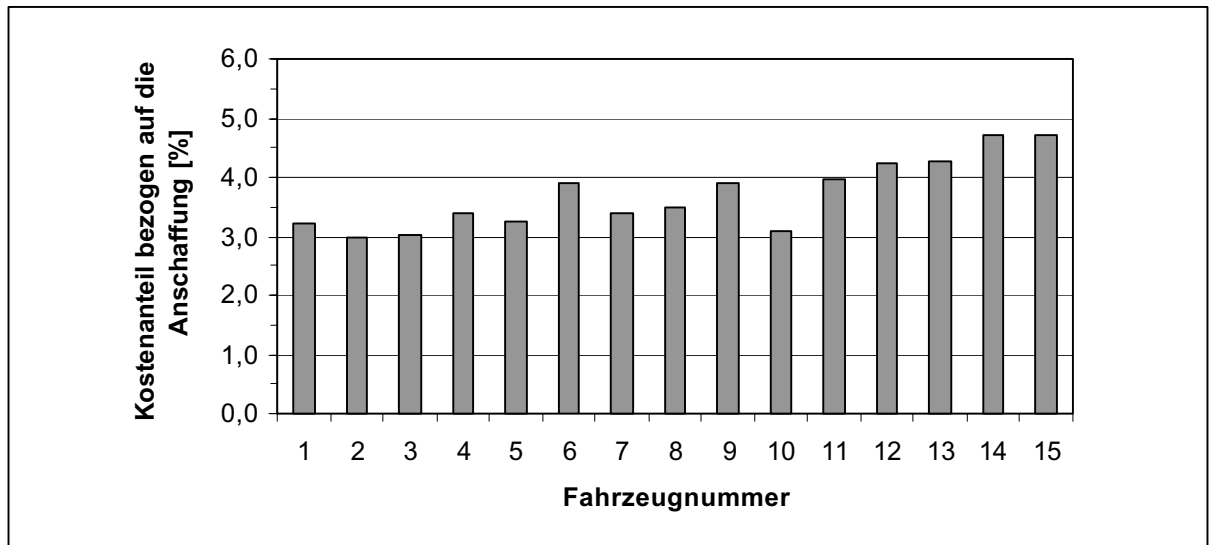


Abbildung 5-13: Kosten für die Instandsetzung infolge einer gesetzlichen Inspektion & Wartung je Fahrzeug

5.3.5 Vandalismus

Der Vandalismus stellt im Leben eines U-Bahnfahrzeugs eine wichtige Größe in Bezug auf die Entwicklung der Lebenszykluskosten dar. Die sinnlose Beschädigung von U-Bahnfahrzeugen verursacht nicht nur Kosten für die Beseitigung, sondern kann auch Einfluss auf die Kundenzufriedenheit haben. Somit befindet sich ein Verkehrsunternehmen im Zwiespalt zwischen der kundenwirksamen Instandsetzung von Vandalismusschäden und den damit verbundenen Kosten. Je nach Philosophie des Verkehrsunternehmens sowie des Aufgabenträgers und der damit notwendig werdenden Beseitigung von Vandalismusschäden wie Graffiti oder gescratchten Scheiben, stellt sich eine Mischform von Imageverlust und auftretenden Instandhaltungskosten ein. Beide haben langfristig Einfluss auf die Kundenzufriedenheit.

Im letzten Jahrzehnt hat sich Vandalismus längst als „Funsportart“ etabliert. Damit steigen die Kosten für die Verkehrsunternehmen um die Schäden zu beseitigen bzw. um die Kosten infolge des Vandalismus z. B. durch vorbeugendes Kleben von Scheibenfolien zu reduzieren. Diese Entwicklung ist anhand von Abbildung 5-14 nachzuvollziehen. Insbesondere zu Beginn des zweiten Jahrtausends ist hier ein deutlicher Anstieg der Kosten infolge Vandalismus zu verzeichnen. Die Maßnahmen der Verkehrsunternehmen, dem Vandalismus entgegenzuwirken, scheinen mittlerweile lohnenswert zu sein. Allerdings beinhaltet diese Kostenbetrachtung keine Kosten für vorbeugende Maßnahmen. Demnach kann keine Aussage über eine gesamtheitliche Kostenreduzierung getroffen werden.

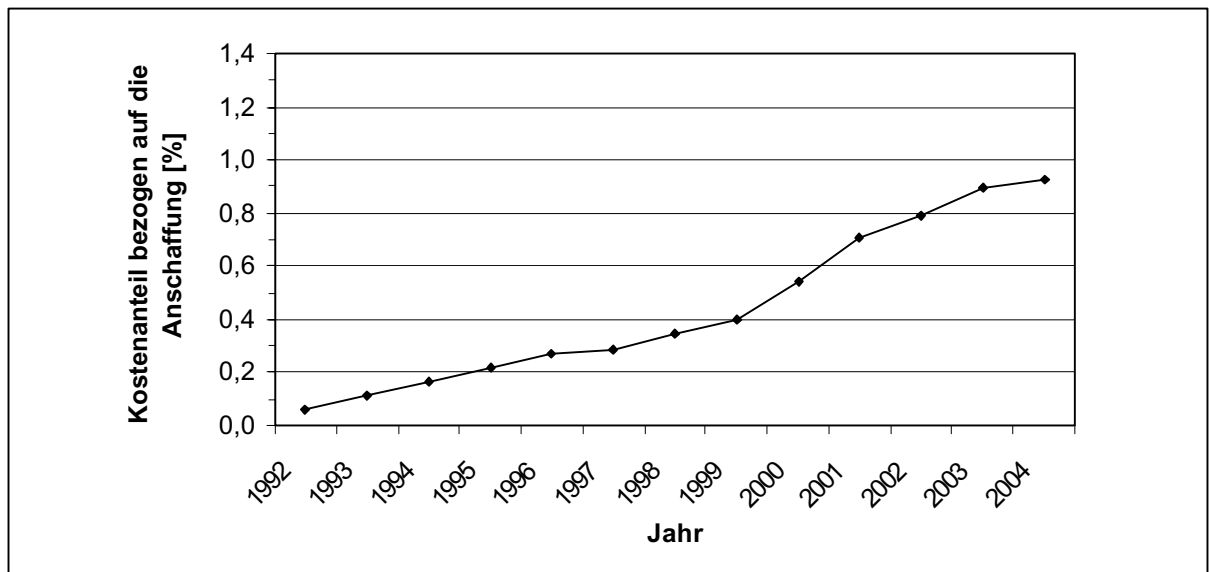


Abbildung 5-14: Durchschnittliche kumulierte Kosten für den Vandalismus im Zeitraum 1992 bis 2004

Im Zeitraum zwischen 1992 und 2004 stiegen im Durchschnitt die Kosten zur Beseitigung der Vandalismusschäden an den Fahrzeugen der analysierten Fahrzeugserie um 0,07 % der Anschaffungskosten. Dabei sind in den einzelnen Jahren nach Abbildung 5-14 stark unterschiedliche Steigerungsraten zu erkennen. Der Maximalwert liegt bei 0,16 % und der Minimalwert bei 0,02 % bezogen auf die Anschaffungskosten.

Schlüsselt man die kumulierten Kosten zur Beseitigung der Schäden in Kosten pro Fahrzeug auf, ist erkennbar, dass in gewissem Maß Vandalismusschäden an jedem der betrachteten U-Bahnfahrzeuge auftreten, der Umfang der verursachten Schäden allerdings stark unterschiedlich ist. Die Unterschiede belaufen sich nicht nur auf die Kosten, die für die Beseitigung der Schäden entstanden sind, sondern ebenso auf den Zeitpunkt der Schadensverursachung. Nach 13 Jahren Betriebsdauer sind infolge Vandalismus durchschnittlich Kosten in Höhe von 0,94 % der Anschaffungskosten entstanden. Dabei wurden in Bezug auf die ausgewählten Fahrzeuge mindestens 0,86 % und höchstens 1,06 % der Anschaffungskosten für die Schadensregulierung investiert.

Die Beeinflussbarkeit der Kosten infolge Vandalismus durch die Verkehrsunternehmen ist auf vorbeugende Maßnahmen und das Abwägen notwendiger Instandsetzungsarbeiten begrenzt. Der Vandalismus wird somit zu einer schwer kalkulierbaren Größe im Hinblick auf die Lebenszykluskostenentwicklung von U-Bahnfahrzeugen.

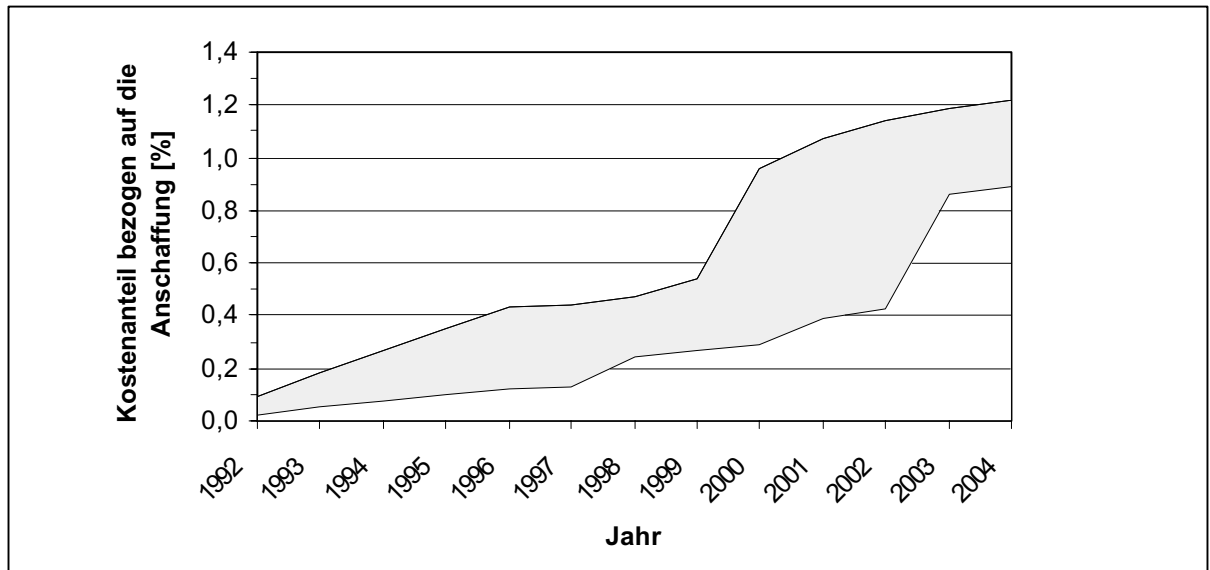


Abbildung 5-15: Kumulierte Kosten für den Vandalismus ausgewählter U-Bahnfahrzeuge im Zeitraum 1992 bis 2004

5.4 Entsorgungskosten

Eine Entsorgung von U-Bahnfahrzeugen kann aufgrund unterschiedlicher Ursachen erfolgen. Diese sind z. B.

- Die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge ist aufgrund stark steigender Instandhaltungskosten nicht mehr gegeben.
- Eine Modernisierung ist wirtschaftlich nicht vertretbar.
- Die Instandsetzung infolge eines Unfalls ist unwirtschaftlich.
- Das gebundene Kapital soll durch Verringerung der Werkstatt- und Betriebsreserve reduziert werden.

Generell kann die Entsorgung aus Sicht eines Verkehrsunternehmens auf zwei Wegen geschehen. Eine Möglichkeit bietet sich durch den Verkauf der Fahrzeuge, sofern diese noch fahrtauglich sind und den erforderlichen Sicherheitsstandards entsprechen. Als zweite Möglichkeit kann die Entsorgung in Form einer Verschrottung vorgenommen werden. Dazu können durch die Verkehrsunternehmen wichtige Baugruppen, die z. B. am freien Markt nicht mehr verfügbar sind, ausgebaut und der Ersatzteilkhaltung zugeführt werden. Die Fahrzeuge werden dann an Recyclingunternehmen übergeben. Je nach eingesetzten Werkstoffen fallen für das Verkehrsunternehmen entweder Kosten für die Entsorgung an oder das Verkehrsunternehmen bekommt den Gegenwert der Werkstoffe bezahlt.

Aufgrund langfristiger Veränderungen der Rohstoffpreise sowie gesetzlicher Neuerungen während der Betriebsphase der Fahrzeuge können die Entsorgungskosten über einen größeren Zeitraum nicht ausreichend genau vorhergesagt werden. Die

Verkehrsunternehmen können jedoch in der Anschaffungsphase auf die Hersteller einwirken, um durch einen recyclingorientierten Einsatz von Werkstoffen in der Konstruktionsphase die Entsorgungskosten zu beeinflussen.

5.5 Zusammenfassung der Analyseergebnisse

Für die Erstellung eines Berechnungsansatzes, der eine Prognose der Lebenszykluskostenentwicklung von U-Bahnfahrzeugen verfolgt, wurden alle Kosten im bisherigen Lebenszyklus einer Fahrzeugserie über einen Zeitraum von 13 Jahren aufgenommen und analysiert. Die Kosten der 55 Doppeltriebwagen wurden in neun Kostengruppen aufgeteilt und fahrzeugspezifisch in Jahresscheiben zusammengefasst. Die Angaben über angefallene Kosten wurden auf die Anschaffungskosten eines Fahrzeugs bezogen.

Im Betrieb entstehen Kosten für den Fahrstrom und die Reinigung der Fahrzeuge. Der Stromverbrauch pro Nwkm wird im Durchschnitt über die verschiedenen Fahrstreckentopographien und die unterschiedlichen Zuladungssituationen der Fahrzeuge als konstant angenommen. Aus den gefahrenen Kilometern kann somit direkt der Gesamtverbrauch bestimmt werden. Die Analyse hat gezeigt, dass in der Einführungsphase der Fahrzeugserie diese eine deutlich geringere jährliche Kilometerleistung aufweisen. Ab 1994 ist im Mittel jedes Jahr ein leichter Anstieg der fahrzeugspezifischen Kilometerleistung zu verzeichnen. Für eine optimale Nutzung der Fahrzeuge nähert sich deren jährliche Kilometerleistung einem Grenzwert, dessen Schwelle aufgrund technischer und organisatorischer Randbedingungen nicht überschritten werden kann. Für die Verkehrsunternehmen bietet sich zur Beeinflussung der Energiekosten die Möglichkeit, mit regionalen und überregionalen Stromlieferanten entsprechende Verträge abzuschließen, die zwar keine Reduzierung des Stromverbrauchs aber eine Reduzierung der Stromkosten zu Folge haben. Weiterhin kann durch Rückspeisung des Bremsstroms in das Stromnetz eine Kostenreduzierung erreicht werden. Innerhalb von 13 Jahren Betrieb entstanden Stromkosten in Höhe von 19,6 % der Anschaffungskosten.

Die Reinigung der Fahrzeuge wird für die untersuchte Fahrzeugserie, abgesehen von Reinigungstätigkeiten infolge Vandalismus, in definierten Intervallen mit festen Arbeitsinhalten durchgeführt. Der Einfluss der Verkehrsunternehmen auf die Reinigungskosten liegt vornehmlich in der Festlegung vom Tätigkeitsumfang und Reinigungsintervallen. Weiterhin kann bereits in der Anschaffungsphase auf gute Zugänglichkeit der zu reinigenden Stellen und auf den Einsatz leicht zu reinigender Werkstoffe geachtet werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die jährlichen Reinigungskosten pro Fahrzeug nahezu konstant sind. Zwischen den einzelnen Fahrzeugen bestehen nur geringe Kostenunterschiede, die bezogen auf 10 Jahre in Summe ca. 1 % der Anschaffungskosten ausmachen. Bei einer stringenten Umsetzung der

langfristigen Planung von Arbeitsinhalten und von Reinigungsintervallen ist eine genaue Vorhersage der Reinigungskosten möglich.

Die Betriebliche Inspektion & Wartung wird auch wie die Reinigung in vorgegebenen Intervallen durchgeführt. Dabei sind die Arbeitsinhalte nach verschiedenen Stufen gegliedert und werden lauleistungsabhängig durchgeführt. Die Analyse machte deutlich, dass auch in dieser Kostengruppe eine gute Prognose für das hier betrachtete System über den gesamten Lebenszyklus möglich ist. Dazu sind die Arbeitsinhalte und die Intervalle in denen die Arbeiten durchgeführt werden, langfristig zu planen. Werden die Arbeitsinhalte und die Intervalle jedoch dynamisiert und nicht nach einem festen Muster durchgeführt, gestaltet sich eine Prognose schwierig.

Für die betriebliche Instandsetzung verdeutlicht die Untersuchung, dass hier Unterschiede in den Kosten zwischen den einzelnen Fahrzeugen bestehen, die in Summe nach 10 Jahren bei 3,5 % der Anschaffungskosten liegen. Eine Prognose für die Entwicklung der Instandsetzungskosten würde demnach mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sein. Da die Tätigkeiten im Rahmen der Instandsetzung durch sporadische Bauteilausfälle oder durch Verbrauch des Abnutzungsvorrates eines Bauteils ausgelöst werden, entstehen mit den Instandsetzungsarbeiten im Gegensatz zu Inspektion & Wartung verstärkt Materialkosten, die je nach ausgefallenem Bauteil große Kostenunterschiede aufweisen können. Unterschiede zwischen den Fahrzeugen bestehen schon zu Beginn des Lebenszyklus und im Allgemeinen auf konstruktions-, fertigungs- oder montagebedingten Mängeln. Innerhalb einer Fahrzeugserie können somit Qualitätsunterschiede entstehen, die sich über den Lebenszyklus fortsetzen. Auch eine lauleistungsbezogene Lebenszykluskostenprognose in Bezug auf die Kosten der betrieblichen Instandsetzung verbessert die Unschärfe der Prognoseergebnisse nicht.

Die gesetzliche Inspektion & Wartung nach BOStrab wird in Abhängigkeit der Laufleistung oder zeitgebunden durchgeführt. Über die geplante jährliche Laufleistung der Fahrzeuge kann bestimmt werden, ob zuerst die Kilometergrenze oder die Zeitgrenze überschritten wird. Dadurch können die Zeitpunkte und damit die Häufigkeit für Tätigkeiten im Rahmen der gesetzlichen Inspektion & Wartung vorhergesagt werden. Die Einbeziehung von den durch die Technische Aufsichtsbehörde und den Fahrzeuginstandhalter festgelegten Arbeitsinhalten ist eine Ableitung der Kosten möglich. Im Rahmen der Untersuchung wurden 15 Fahrzeuge einer Inspektion & Wartung nach BOStrab unterzogen. Dabei zeigten sich nur geringe Kostenunterschiede zwischen den Fahrzeugen von maximal 1 % der Anschaffungskosten.

Infolge Inspektion & Wartung nach BOStrab fallen Instandsetzungsarbeiten an, die je Fahrzeug häufig mehr Kosten verursachen, als die Kostensumme von Voruntersu-

chungen und Wartungsarbeiten. Zwischen den Fahrzeugen bestehen hier Kostenunterschiede von maximal 1,7 % der Anschaffungskosten. Im Allgemeinen ist die Prognose der Kosten für die gesetzliche Instandsetzung analog zu den Kosten der betrieblichen Instandsetzung mit einer erhöhten Ungenauigkeit im Vergleich zu den Kosten für z. B. die Inspektion verbunden. Aufgrund der umfassenden Inhalte der gesetzlichen Instandsetzung und der damit verbundenen hohen Kosten relativieren sich die Kostenunterschiede zwischen den untersuchten Fahrzeugen.

Im Hinblick auf eine Prognose der Lebenszykluskostenentwicklung von U-Bahnfahrzeugen spielt der Vandalismus eine wichtige Rolle. Die durchgeführte Untersuchung machte deutlich, dass Vandalismus zu jeder Zeit in unterschiedlichem Ausmaß vorhanden ist. Die Auswahl der zu beschädigenden Fahrzeuge geschieht i. d. R. zufällig. Auch der Beschädigungsumfang unterliegt keinem festen Muster. Damit ist eine Vorhersage der Entwicklung von Vandalismuskosten kaum möglich oder mit einer großen Ungenauigkeit behaftet.

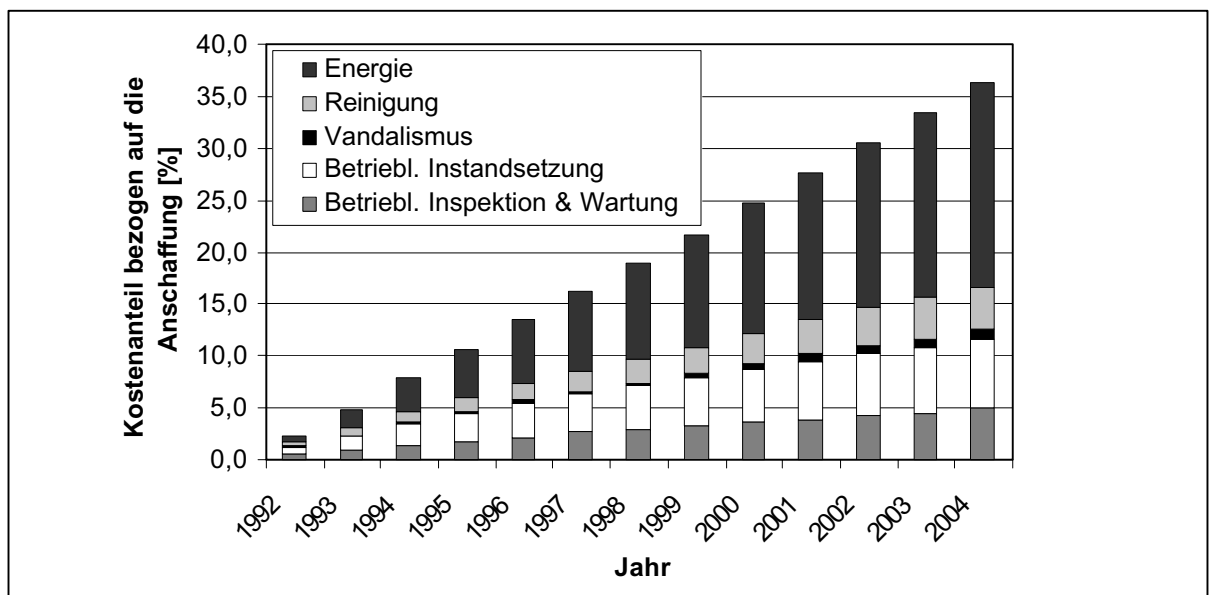


Abbildung 5-16: Durchschnittliche kumulierte Lebenszykluskosten im Zeitraum 1992 bis 2004 ohne Kosten für die gesetzliche Instandhaltung

Ausgehend von der vorangegangenen Kostenanalyse werden die Kosten über den Lebenszyklus in kumulierter Form in Abbildung 5-16 aufgetragen. An dieser Stelle wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung verzichtet, da diese nur einmalig im Jahr 2000 Kosten in Höhe von 6,59 % der Anschaffungskosten verursachen. Die Darstellung unterstreicht insbesondere das Verhältnis von Anschaffungskosten zu den Kosten während und infolge des Betriebes. Insgesamt verursachen die Betriebs- und Instandhaltungskosten nach 10 Jahren Betrieb inklusive der gesetzlichen Instandhaltung Kosten in Höhe von 34,25 % der Anschaffungskosten. Je nach Lebensdauer der Fahrzeuge, können

damit die Anschaffungskosten durch die Betriebs- und Instandhaltungskosten überschritten werden.

Die Kosten, die in Verbindung mit der Entsorgung stehen, sind je nach Art der Entsorgung von verschiedenen Randbedingungen abhängig. Für die Entsorgung durch einen Altstoff verwertenden Betrieb kann eine Prognose über die je Fahrzeug enthaltenen Massen an Rohstoff, z. B. Stahl oder Aluminium und die potentielle Entwicklung der Rohstoffpreise bestimmt werden. Die Vorhersage der Rohstoffpreisentwicklung bringt den größten Faktor an Ungenauigkeit in eine Kostenabschätzung für die Entsorgung.

Tabelle 5-1: Prognosegenauigkeit und Kostenentwicklung für definierte Kostenträger

	Prognosegenauigkeit	Kosten nach 10 Jahren Betrieb [% von Anschaffungskosten]
Energiekosten	+	14,07
Reinigungskosten (ohne Vandalismus)	++	3,43
Betriebliche Inspektion & Wartung	++	3,96
Betriebliche Instandsetzung	-	5,49
Gesetzliche Inspektion & Wartung	++	2,82
Gesetzliche Instandsetzung	-	3,77
Vandalismus	--	0,71
Entsorgung	○	k. A.

-- = sehr schlecht; - = schlecht; ○ = mittel; + = gut; ++ = sehr gut

Ausgehend von der vorangegangenen Untersuchung ist es also erforderlich für die die Bestimmung der optimalen Lebensdauer von U-Bahnfahrzeugen weiterführende Ansätze zu verfolgen. Ein Ansatz wird im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

5.6 Bestimmung der optimalen Lebensdauer von U-Bahnfahrzeugen

Die durchgeführte Lebenszykluskostenanalyse für die ersten 13 Betriebsjahre im Lebenszyklus einer Fahrzeugserie hat gezeigt, dass ausgehend von den damit verbundenen Ergebnissen eine Kostenprognose mit einer Ungenauigkeit behaftet sein kann. Diese vermeintliche Prognose sollte der Entscheidungsfindung zu Bestimmung der optimalen Lebensdauer von U-Bahnfahrzeugen dienen. Um dennoch eine Aus-

sage über die optimale Lebensdauer machen zu können, wird ein erweiterter Ansatz verfolgt.

Grundgedanke dieses Ansatzes ist, die Kosten eines realen und eines virtuellen Fahrzeugs gegenüberzustellen und daraus den kostenoptimalen Entsorgungs- und Neuanschaffungszeitpunkt zu bestimmen. Das Entscheidungskriterium beruht ausschließlich auf Kostenbasis. Sicherheit und Kundenzufriedenheit werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Entscheidungsfindung wird anhand Abbildung 5-17 nachfolgend erläutert.

Tabelle 5-2: Bewertung der Kostenträger hinsichtlich ihres Einflusses auf die Entscheidungsfindung der optimalen Lebensdauer

Kostenträger	Sind die Kosten bei gleicher jährlicher Laufleistung altersspezifisch?	Sind die Kosten bei gleicher jährlicher Laufleistung serienspezifisch?	Besonderheiten	Einbeziehung in Entscheidungsfindung zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Lebensdauer?
Anschaffung	-	Ja	die jährlichen Aufwendungen für die Anschaffung sind von der Abschreibungsdauer und dem Abschreibungsverlauf abhängig	Ja
Energie	Nein	Ja	Prognose des Energieverbrauchs zukünftig einzusetzender Fahrzeugserien nicht möglich	Ja
Reinigung	Nein	Ja	feste Arbeitsinhalte je Fahrzeugserie vorausgesetzt	Ja
Inspektion & Wartung	Nein	Ja	feste Arbeitsinhalte je Fahrzeugserie vorausgesetzt	Ja
Instandsetzung	Ja	Ja	-	Ja
Vandalismus	Nein	Nein	-	Nein
Entsorgung	-	Ja	Kostenprognose schwierig, Einfluss im Vergleich zu allen anderen Kostenträgern sehr gering	Nein

Für die Verfolgung dieses Ansatzes werden in Tabelle 5-2 zunächst die einzelnen Kostenträger dahingehend bewertet, wie stark ihre Kostenentwicklung durch das Fahrzeugalter und durch die Fahrzeugserie geprägt ist. Unter Einbeziehung von Annahmen und tatsächlichen Bedingungen wird beurteilt, welche Kostenträger in die Entscheidungsfindung zu Bestimmung der optimalen Lebensdauer der Fahrzeuge einbezogen werden oder nicht.

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen ergeben sich die Bestandteile der Lebenszykluskosten, die für die Entscheidungsfindung des optimalen Entsorgungszeitpunktes von U-Bahnfahrzeugen hinzugezogen werden. Diese Kostenbestandteile sind:

- Anschaffungskosten in Form von Abschreibungen (ANS),
- Reinigungskosten (REI),
- Kosten für Inspektion & Wartung (IW),
- Instandsetzungskosten (IS) und
- Energiekosten (EN).

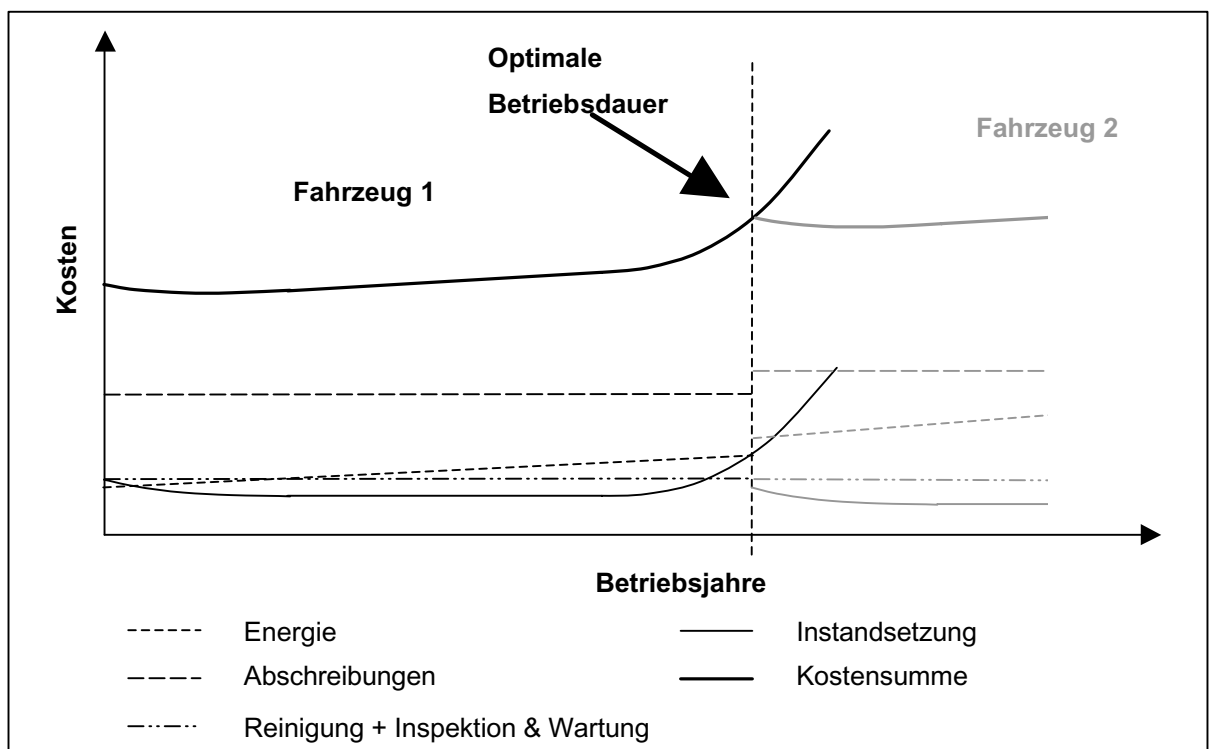


Abbildung 5-17: Beispielhafte Entscheidungsfindung für eine optimale Lebensdauer

In Abbildung 5-17 sind die Kosten für die Anschaffung in Form von Abschreibungen sowie die Betriebs- und die Instandhaltungskosten in Summe beispielhaft für zwei Fahrzeuge über den Betriebsjahren aufgetragen. Die Abschreibungen verlaufen hier linear. Das Ende der Abschreibungsdauer wird hier erreicht (Fall 2). Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen handelt es sich bei den hier aufgetragenen Kosten

nicht um kumulierte Kosten. Die Kosten für die gesetzliche Instandhaltung werden anteilig über die jeweilige Intervalldauer aufgeteilt.

Aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten ergeben sich drei Fälle, bei denen die Anschaffung von Neufahrzeugen erforderlich wird. Diese sind:

- Fall 1 (vor Ablauf der Abschreibungsdauer von Fahrzeug 1):
 $(EN + REI + IW + IS)_{Fzg1} > ANS_{Fzg1} + (EN + REI + IW + IS)_{Fzg2} + ANS_{Fzg2}$
- Fall 2 (am Ende der Abschreibungsdauer von Fahrzeug 1):
 $(EN + REI + IW + IS)_{Fzg1} + ANS_{Fzg1} > (EN + REI + IW + IS)_{Fzg2} + ANS_{Fzg2}$
- Fall 3 (nach Ablauf der Abschreibungsdauer von Fahrzeug 1):
 $(EN + REI + IW + IS)_{Fzg1} > (EN + REI + IW + IS)_{Fzg2} + ANS_{Fzg2}$

Ausgehend von diesem Ansatz wurden Daten älterer Fahrzeugserien für eine solche Lebenszykluskostenbetrachtung erhoben. Um eine einheitlich gute Datenqualität zu gewährleisten wurden die Kosten für die Instandhaltung von Fahrzeugserien verschiedenen Alters aus dem Zeitraum von 1998 bis 2004 verwendet. Somit werden fortlaufende Daten erzeugt, die die Möglichkeit bieten, die wichtigsten Kosten in einem Lebenszyklus über einen Zeitraum von 35 Jahren abzubilden. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten werden diese auf die Anschaffungskosten normiert und entsprechend individueller Eigenschaften der Fahrzeugserien auf ein einheitliches Niveau harmonisiert.

Es gelten folgende Randbedingungen:

- Es liegt ein linearer Abschreibungsverlauf über 35 Jahre vor.
- Die Anpassung des Lohnkostensatzes folgt der Inflationsrate.
- Die Materialkosten steigen entsprechend der Inflationsrate.
- Die Arbeitsinhalte für Reinigung, Inspektion & Wartung sind konstant.
- Die Kostenentwicklung für die Instandsetzung verläuft für beide Fahrzeugserien gleich. Der Unterschied liegt in der Höhe der absoluten Beträge.

Vergleiche von Fahrzeugserien haben ergeben, dass jüngere Fahrzeugserien einen höheren Energieverbrauch aufweisen, als ältere. Damit könnte der Energieverbrauch einen entscheidenden Einfluss auf eine rein wirtschaftlich gestützte Entscheidung für oder gegen eine Neuanschaffung von Fahrzeugen haben.

Bildet man die Kostenentwicklung vom realen Fahrzeug wie in Abbildung 5-18 über einen Zeitraum von 35 Jahren ab, ist auch nach dieser langen Lebensdauer bei den hier untersuchten Fahrzeugen kein überproportionaler Anstieg der Kosten zu ver-

zeichnen. Der kontinuierliche Anstieg resultiert aus einer jährlichen Steigerung des Energiepreises. Die hohen Peaks in Abbildung 5-18 sind auf Kosten aus der gesetzlichen Instandhaltung zurückzuführen. Ansonsten verlaufen die Kosten für die Reinigung und die betriebliche Instandhaltung nahezu konstant. Auf die Darstellung einer virtuellen Fahrzeugserie zur Bestimmung der optimalen Lebensdauer wird an dieser Stelle verzichtet. Es wird vorausgesetzt, dass die Anschaffungskosten der virtuellen Fahrzeugserie und die dazugehörigen Instandhaltungs- und Reinigungskosten den oben angegebenen Randbedingungen gehorchen. Damit rücken die mit den jüngeren Fahrzeugserien aufgrund höheren Eigengewichts der Fahrzeuge steigenden Energieverbräuche in den Vordergrund. Da die daraus resultierende Kostensteigerung größer ist, als die Steigerung der Instandsetzungskosten der alten Fahrzeugserie, ergibt sich, dass die Fahrzeuge dieser Serie aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten länger als 35 Jahre gefahren werden sollten.

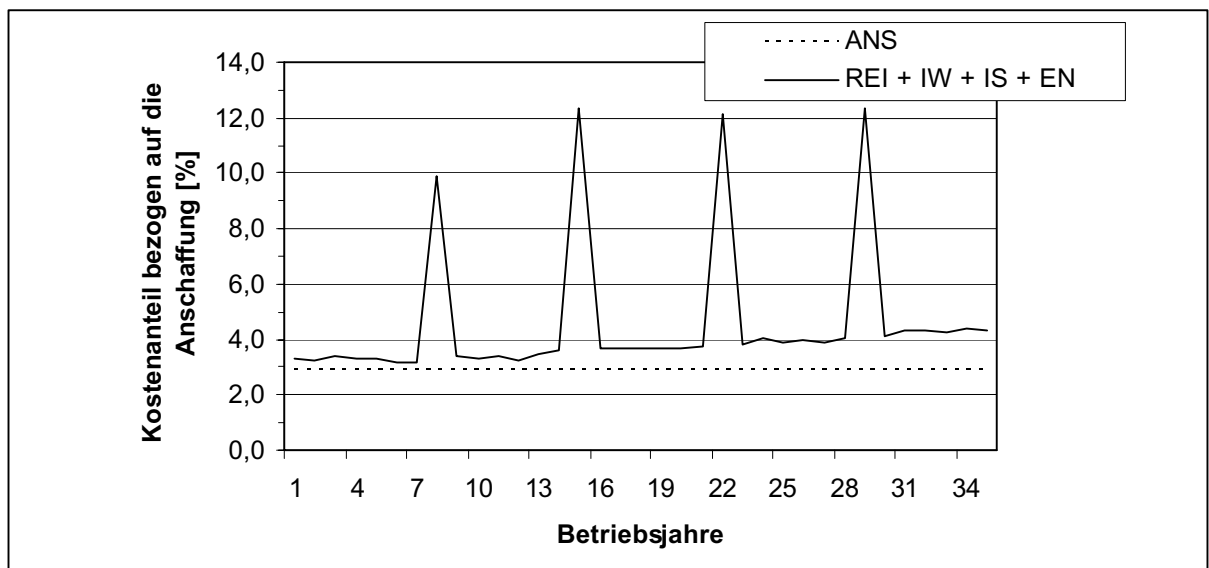


Abbildung 5-18: Durchschnittliche jährliche Kosten für Reinigung, Inspektionen, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten sowie Energiekosten über einen Lebenszyklus von 35 Jahren.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass eine rein wirtschaftliche Entscheidung zur Bestimmung der optimalen Lebensdauer mit recht unkomplizierten Mitteln durchgeführt werden kann. Schwierig vorherzusagende Kostenentwicklungen von Vandalismus und Entsorgung spielen in dieser Entscheidungsfindung keine Rolle. Die Prognose von Kosten für Reinigung sowie betriebliche und gesetzliche Inspektion & Wartung wird durch die Annahme fester Arbeitsinhalte unter Einbeziehung der angestrebten Kilometerleistung vereinfacht. Die Berücksichtigung der Instandsetzungskosten erfolgt durch die Annahme, dass die Kostenentwicklung der virtuellen Fahrzeugserie der realen Kostenentwicklung folgt. Die Ergebnisse der Kostenanalyse zeigen, dass die betrachtete Fahrzeugserie auch nach 35 Jahren Lebensdauer noch wirtschaftlich ist. Unter der Voraussetzung, dass die Sicherheit beim Betrieb dieser

Fahrzeugserie zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist, sollten die Fahrzeuge noch so lange eingesetzt werden, bis sich die Kosten entsprechend Fall 3 entwickeln.

Neben der Neuanschaffung sollte die Möglichkeit der Ertüchtigung der Fahrzeuge gegenübergestellt werden. Dabei sind insbesondere die mit den Arbeiten verbundenen Kosten, die dadurch erzielten Kosteneinsparungen und Qualitätsverbesserungen sowie die mögliche Laufzeitverlängerung zu berücksichtigen. Es ist dazu ein technisches Gutachten zu erstellen, das verstärkt die Ermüdung von eingesetzten Werkstoffen im Bereich der Drehgestelle und des Wagenkastens berücksichtigt.

6 Kennzahlengestützte Analyse der Instandhaltung einer U-Bahn-Flotte

Die Instandhaltung von U-Bahnen wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen gesteuert. Diese weisen eine netzartige Verknüpfungsstruktur hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten auf. Auf oberster Ebene wird die Instandhaltung durch den Fahrzeughersteller, den Fahrzeugbetreiber, den Fahrzeuginstandhalter, den Zulieferer, den Fahrgast und den Gesetzgeber mitbestimmt (vgl. Abbildung 6-1). Ordnet man dieser Struktur in der zweiten Ebene Subbereiche zu, werden die komplexe Struktur des Instandhaltungssystems und die vielfältigen Einflüsse auf die Instandhaltung der Fahrzeuge deutlich.

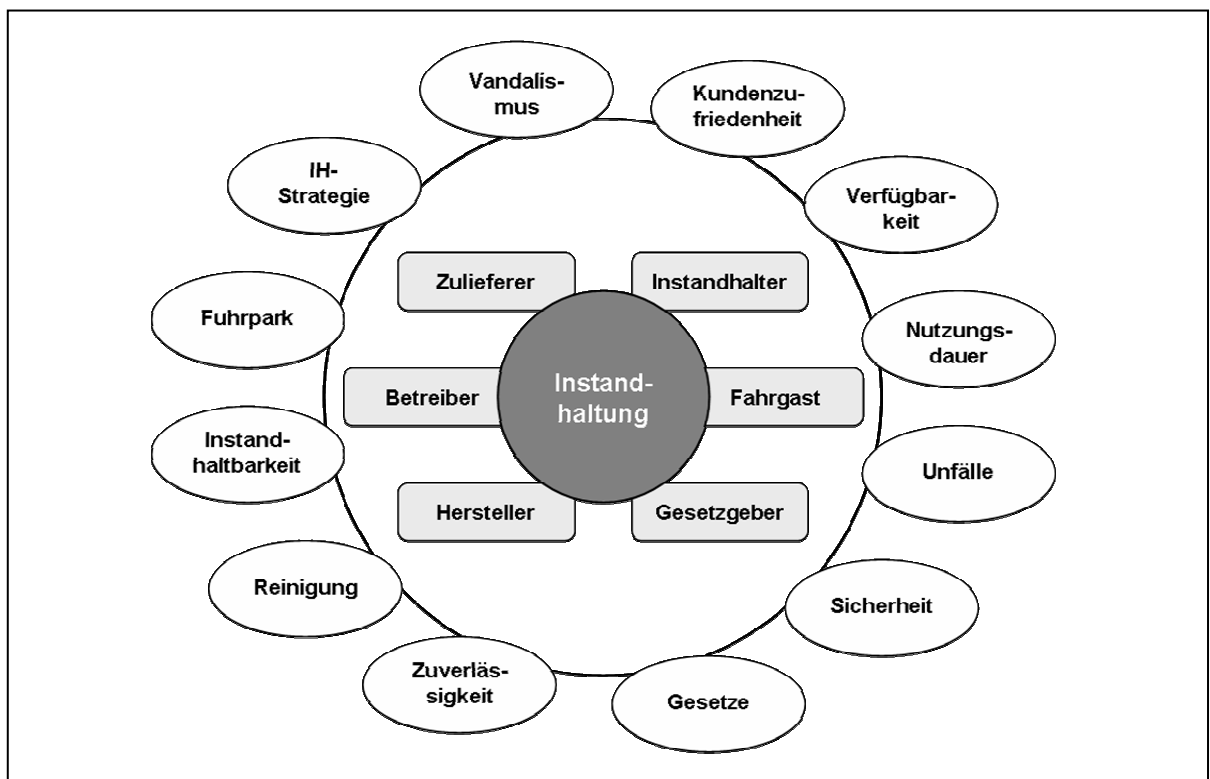


Abbildung 6-1: Einflussgrößen auf die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen

So ist z. B. die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge nicht nur abhängig vom Hersteller, sondern auch vom Fahrzeugbetreiber, vom Instandhalter, vom Zulieferer und vom Fahrgast. Dagegen wird die Instandhaltbarkeit fast ausschließlich vom Hersteller beeinflusst. Eine umfassende Untersuchung der Instandhaltung erfordert daher eine ganzheitliche Betrachtungsweise eines Systems, in dem sich die Parameter gegenseitig beeinflussen. Abbildung 6-2 zeigt beispielhaft, wo gegenseitige Abhängigkeiten bestehen können. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass jedes Element direkt oder indirekt eine Abhängigkeit zu mehreren anderen Elementen aufweist. Im Rahmen von Analysen individueller Instandhaltungssysteme werden diesen Einflussgrößen verschiedene Prioritäten beigemessen. Einige bleiben sogar unbeachtet, um sich

zunächst auf die unternehmensspezifischen Forderungen an das Instandhaltungssystem zu konzentrieren.

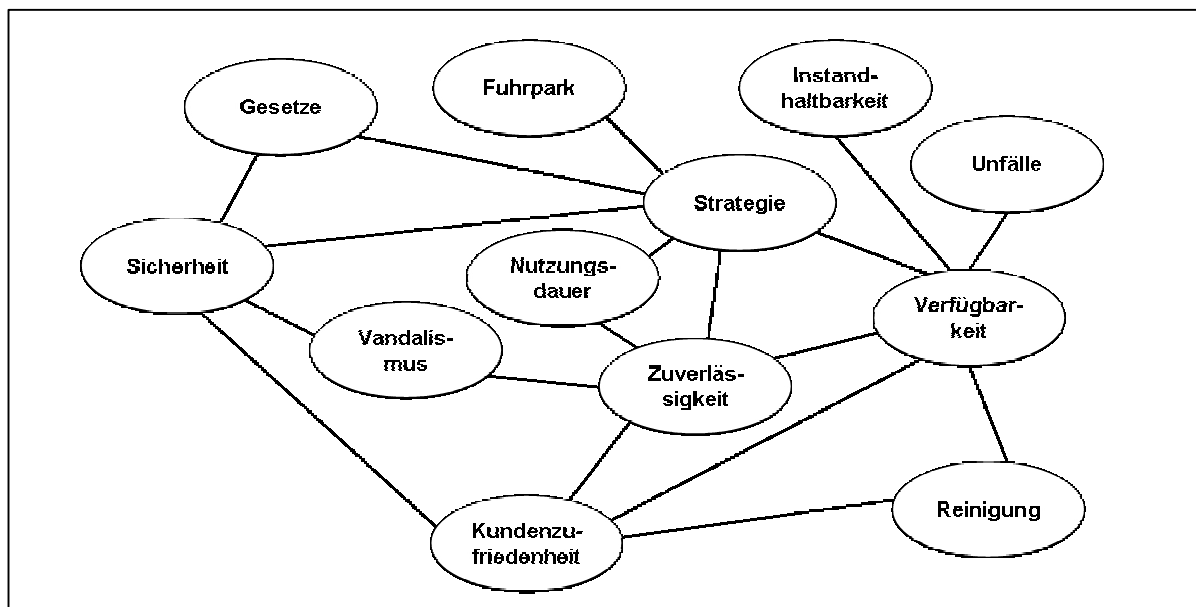


Abbildung 6-2: Beispielhafte Abhängigkeiten zwischen den Einflussgrößen der Instandhaltung

Wie kann ein solches Instandhaltungssystem verbessert werden, um die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern? Eine Vorgehensweise, die allen Anforderungen an derart komplexe Strukturen gerecht wird, gibt es nicht. Es sind jedoch verschiedene Strategien verbreitet, die auf eine langfristige Verbesserung der Geschäftsergebnisse abzielen. Im Kapitel 3 wurden einige Konzepte und Strategien in der Instandhaltung vorgestellt und diskutiert.

Für die Auswahl einer Strategie und ihrer Instandhaltungskonzepte, ist die Orientierung am Kunden unerlässlich. Eine ungenaue Kenntnis der Kundenwünsche kann zu Zielsetzungen führen, die an einer optimalen Performance vorbeiführen. Dabei können die mit dem angestrebten Prozessergebnis verbundenen Kosten steigen, ohne dass damit ein Erfolg für den Kunden gewährleistet ist. Etwaige Bemühungen beeinflussen das Geschäftsergebnis negativ. Orientiert man sich hingegen direkt am Kunden, wirken sich die Anstrengungen positiv auf die Kundenzufriedenheit aus und sichern damit nachhaltig den Geschäftserfolg. Im Bereich des ÖPNV ist deswegen die Kundenzufriedenheit ein zentrales Ziel, das für ein wirtschaftliches Arbeiten angestrebt werden muss (vgl. Kapitel 2.3).

In Zusammenarbeit mit dem Bereich „U-Bahn-Fahrzeuge“ der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) wurde ein Projekt ins Leben gerufen, das die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit zum Ziel hatte. Im Folgenden wird aufgezeigt, mit welcher strukturierten und zielorientierten Vorgehensweise das Instandhaltungssystem der Berliner

U-Bahn analysiert wurde. Als Fundament der Untersuchungen wurden Datenbanken mit fahrzeugbezogenen Kosten- und Leistungsdaten aufgestellt, über die Kapitel 4 nähere Auskunft gibt. Die ausgewerteten Daten entstammen einem Untersuchungszeitraum von einem Jahr.

Die untersuchte Fahrzeugflotte der Berliner Verkehrsbetriebe besteht aus 19 Fahrzeugserien, welche sich auf zwei Fahrzeugprofile (Kleinprofil, Großprofil) aufteilen. Die Fahrzeugprofile unterscheiden sich durch das Lichtraumprofil und die Anzahl der Nutzwagen je Vollzug. Ein Vollzug im Kleinprofil besteht aus 8 Nutzwagen, im Großprofil aus 6 Nutzwagen. Die Spurweite ist bei beiden Profilen gleich. Die Fahrzeugserien S1 bis S7 sind dem Kleinprofil, die Serien S8 bis S19 dem Großprofil zugeordnet. Die Fahrzeugserie S1 wird aufgrund umfangreicher Ertüchtigungsarbeiten, die innerhalb des Betrachtungszeitraums durchgeführt wurden, in den nachfolgenden Analysen nicht berücksichtigt. Ebenso wird mit der Fahrzeugserie S6 verfahren, da für diese keine repräsentative Anzahl von Messwerten vorliegt. Eine Auflistung der Fahrzeugserien zeigt Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Fahrzeugserien der U-Bahnflotte der BVG

Kleinprofil				Großprofil			
Fahrzeugserie	Anzahl d. Nw	Baujahr	Antrieb	Fahrzeugserie	Anzahl d. Nw	Baujahr	Antrieb
S1	72	1964/66	GS	S8	102	1968	GS
S2	86	1967	GS	S9	60	1970	GS
S3	134	1971	GS	S10	56	1974	GS
S4	16	1982	GS	S11	82	1976	GS
S5	96	1992	DS	S12	84	1979	GS
S6	8	2000	DS	S13	78	1984	DS
S7	106	1988	GS	S14	42	1987	DS
				S15	60	1990	DS
				S16	108	1992	DS
				S17	12	1995	DS
				S18	144	1997	DS
				S19	120	2001	DS

6.1 Definition der Untersuchungsinhalte und Zielwerte

6.1.1 Prozessablauf

In der Praxis zeigt sich, dass die Elemente der Prozesskette „Instandhaltung“ und deren Zusammenwirken von der Art der erforderlichen Instandhaltungsarbeiten bestimmt werden. Die Notwendigkeit für Instandhaltungsarbeiten können zufällig oder geplant auftreten. Im ersten Fall spricht man von außerplanmäßiger Instandhaltung. Auslöser kann hier z. B. der Verbrauch des Abnutzungsvorrates eines Reibbelages

der Bremse sein. In der planmäßigen Instandhaltung wird zwischen den Arbeiten zu den Fristen den Arbeiten zur BOStrab und der Verbesserung unterschieden. Die fristbestimmten Arbeiten, die gesetzliche Instandhaltung und die Verbesserung unterliegen mit ihren Inhalten einer langfristigen Planung. Die Verbesserung wird als Sonderbestandteil der planmäßigen Instandhaltung betrachtet, da sie einen anderen Prozessablauf von der Fahrzeugzuführung bis zur Übergabe an den Fahrdienst bedingt, als die herkömmlichen Tätigkeiten wie Inspektion, Wartung und Instandsetzung.

Tabelle 6-2: Gliederung der betrieblichen und gesetzlichen Instandhaltung in Instandhaltungsleistungsarten am Beispiel der BVG (siehe Definitionen)

	Betriebliche Instandhaltung	Gesetzliche Instandhaltung (BOStrab)
Planmäßige (pl) Instandhaltung	Betriebliche Inspektion & Wartung (BIW)	Gesetzliche Inspektion & Wartung (GIW)
	Instandsetzung infolge BIW • Zustandsorientierte Instandsetzung (BPZI) • Radprofilkorrektur (BPRK) • Baugruppenwechsel (BPBW) • Fehlersuche (BPFS) • Diagnose & Prüfung (BPDP)	Instandsetzung infolge GIW
Außerplanmäßige (apl) Instandhaltung	Zustandsorientierte Instandsetzung (BAZI) Radprofilkorrektur (BARK) Baugruppenwechsel (BABW) Fehlersuche (BAFS) Diagnose & Prüfung (BADP)	

Die folgenden Untersuchungen stützen sich auf die in Tabelle 6-2 enthaltenen Instandhaltungsleistungsarten. Die Gliederung der Instandhaltungsleistungsarten geschieht analog zu den Vorgaben der BVG. Die Untersuchungen werden u. a. in die Bereiche der planmäßigen und die außerplanmäßigen Instandhaltung unterteilt. Dabei enthält die Betrachtung der planmäßigen Instandhaltung auch Instandhaltungsleistungsarten, die sich in der Betrachtung der außerplanmäßigen Instandhaltung wieder finden. Ursache dafür liegt in der Betrachtungsweise des Systems. Danach werden Tätigkeiten, die infolge einer „betrieblichen Inspektion & Wartung“ anfallen als „Instandsetzung infolge Inspektion & Wartung“ dieser auch zugeordnet. Somit

werden die Tätigkeiten der planmäßigen Instandhaltung zugerechnet, obwohl sie nicht direkt der langfristigen Planung unterliegen.

Um ein einheitliches Verständnis von den zu analysierenden Instandhaltungsprozessen zu gewährleisten, wird ein SIPOC (Supplier-Input-Process-Output-Customer), das heißt eine Darstellung des Instandhaltungsprozesses auf oberster Ebene, entwickelt, welche die Prozesskette Instandhaltung mit ihren Kunden-Lieferanten-Beziehungen abbildet. Diese in Abbildung 6-3 vorgestellte Gliederung der Beziehungen zwischen den Kunden und den Lieferanten der Prozesse sowie von Einzelprozessen mit ihren Ein- und Ausgangsgrößen ermöglicht eine gesamtheitliche Betrachtung.

Mit Hilfe des SIPOC wurde erkannt, dass der Prozess „Durchführung der IH-Maßnahmen“ den größten Einfluss auf das Prozessergebnis hat. Der Einfluss auf die Kundenzufriedenheit und die Möglichkeit für Fehlleistungen ist hier am Größten, da die „Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen“ eine Vielzahl von Einzelprozessen umfasst, die direkt am Fahrzeug ablaufen. Die Komplexität der Instandhaltungsmaßnahmen, wie z. B. die Demontage, die Wartung, die Instandsetzung und die Montage, aber auch die Bewertung der Inspektionsergebnisse, bieten ein weites Feld für die Einflussnahme auf das Prozessergebnis und damit auf die Fahrzeugzuverlässigkeit, die Instandhaltungskosten und die Sicherheit. Die „Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen“ steht daher im Mittelpunkt der folgenden Untersuchung. Die Definition der Kennzahlen orientiert sich an diesem Prozess.

Supplier	Input	Process	Output	Customer
Bereich Fahrzeuge	SAP Wartungsplanung	Fahrzeug anfordern	Fahrzeuganforderung	Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst
Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst	Fahrzeuganforderung	Bereitstellung Fahrzeug	Zuführung des Fahrzeugs	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Fahrzeug, Instandhaltungsauftrag	Eingangsd disposition	Ist-Zustand d. Fahrzeugs	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Ist- Zustand d. Fahrzeugs, Checkliste	Durchführung Instandhaltungsmaßnahmen	Fahrzeug, Informationen über Zustand	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Fahrzeug, Informationen über Zustand	Endprüfung, Fertigmeldung in SAP	Freigegebenes Fahrzeug	Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge
Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge	Freigegebenes Fahrzeug	Fahrzeugbereitstellung	Bereitgestelltes Fahrzeug	Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst

Abbildung 6-3: SIPOC für die planmäßige Instandhaltung

Es wurden ebenfalls SIPOCs für die „außerplanmäßige Instandhaltung“ und für die „Verbesserung“ erstellt (siehe Abbildung 10-5 und Abbildung 10-6 im Anhang). Auch hier zeigte sich die „Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen“ als Prozess mit dem größten Gewicht.

6.1.2 Anforderungen an den Instandhaltungsprozess

Für die Bewertung eines Instandhaltungssystems ist es notwendig sich auf quantitative Angaben zu stützen. Dazu werden Einzelprozesse oder es wird das Gesamtsystem anhand von Kennzahlen charakterisiert. Diese Kennzahlen werden aus Sicht des internen Kunden definiert. Zielwerte werden vorgegeben. In der folgenden Untersuchung fordert der interne Kunde eine „Reduzierung der Instandhaltungskosten und des Instandhaltungsbedarfs bei verbesserter Zufriedenheit der Fahrgäste.“

Generell lassen sich die Anforderungen an die Kennzahlen in drei Hauptgruppen gliedern.

- Kosten,
- Qualität und
- Zeit.

Abgeleitet von diesen übergeordneten Größen werden Kennzahlen definiert, um die Prozessgüte zu beurteilen. Zur Bewertung eines Instandhaltungssystems von Schienenfahrzeugen im ÖPNV eignen sich folgende abgeleitete Kennzahlen

- Produktpreiskennzahl,
- Produktivitätskennzahl,
- Materialkostenkennzahl,
- Lohnkostenkennzahl,
- Kennzahl für Instandhaltungsbedarf,
- Kennzahl für fahrgastwirksame Ausfälle,
- Kennzahl für Materialwertbestände und
- Kennzahl für Kosten durch Sachbeschädigung.

Da die einzelnen Kennzahlen auf die Zielsetzung dieser Arbeit einen unterschiedlichen Einfluss haben, werden sie in Tabelle 6-3 bewertet, und zwar bezüglich ihres Gewichts auf die Instandhaltungskosten, die Verfügbarkeit und die Kundenzufriedenheit. Das Gesamtgewicht in Tabelle 6-3 ist ein Maß für die Bedeutung der einzelnen Kennzahl bei der Bewertung des Instandhaltungsprozesses.

Tabelle 6-3: Matrix zur Auswahl der Kennzahlen

		Kennzahlen für							
Ziele	Gewichtungsfaktor	Produktpreis	Produktivität	Materialkosten	Lohnkosten	Instandhaltungsbedarf	Fahrgastwirksame Ausfälle	Materialbestand	Kosten für Beseitigung Sachbeschädigung
Instandhaltungskosten	0,9	6	4	7	8	3	2	1	4
		5,4	3,6	6,3	7,2	2,7	1,8	0,9	3,6
Verfügbarkeit	0,8	2	5	3	1	9	7	4	0
		1,6	4,0	2,4	0,8	7,2	5,6	3,2	0
Kundenzufriedenheit	1,0	6	2	5	8	3	7	1	4
		6,0	2,0	5,0	8,0	3,0	7,0	1,0	4,0
Gesamtgewicht		13,0	9,6	13,7	16,0	12,9	14,4	5,1	7,6

Zur Erstellung der Matrix wird der Einfluss jeder Kennzahl auf die drei Einzelziele bewertet. Als Bewertungsoption wird eine Skala von null bis zehn gewählt. Zusätzlich erhält jedes Ziel einen Gewichtungsfaktor, der die Bedeutung der Einzelziele in Bezug auf das Gesamtziel gewichtet. Das Produkt aus Bewertungsfaktor und Gewichtungsfaktor gibt den gewichteten Einfluss der Kennzahl je Einzelziel auf das Gesamtziel an. Deren Summe spiegelt das Gesamtgewicht jeder Kennzahl auf das Gesamtziel wider. Für die Bewertung und die Gewichtung wurden Fachexperten der Berliner Verkehrsbetriebe hinzugezogen.

Für die Analyse des Instandhaltungssystems ist es notwendig, die einzelnen kennzahlenbestimmenden Größen möglichst differenziert zu messen. Zur Verbesserung des Instandhaltungssystems ist die Möglichkeit zur Veränderung der betrachteten Größen von Bedeutung. Deswegen werden die in Tabelle 6-3 gewichteten Kennzahlen in Tabelle 6-4 nach Gesichtspunkten der Messbarkeit und der Beeinflussbarkeit einer weiteren Bewertung unterzogen. Das Ergebnis ist das bewertete Gewicht einer Kennzahl, das ihrer Bedeutung im Instandhaltungssystem entsprechend für die einzelnen Kennzahlen unterschiedlich groß ist. Um die nachfolgende Analyse in einen überschaubaren Rahmen zu stellen, werden die vier Kennzahlen mit dem größten bewerteten Gewicht nach Tabelle 6-4 ausgewählt. Nur sie werden in die weiteren Untersuchungen einbezogen.

Tabelle 6-4: Matrix zur Auswahl der Kennzahlen unter Berücksichtigung der Messbarkeit und der Beeinflussbarkeit

Ziele	Kennzahlen für							
	Produktpreis	Produktivität	Materialkosten	Lohnkosten	Instandhaltungsbedarf	Fahrgastwirksame Ausfälle	Materialbestand	Kosten für Beseitigung Sachbeschädigung
Messbarkeit (0 - 0,5)	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Beeinflussbarkeit (0 - 0,5)	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1
<i>Bewertungsfaktor</i>	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,5
<i>Gesamtgewicht</i> (aus Tabelle 6-3)	13,0	9,6	13,7	16,0	12,9	14,4	5,1	7,6
Bewertetes Gesamtgewicht	7,8	5,8	9,6	12,8	9,0	11,5	3,6	3,8

Diese ausgewählten Kennzahlen sind:

- Materialkosten,
- Lohnkosten,
- Instandhaltungsbedarf und
- fahrgastwirksame Ausfälle.

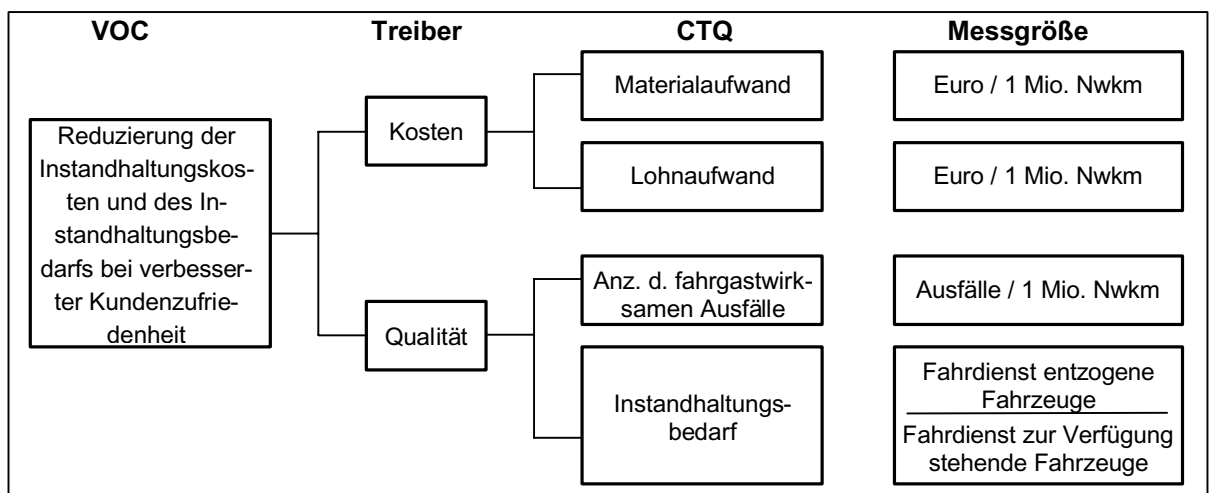


Abbildung 6-4: CTQ Baum

Diese qualitätskritischen Kennzahlen werden auch als Critical To Quality (CTQ) bezeichnet. Der entsprechende CTQ Baum ist Abbildung 6-4 zu entnehmen.

6.1.3 Festlegung der Zielwerte

Die im Kapitel 4 erstellten Datenbanken bilden die Daten für alle Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ab. Für die Analysen in diesem Kapitel werden Ausschnitte aus den in den Datenbanken gespeicherten Informationen benötigt. Für die Kostenanalyse werden die nachfolgenden Instandhaltungsleistungsarten, die als Kostenträger dienen, betrachtet:

- Gesetzliche Inspektion & Wartung (GIW),
- Betriebliche Inspektion & Wartung (BIW),
- Instandsetzung infolge GIW,
- Zustandsorientierte Instandsetzung (pl & apl),
- Radprofilkorrektur (pl & apl),
- Baugruppenwechsel (pl & apl),
- Fehlersuche (pl & apl) und
- Diagnose/ Prüfung (pl & apl).

Die Festlegung der Kostenziele wird anhand dieser Instandhaltungsleistungsarten vorgenommen. Vandalismus, Reinigungen und Unfälle verursachen zwar einen großen Teil aller in der Instandhaltung anfallenden Kosten, bleiben aber in dieser Arbeit unberücksichtigt und sollten in weiterführenden Untersuchungen analysiert werden. Ausgehend von der Beeinflussbarkeit durch den Instandhalter, werden daher nur die oben aufgelisteten Instandhaltungsleistungsarten in die Betrachtung der Kosten einbezogen. Die Inhalte der einzelnen Instandhaltungsleistungsarten sind dem Definitionsteil zu entnehmen.

Für die gesetzliche Instandhaltung liegen den Berliner Verkehrsbetrieben verschiedene Ausnahmegenehmigungen der Technischen Aufsichtsbehörde für die einzelnen Fahrzeugserien hinsichtlich einer Verlängerung der Laufleistung zwischen den BOStrab Untersuchungen vor. Für die betriebliche Inspektion & Wartung existieren in Abhängigkeit der Fahrzeugserie verschiedene Fristenintervalle. Die Intervalle und die Inhalte der betrieblichen Inspektion & Wartung werden dabei frei vom Instandhalter gewählt und basieren auf deren Erfahrung hinsichtlich Abnutzung und Ausfällen von Bauteilen. Die Intervalle werden hier laufleistungsbezogen definiert. Die Arbeitsinhalte der betrieblichen Inspektion & Wartung zu den einzelnen Fristen können dabei variieren. Im Anhang ist in Abbildung 10-2 beispielhaft der Fristenplan einer Fahrzeugserie mit allen Fristen und den Inhalten von einer betrieblichen Inspektion & Wartung zur F1 abgebildet.

Die Festlegung der kostenorientierten Kennzahlen erfolgt anhand der Vorgaben des Fahrzeugbetreibers. Dabei werden die Sollwerte für die Kosten in einem definierten Zeitraum vorgegeben. Die Zielwerte werden über die Vorgaben aus dem Wirtschaftsplan und aus den Zielsetzungen laut Qualitätsreport festgelegt. Diese sind auf die gefahrenen Nutzwagenkilometer bezogen und sind damit leistungsabhängig definiert. Die Nutzwagenkilometer unterliegen ebenfalls der Planung des internen Kunden. Die Planung geht von einer Nutzwagenkilometerleistung von ca. 129.000 Nwkm und einem Verhältnis der Lohnkosten zu den Materialkosten von 6:1 aus.

Die Zielwerte für die qualitätsorientierten Parameter werden aus den Istwerten der vorangegangenen Jahre und aus der geforderten Fahrleistung abgeleitet. Weiterhin werden bei der Festlegung des angestrebten Instandhaltungsbedarf (siehe Definitionsteil) die Anzahl verschiedener Fahrzeugserien und Fahrzeugprofile berücksichtigt. Für den Betrachtungszeitraum wird ein durchschnittlicher Instandhaltungsbedarf von 9,8 % angestrebt. Der Zielwert für die fahrgastwirksamen Ausfälle Instandhaltungsbedarf (siehe Definitionsteil), als Orientierung an der Zufriedenheit der Fahrgäste, wird durch die Vorgaben des Fahrzeugbetreibers bestimmt. Er orientiert sich an den erreichten Werten aus den Vorjahren in Kombination mit Ergebnissen aus Befragungen der Fahrgäste hinsichtlich Kundenzufriedenheit. Im Untersuchungszeitraum sollen durchschnittlich maximal 5,7 fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nutzwagenkilometer auftreten.

6.2 Analyse der erhobenen Daten

Für eine Kostenanalyse werden zunächst die Gesamtkosten für die Instandhaltung die drei Kostenanteile der betrieblichen und der gesetzlichen Instandhaltung, sowie der Verbesserung betrachtet. Die Zuteilung der Instandhaltungsleistungsarten für betriebliche und gesetzliche Instandhaltung ist dem jeweiligen Abschnitt zu entnehmen.

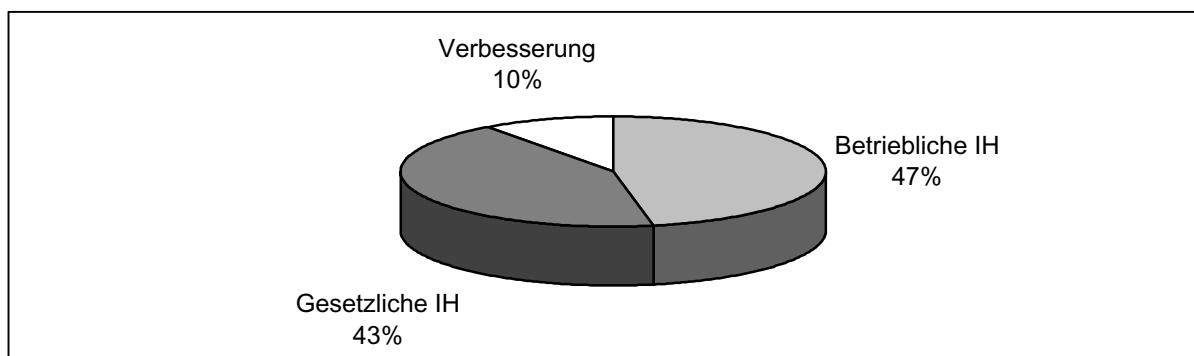


Abbildung 6-5: Aufteilung der Gesamtkosten für die Instandhaltung

Für die im Rahmen der Untersuchung betrachteten Instandhaltungsleistungsarten zusätzlich der Verbesserung, weist die betriebliche Instandhaltung mit ca. 47 % den größten Kostenanteil auf. Die gesetzliche Instandhaltung verursacht etwa 43 % und die Verbesserung 10 % der Kosten.

Die Verbesserung wird an dieser Stelle nur als Vergleichgröße einbezogen. Sie stellt einen wichtigen Teil in der Instandhaltung langfristig betriebener Fahrzeuge dar. In den folgenden Betrachtungen bleibt die Verbesserung unberücksichtigt, da sie einen Sonderbestandteil der Instandhaltung darstellt.

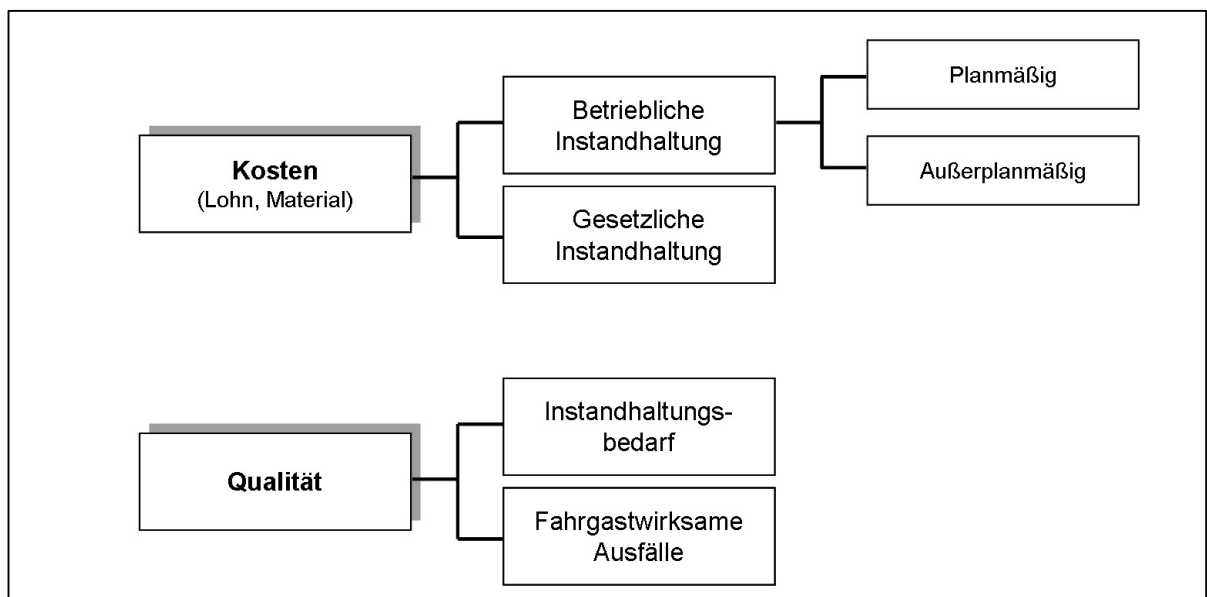


Abbildung 6-6: Gliederung der Analyse

Die weitere Analyse der erhobenen Daten wird in die Kategorien Kosten und Qualität unterteilt. Diese werden entsprechend Abbildung 6-6 im Bereich der Kosten in die Kosten für die betriebliche Instandhaltung und in die Kosten für die gesetzliche Instandhaltung gegliedert. Bei der betrieblichen Instandhaltung werden die planmäßigen und die außerplanmäßigen Kosten getrennt betrachtet. Im Bereich der Qualität erfolgt die Untersuchung getrennt nach fahrgastwirksamen Ausfällen und Instandhaltungsbedarf. Abschließend werden alle Analyseergebnisse gesamtheitlich in einer umfassenden Betrachtung untersucht sowie Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Abhängigkeiten herausgestellt.

Die tatsächliche Kilometerleistung liegt im Betrachtungszeitraum in Summe bei 125,97 Mio. Nwkm.

6.2.1 Analyse der Kosten für die betriebliche Instandhaltung

Die betriebliche Instandhaltung beinhaltet alle Vorgänge, die aus den nachfolgend genannten Instandhaltungsleistungsarten resultieren:

- Betriebliche Inspektion & Wartung (BIW),
- Zustandsorientierte Instandsetzung (pl & apl),
- Radprofilkorrektur (pl & apl),
- Baugruppenwechsel (pl & apl),
- Fehlersuche (pl & apl) und
- Diagnose/ Prüfung (pl & apl).

Zunächst werden die Gesamtkosten für die betriebliche Instandhaltung in die einzelnen Instandhaltungsleistungsarten aufgeteilt und anschließend nach Lohn- und Materialkosten getrennt.

Im Betrachtungszeitraum wurden insgesamt 47 % der Gesamtkosten aller betrachteten Instandhaltungsleistungsarten (vgl. Kapitel 6.1.3) für die betriebliche Instandhaltung ausgegeben. Dabei entfallen 38 % auf die zustandsorientierte Instandsetzung (pl & apl), 29% auf die betriebliche Inspektion & Wartung und 15 % auf den Baugruppenwechsel (pl & apl). Die restlichen 18 % verteilen sich auf die Diagnose und Prüfung (pl & apl), sowie auf die Fehlersuche (pl & apl) und auf die Radprofilkorrektur (pl & apl) (vgl. Abbildung 6-7). Diagnose & Prüfung verursachen 10 % und Fehlersuche 6 % der Gesamtkosten für die betriebliche Instandhaltung. Demnach fallen nur ca. 2 % der Kosten durch die Radprofilkorrektur an.

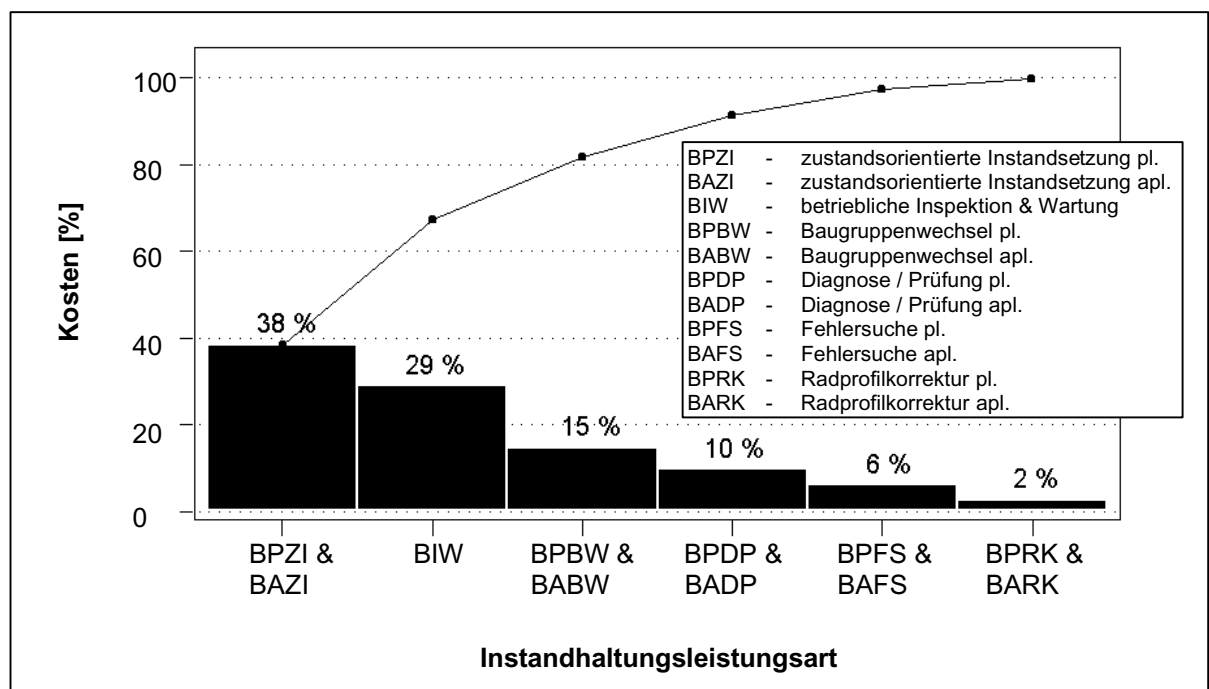


Abbildung 6-7: Kosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Instandhaltungsleistungsart

Die Maßnahmen infolge von Inspektion & Wartung und die Maßnahmen der außerplanmäßigen Instandhaltung nehmen demnach in Summe mehr als 70 % der Kosten ein. Das bedeutet, dass, bezogen auf die Arbeitsinhalte der betrieblichen Instandhaltung, weniger als ein Drittel tatsächlich planbar sind.

Die zustandsorientierte Instandsetzung, die Inspektion & Wartung und der Baugruppenwechsel haben in Summe über 80 % der Kosten für die betriebliche Instandhaltung verursacht. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten einer differenzierten Analyse unterzogen.

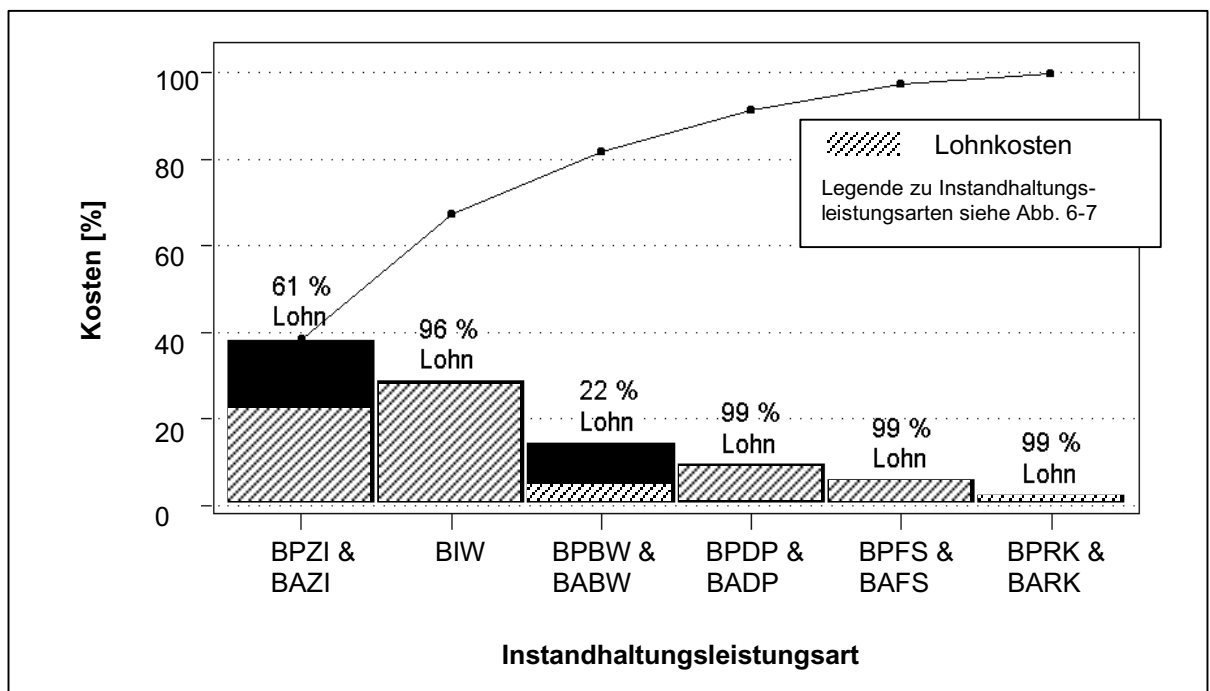


Abbildung 6-8: Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Instandhaltungsleistungsart

Betrachtet man allein die Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung (vgl. Abbildung 6-8), so wird deren entscheidender Einfluss auf die Inspektion & Wartung, die Diagnose & Prüfung, die Fehlersuche und die Radprofilkorrektur deutlich. Für diese vier Instandhaltungsleistungsarten liegen die Lohnkosten deutlich über 95%. Dabei treten im Bereich Inspektion & Wartung noch die größten Materialkostenanteile mit ca. 4 % auf. Diese sind auf Materialien zurückzuführen, die im Rahmen der Wartung verbraucht werden. Dagegen zeigt sich bei der zustandsorientierten Instandsetzung und dem Baugruppenwechsel eine andere Kostenverteilung. 61 % der Kosten der zustandsorientierten Instandsetzung resultieren aus Lohn. Beim Baugruppenwechsel trägt der Lohn nur noch einen Anteil von ca. 22%. Das Material gewinnt damit in beiden Bereichen an Bedeutung.

Das Material macht in Summe ca. 28 % der Kosten für die betriebliche Instandhaltung aus. Diese Kosten resultieren zu 95 % aus der zustandsorientierten Instandsetzung (54 %) und dem Baugruppenwechsel (41 %). Vertieft man den Einblick in die Materialkosten, ist festzustellen, dass 43 % der Materialkosten der zustandsorientierten Instandsetzung und 79 % der Materialkosten des Baugruppenwechsels aus dem Einsatz von selbst aufgearbeiteten Altteilen stammen. Die restlichen Materialien werden zugekauft.

Die Aufarbeitung der Altteile verursacht Lohn- und Materialkosten. Die aufgearbeiteten Teile werden in der Untersuchung jedoch rein den Materialkosten zugerechnet, da sie mit Zukaufteilen vergleichbar sind, deren Materialwert ebenfalls Lohnanteile enthält.

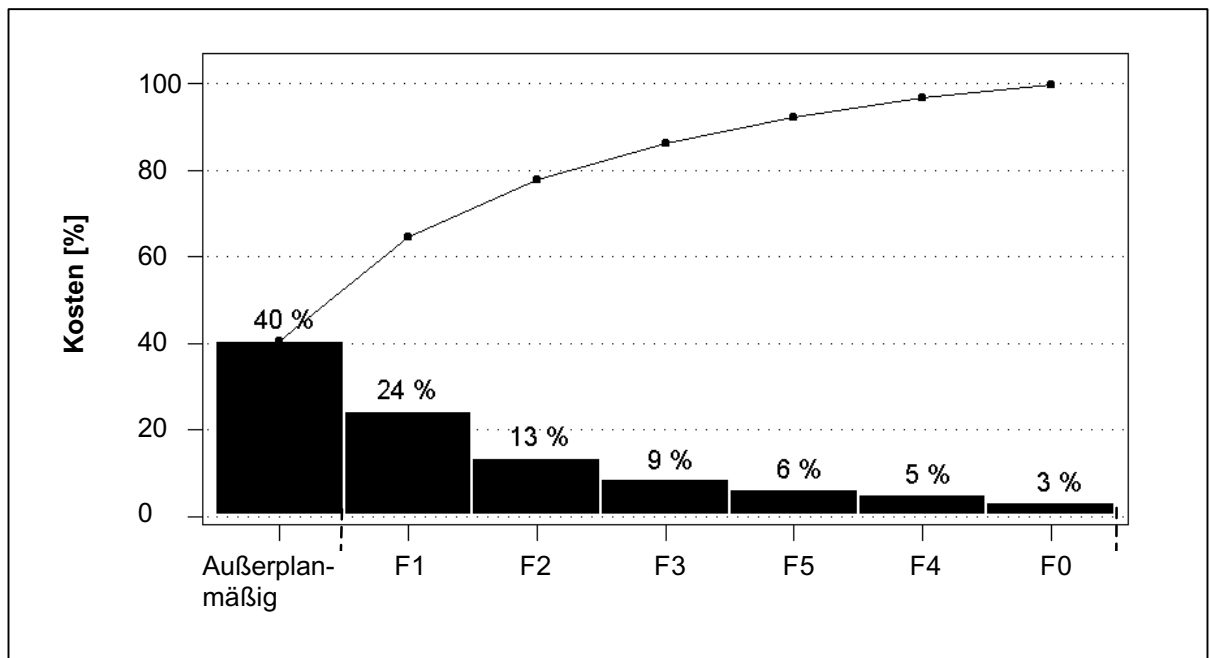


Abbildung 6-9: Kosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Fristenstufe

Die Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung, resultieren zu 38 % aus Kosten für Inspektion & Wartung, zu 32 % aus der zustandsorientierten Instandsetzung und zu 13 % aus Diagnose & Prüfung. Die restlichen 17 % fallen auf die anderen Instandhaltungsleistungsarten der betrieblichen Instandhaltung.

Der Analyse der Gesamtkosten für die betriebliche Instandhaltung in Abhängigkeit von den Instandhaltungsleistungsarten folgt die Aufschlüsselung der Kosten auf die planmäßige und die außerplanmäßige Instandhaltung. Innerhalb der planmäßigen Instandhaltung werden die Kosten nach den Arbeiten zu den einzelnen Fristen (Fristenarbeiten) differenziert. Das Pareto-Chart in Abbildung 6-9 zeigt die prozentualen

Anteile der Kosten für die Arbeiten unterschieden nach Fristenstufen und die der außerplanmäßigen Instandhaltung an den Gesamtkosten der betrieblichen Instandhaltung.

40 % aller Kosten der betrieblichen Instandhaltung resultieren aus außerplanmäßigen Vorgängen. Die Arbeiten zu den Fristen F1 und F2 tragen in Summe mit 37% einen etwas geringeren prozentualen Anteil an den Kosten für die betriebliche Instandhaltung, als die außerplanmäßige Instandhaltung. Dem Chart ist weiterhin zu entnehmen, dass die Fristenarbeiten zur F5 in Summe mehr Kosten verursachen, als die zur F4. Das ist auf den größeren Arbeitsumfang aufgrund der zur F5 vorgesehenen Luftrevision zurückzuführen. Die Arbeiten zur Frist F0 tragen, aufgrund ihrer Zuordnung zu einem speziellen Fahrzeugtyp (Fahrzeugserien S17-S19), hier mit 3 % nur einen sehr geringen Anteil. Sie stellt damit bezogen auf alle Fahrzeugserien einen Sonderfall dar, der aufgrund seiner Arbeitsinhalte der F1 zugeordnet ist.

Mit steigender Fristenstufe von F0 bis F5, nehmen die Arbeitsinhalte zu. Die jeweils nachfolgende Fristenstufe enthält die Inhalte der vorangegangenen und einen zusätzlichen Anteil. Die zeitliche Abfolge der einzelnen Fristenstufen und deren Inhalte sind beispielhaft einem Fristenplan im Anhang (Abbildung 10-2) zu entnehmen. Bei Kostenvergleichen zwischen den Arbeiten einzelner Fristenstufen werden immer die Kosten für alle Arbeiten einer Fristenstufe betrachtet, sofern diese nicht nach ihren Instandhaltungsleistungsarten aufgeteilt sind. Demnach sind alle Kosten, die der betrieblichen Inspektion & Wartung (BIW) und die Kosten infolge dieser, zusammengefasst betrachtet.

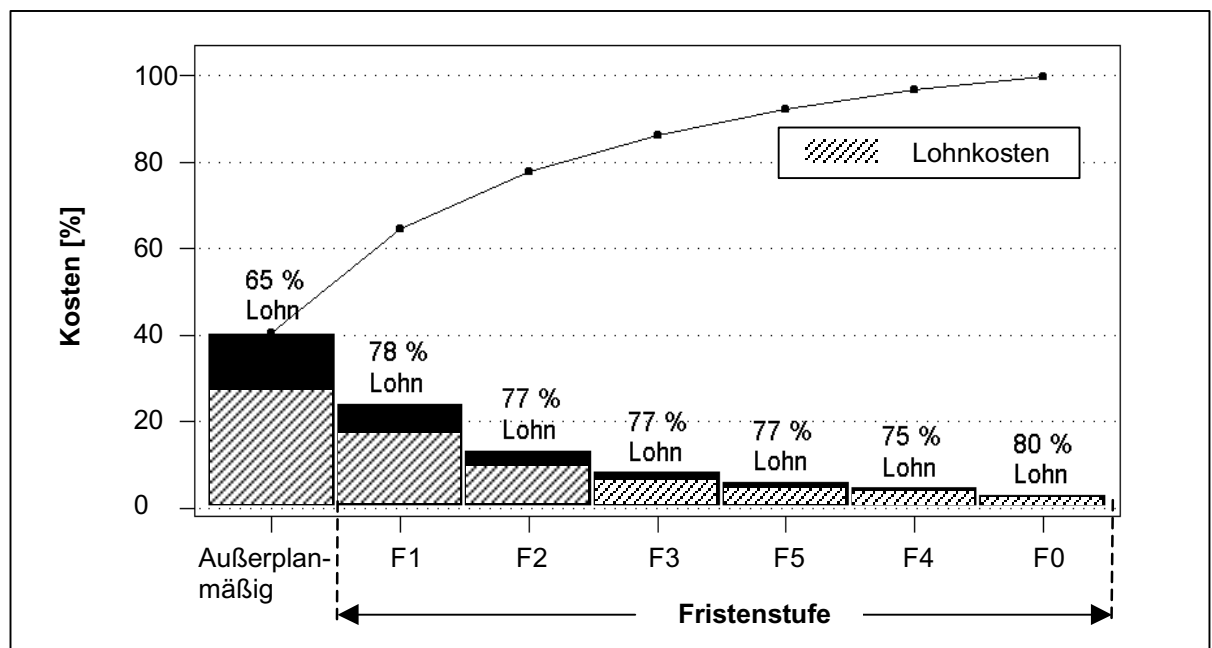


Abbildung 6-10: Lohnkosten der betrieblichen Instandhaltung in Abhängigkeit von der Fristenstufe

Der prozentuale Lohnanteil aller Fristenarbeiten liegt deutlich höher, als der der außerplanmäßigen Aufträge. Der hohe inspektionsbedingte Anteil der Fristenarbeiten verursacht einen durchschnittlichen Lohnkostenanteil von ca. 78 %. Bei den außerplanmäßigen Aktivitäten ist der Lohnanteil mit ca. 65 % deutlich niedriger, weil häufig fehlerhafte Bauteile die Ursache für einen Werkstattauftrag sind. Das Material hat daher bei der außerplanmäßigen Instandhaltung einen um mehr als 10 % größeren Anteil als bei der planmäßigen Instandhaltung (vgl. Abbildung 6-10).

Abschließend werden die Kosten für die Instandhaltungsleistungsarten der betrieblichen Inspektion & Wartung sowie für die zustandsorientierte Instandsetzung und den Baugruppenwechsel in Abhängigkeit vom Fahrzeugprofil analysiert.

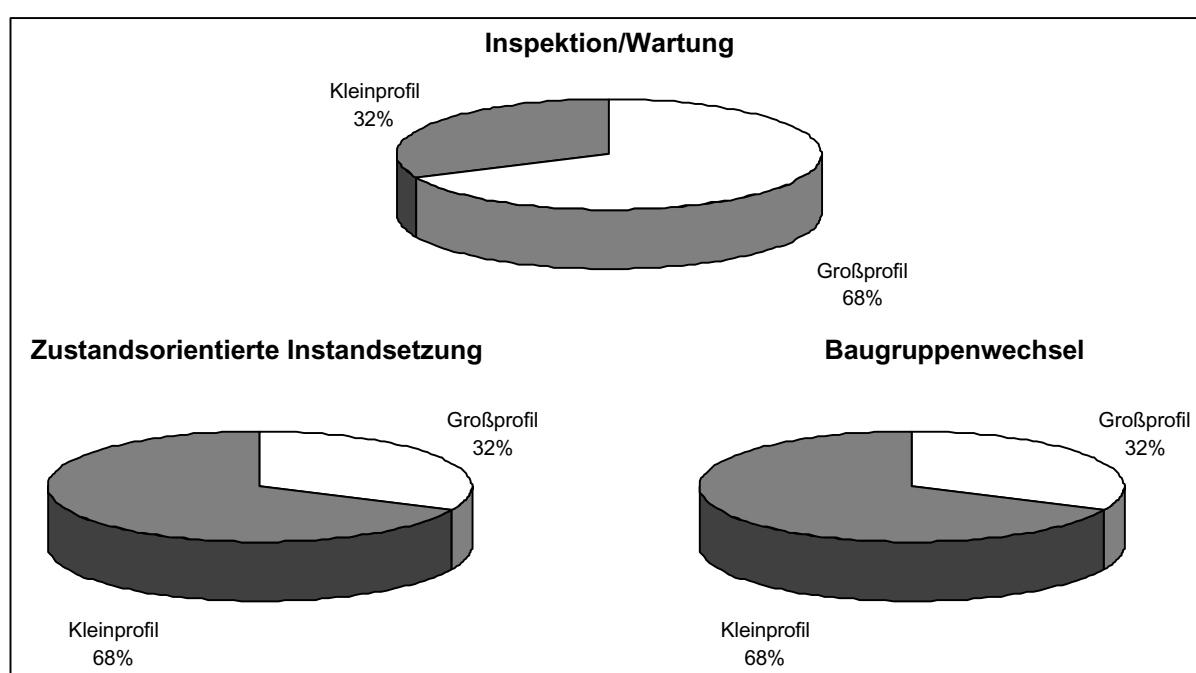


Abbildung 6-11: Kostenverteilung der Inspektion & Wartung, der zustandsorientierten Instandsetzung und des Baugruppenwechsels nach Fahrzeugprofil

Die Tortendiagramme zeigen, dass alle Großprofil-Fahrzeuge zusammen bei Inspektion & Wartung in Summe höhere Kosten verursachen, als die Summe aller Kleinprofil-Fahrzeuge. Im Gegensatz dazu stehen die Kosten der zustandsorientierten Instandsetzung und des Baugruppenwechsels. Beide verursachen im Kleinprofil deutlich höhere Kosten als im Großprofil.

Bei dieser Betrachtungsweise muss beachtet werden, dass die Anzahl der Fahrzeuge und die gefahrenen Kilometer für Groß- und Kleinprofil unterschiedlich sind. Im Großprofil wurden 948 und im Kleinprofil 518 Nutzwagen eingesetzt, die eine Kilometerleistung von ca. 82 Mio. Nwkm bzw. 44 Mio. Nwkm erreichten. Überträgt man diese Randbedingungen auf die Ergebnisse in Abbildung 6-11, folgt je Nutzwagen für die Kosten von Inspektion & Wartung ein Verhältnis Großprofil zu Kleinprofil von

1:0,85. Ganz anders bei der zustandsorientierten Instandsetzung und dem Baugruppenwechsel. Hier liegt das Verhältnis bei 1:3,9. Das bedeutet, dass das Kleinprofil bezogen auf den die drei betrachteten Instandhaltungsleistungsarten und den Nutzwagenkilometer deutlich höhere Kosten verursacht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in der betrieblichen Instandhaltung die Kosten zu über 80 % aus den Instandhaltungsleistungsarten Inspektion & Wartung, der zustandsorientierten Instandsetzung und dem Baugruppenwechsel resultieren. Dabei ist zu erkennen, dass Inspektion & Wartung im Vergleich zu den anderen beiden Instandhaltungsleistungsarten prozentual gesehen, den größten Lohnkostenanteil haben. Überträgt man die Kostenverteilung auf die Fristenarbeiten wird deutlich, dass die Arbeiten zu den Fristen F1 und F2 zusammen mit den außerplanmäßigen Ausfällen etwas weniger als 80 % ausmachen. Die weiteren Prioritäten liegen daher vornehmlich in der Analyse der genannten Instandhaltungsleistungsarten und der Untersuchung der Fristenarbeiten zu F1 und F2 sowie der außerplanmäßigen Ausfälle.

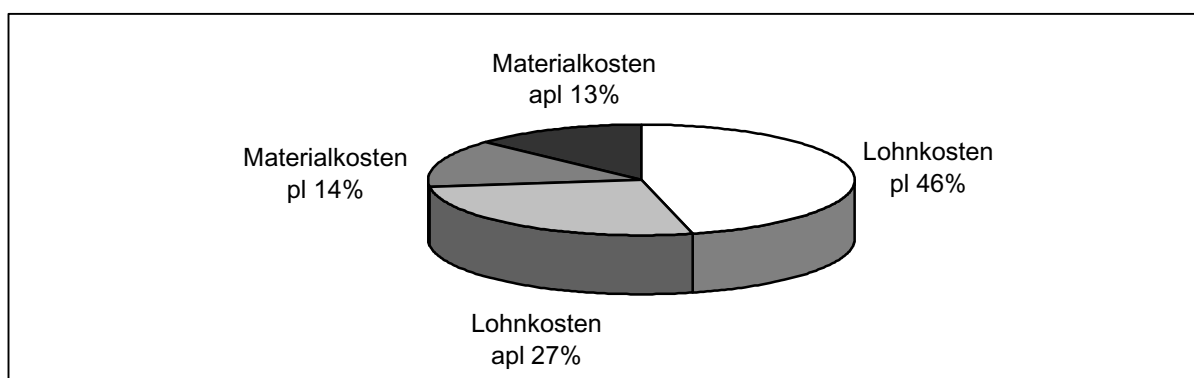


Abbildung 6-12: Kostenverteilung für die betriebliche Instandhaltung

Abbildung 6-12 fasst abschließend die prozentuale Aufschlüsselung der Kosten für die betriebliche Instandhaltung zusammen.

Im Folgenden werden die planmäßige und die außerplanmäßige Instandhaltung detailliert betrachtet.

Planmäßige Instandhaltung

Die planmäßige Instandhaltung wird aufgrund der Auswertungen im Kapitel 6.2.1 in die Arbeiten zu den Fristen F1 und F2 und deren Instandhaltungsleistungsarten aufgeteilt. Nachfolgend werden die durchschnittlichen Kosten für die einzelnen Fristenstufen je Fahrzeugserie untersucht. Dabei werden vertieft die Instandhaltungsleistungsarten Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung sowie Baugruppenwechsel betrachtet und analysiert.

Bei den Serien S17 bis S19 teilen sich die die Arbeiten zur F1 in zwei Teile. Die Kosten für jeweils ein Pärchen wurden bei der Erstellung der Datenbanken aufsummiert und werden hier als F1 betrachtet. Die Zusammenfassung der Einzelwerte gewährleistet die Vergleichbarkeit zu den anderen Fahrzeugserien.

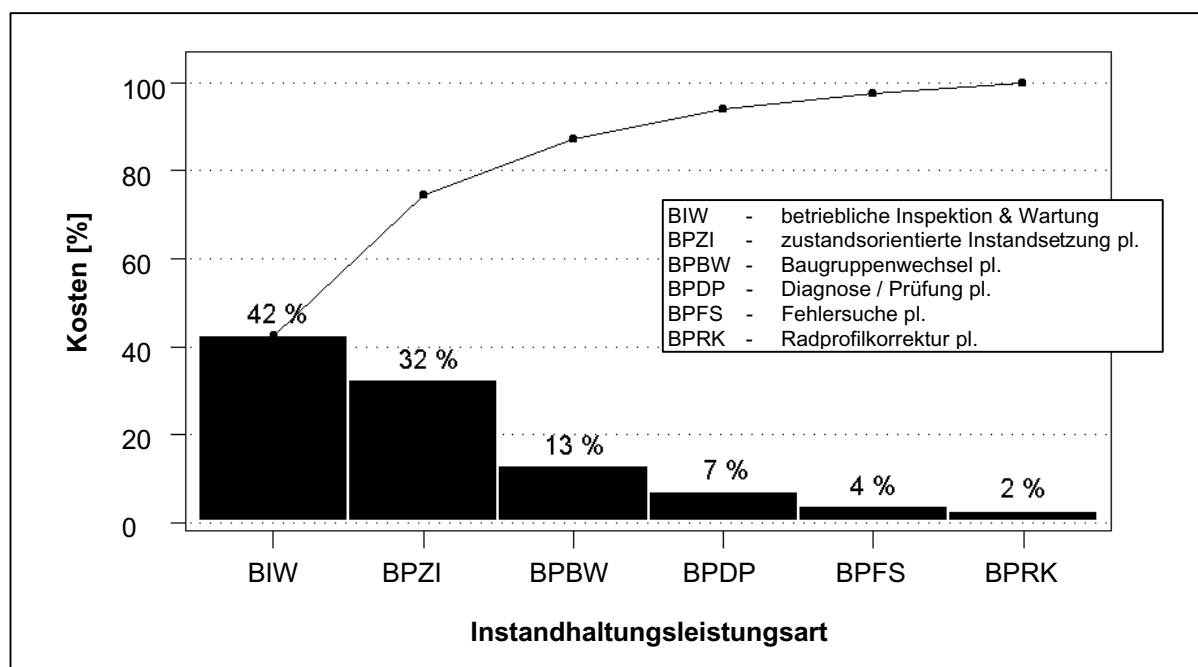


Abbildung 6-13: Gliederung der Kosten für die Arbeiten zur Frist F1

Insgesamt wurden 60 % der Kosten der betrieblichen Instandhaltung für die planmäßige Instandhaltung investiert. Über 80% dieser Kosten resultieren aus den Instandhaltungsleistungsarten der betrieblichen Inspektion & Wartung, der zustandsorientierten Instandsetzung (pl) und dem Baugruppenwechsel (pl) (vgl. Abbildung 6-13). Diese Tatsache unterstreicht die Ergebnisse der globalen Kostenanalyse für die betriebliche Instandhaltung, nach der diese Instandhaltungsleistungsarten den größten Kostenanteil an der betrieblichen Instandhaltung verursachen. Der Abbildung ist weiterhin zu entnehmen, dass die betriebliche Inspektion & Wartung mit 42 % den größten Kostenanteil für die Arbeiten zur F1 ausmacht.

Die Kosten für die Arbeiten zur Frist F2 (vgl. Abbildung 10-8 im Anhang) weisen eine ähnliche Zusammensetzung auf wie die für die F1. Der prozentuale Kostenanteil von betrieblichen Inspektion & Wartung ist für die Arbeiten zur F2 um ca. 4 % größer als bei der F1. Dagegen sind die Kosten bei der zustandsorientierten Instandsetzung (pl) und dem Baugruppenwechsel (pl) für die Arbeiten zur F2 um jeweils ca. 2 % niedriger. Die Summe aller Kosten für die Arbeiten zur F2 machen im Betrachtungszeitraum ca. 13 % der betrieblichen bzw. 22 % der planmäßigen Instandhaltung aus. Für die Arbeiten zu den beiden Fristen gilt zwar, dass die betriebliche Inspektion & War-

tung den größten Kostenanteil je Fristenstufe aufweist, der Kostenanteil infolge der Inspektion (Summe aller anderen Instandhaltungsleistungsarten) jedoch größer ist.

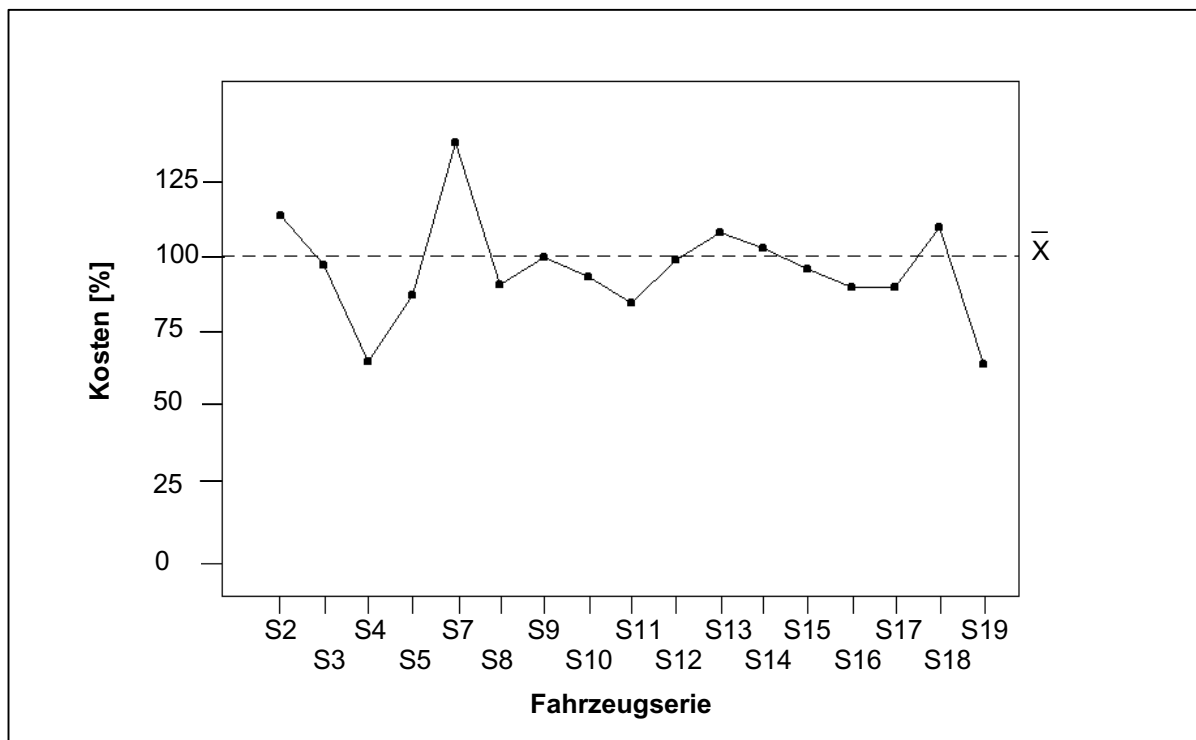


Abbildung 6-14: Durchschnittliche Gesamtkosten pro Nutzwagen für die Arbeiten zur Frist F1 in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie

Trägt man die durchschnittlichen Kosten der planmäßigen Instandhaltung pro Nutzwagen für die Arbeiten je F1 wie in Abbildung 6-14 über den Fahrzeugserien auf, so sind die Unterschiede zwischen diesen zu erkennen. Die gestrichelte Linie gibt dabei den arithmetischen Mittelwert aller Fahrzeugserien an. Die Serie S7 weist die größten, die Serie S19 die geringsten durchschnittlichen Kosten für einen Nutzwagen je F1 auf. Aufgrund dieser Ergebnisse sind besondere Maßnahmen für die Serie S7 angezeigt. Dazu wurde ein Testzug, mit dem Ziel der Reduzierung von Ausfällen und Kosten, umgebaut. Es wurden u. a. die Pneumatik und die Bremsanlage komplett erneuert und das Schaltwerk durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung ersetzt. Wenn mit dem Umbau die gewünschten Ergebnisse erzielt werden, folgt sukzessive der Umbau aller Doppeltriebwagen dieser Serie. Der Umbau der Serie S7 wurde aufgrund anderer Untersuchungen veranlasst und ist damit nicht Ergebnis dieser Untersuchung.

Die Serien S2, S13, S14 und S18 weisen für die Arbeiten zur Frist F1 überdurchschnittlich hohe Kosten auf. Dagegen liegen die Serien S4, S5, S11 und S19 je F1 deutlich unter dem Durchschnitt. Die Fahrzeuge der Serie S4 hat im Betrachtungszeitraum nur selten die Laufleistungsgrenze für Fristenarbeiten zur F1 erreicht. Daher wurden hier in Summe nur sehr wenige Arbeiten durchgeführt. Der Wert wird somit

nicht als repräsentativ für die gesamte Fahrzeugserie angesehen. Vergleicht man die Serien S2 und S19 ist festzustellen, dass durchschnittlich die Arbeiten zur F1 die Serie S2 115 % und die S19 65 % des Mittelwertes aller Fristenarbeiten zur F1 ausmacht. Zum Vergleich wird der Mittelwert als Referenzmarke mit 100 % angegeben.

Ausgehend vom statistischen Standpunkt stellt sich hier die Frage, ob die Mittelwerte der Fahrzeugserien verschieden genug sind, um signifikant, zu sein. Für eine Festigung der Aussagen über Unterschiede z. B. bei den Fahrzeugserien, wurden daher Hypothesentests durchgeführt. Basis dieser Tests bildet die Nullhypothese. Sie besagt, dass beide Fahrzeugserien aus derselben Grundgesamtheit stammen, d. h. kein statistischer Unterschied zwischen den Fahrzeugserien besteht. Um zu zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit gering ist, dass die Mittelwerte der Kosten für die Fristen der beiden Fahrzeugserien aus demselben Instandhaltungsprozess stammen, muss die Nullhypothese widerlegt werden. Unter Zuhilfenahme der Statistik wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass der Unterschied zufällig zustande gekommen ist. Dies gilt, wenn die Nullhypothese richtig ist. Diese Wahrscheinlichkeit wird p-Wert genannt. Die Ermittlung des p-Wertes erfolgt über eine Referenzverteilung, die sich unter Annahme der Nullhypothese ergibt. Abhängig von den zu vergleichenden Werten, werden verschiedene Referenzverteilungen eingesetzt. Für einen Vergleich zweier Mittelwerte eignet sich die „Students t-Verteilung“, die 1908 von William Sealey Gosset entwickelt wurde. Sollen die Mittelwerte von mehr als zwei Stichproben miteinander verglichen werden, empfiehlt sich eine Varianzanalyse. Mit ihr kann ermittelt werden, ob sich eine oder mehrere Stichproben signifikant von der ein oder anderen unterscheiden oder nicht.

Für den hier notwendigen Vergleich zweier Fahrzeugserien, wurde ein Test basierend auf der Students t-Verteilung durchgeführt. Dieser ergab eine Wahrscheinlichkeit (p-Wert) von 0,000. Damit ist die Nullhypothese eindeutig widerlegt. Die Mittelwerte für die Kosten basieren auf unterschiedlichen Prozessen. Tests dieser Art wurden für die nachfolgenden auf Mittelwerten beruhenden Vergleiche durchgeführt. Im Anhang ist beispielhaft das Ergebnis eines solchen Tests in Abbildung 10-11 dargestellt.

Die Materialkosten werden für die Fristenstufe F1 größtenteils durch Defekte der Lufttrocknungsanlagen, der Pneumatik und der Stromabnehmer verursacht. Die Lohnkosten resultieren neben der Inspektion und Wartung größtenteils aus Radprofilierung und Fehlersuche.

Nachfolgend werden die Kosten für die Fristenarbeiten zur F1 für alle Fahrzeugserien in die drei Instandhaltungsleistungsarten mit den größten Kosten [betriebliche Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung (pl), Baugruppen-

wechsel (pl)] aufgeteilt und einzeln durchleuchtet (vgl. Abbildung 6-15). Die 100 % Angabe der Kosten entspricht der 100 %-Marke aus Abbildung 6-14. Die Charts spiegeln den Unterschied im Klein- und Großprofil wider. Während die Kleinprofilserien für Inspektion und Wartung ausschließlich unterdurchschnittliche Kosten für die Arbeiten zur Frist F1 aufweisen, liegt ein Großteil der Fahrzeugserien aus dem Großprofil oberhalb des Mittelwertes. Für die zustandsorientierte Instandsetzung (pl) und den Baugruppenwechsel (pl) liegen fast alle Serien des Großprofils unter dem Durchschnitt. Für diese Instandhaltungsleistungsarten entstehen für nahezu alle Kleinprofilserien überdurchschnittlich hohe Kosten. Ursache hierfür sind u. a. die verschiedenen Umfänge in der betrieblichen Inspektion & Wartung und damit eine Verschiebung der Kosten für die auftretenden Arbeiten zu nachgelagerten Instandhaltungsleistungsarten.

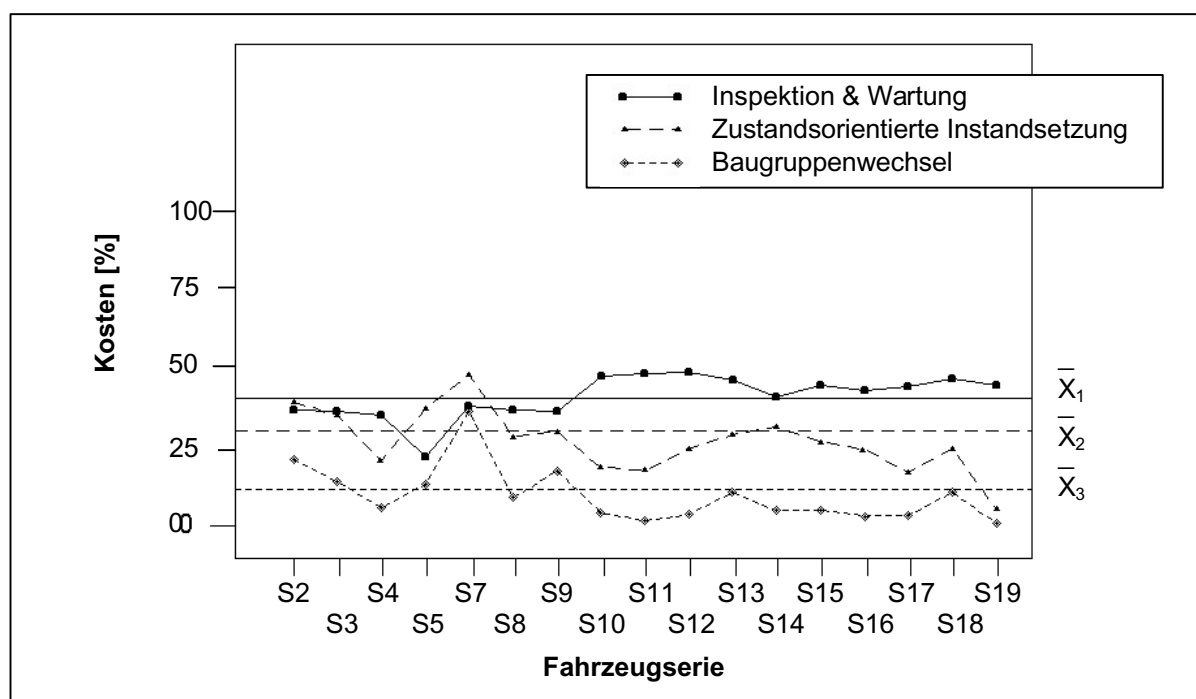


Abbildung 6-15: Durchschnittliche Kosten pro Nutzwagen für Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung und Baugruppenwechsel einer Frist F1

Im Betrachtungszeitraum wurden 13 % der Kosten für die betriebliche Instandhaltung durch die Arbeiten zur Frist F2 verursacht. Die Charts im Anhang zeigen die durchschnittlichen Kosten je Frist F2 für die einzelnen Fahrzeugserien und einen Vergleich der durchschnittlichen Kosten für die Instandhaltungsleistungsarten der betrieblichen Inspektion & Wartung, der zustandsorientierten Instandsetzung (pl) und dem Baugruppenwechsel (pl). Diese drei haben auch hier den größten Anteil an den Kosten für die Arbeiten zur F2.

Die durchschnittlichen Kosten bei der F2 haben in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie ein leicht verändertes Bild im Gegensatz zur F1. Die Fahrzeugserien S5 und S13

zeigen im Vergleich der Kosten für die Fristenarbeiten die größten Unterschiede. Beide haben im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugserien eine überdurchschnittliche Kostenzunahme von F1 zu F2. So kosten die Arbeiten zur F2 für die S13 im Mittel 22 % mehr als die Arbeiten zur F2 im Durchschnitt über alle Fahrzeuge. Die Höchstmarke setzt auch hier die Serie S7 mit 146 % des Mittelwertes aller Serien. Die Serien S17 bis S19 weisen für die Arbeiten zur F2, wie teilweise auch schon für die Frist F1, im Durchschnitt niedrige Kosten auf. Bei der Serie S19 entstehen im Mittel aller Fahrzeuge nur 50 % der durchschnittlichen Kosten für die Fristenarbeiten zur F1. Die geringsten durchschnittlichen Kosten werden durch die Serie S17 verursacht. Allerdings wurden für diese im Betrachtungszeitraum nur sehr wenige Fristen durchgeführt, sodass der angegebene Mittelwert nicht repräsentativ für die gesamte Fahrzeugserie ist.

Erweitert man die Betrachtung der Arbeiten zur Frist F2 durch eine Gliederung in die Instandhaltungsleistungsarten mit dem höchsten Kostenanteilen spiegelt diese ein vergleichbares Bild wie bei der F1 wider. Im Kleinprofil ist der Kostenanteil von zustandsorientierter Instandsetzung (pl) und Baugruppenwechsel (pl) im Verhältnis zu den Kosten für die betriebliche Inspektion & Wartung größer als im Großprofil. Allerdings verschiebt sich bei der Frist F2 der prozentuale Anteil zwischen den Instandhaltungsleistungsarten. Durchschnittlich kosten die Arbeiten zu einer F2 107 % einer Frist F1. Für die zustandsorientierte Instandsetzung (pl) steigen die Kosten nur auf 102 %. Dagegen steigen die durchschnittlichen Kosten bei betrieblicher Inspektion & Wartung sowie beim Baugruppenwechsel (pl) von F1 zu F2 auf 113 % bzw. 115%.

Außerplanmäßige Instandhaltung

Im Untersuchungszeitraum verursachte die außerplanmäßige Instandhaltung 40 % der Kosten der betrieblichen Instandhaltung. Die Tatsache, dass innerhalb eines Fristensystems ein so großer Kostenanteil für zusätzliche Arbeiten aufgewendet werden muss, wirft die folgenden Fragen nach den Ursachen auf:

- Wie hoch sind die durchschnittlichen Kosten für außerplanmäßige Aufträge?
- Welche Instandhaltungsleistungsarten tragen bei der außerplanmäßigen Instandhaltung den größten Kostenanteil?
- Wie groß ist der Einfluss der Fahrzeugserie auf die Kosten?
- Wie verteilen sich die durchschnittlichen Kosten innerhalb der Fahrzeugserien?

Zur Analyse der außerplanmäßigen Instandhaltung werden die Kosten nach Instandhaltungsleistungsarten gegliedert. Weiterhin werden die einzelnen Fahrzeugserien untereinander verglichen.

Das Pareto Chart in Abbildung 6-16 zeigt die prozentualen Anteile der Instandhaltungsleistungsarten für die außerplanmäßige Instandhaltung. Die zustandsorientierte Instandsetzung (apl) trägt mit 51 % den größten Kostenanteil, gefolgt vom Baugruppenwechsel (apl) mit 20 %. Beide Instandhaltungsleistungsarten resultieren aus defekten Bauteilen. Die Suche nach der Ursache für den Fahrzeugausfall, d. h. Fehlersuche (apl) sowie Diagnose & Prüfung (apl) verursachen zusammen mehr als ein Viertel der außerplanmäßigen Kosten.

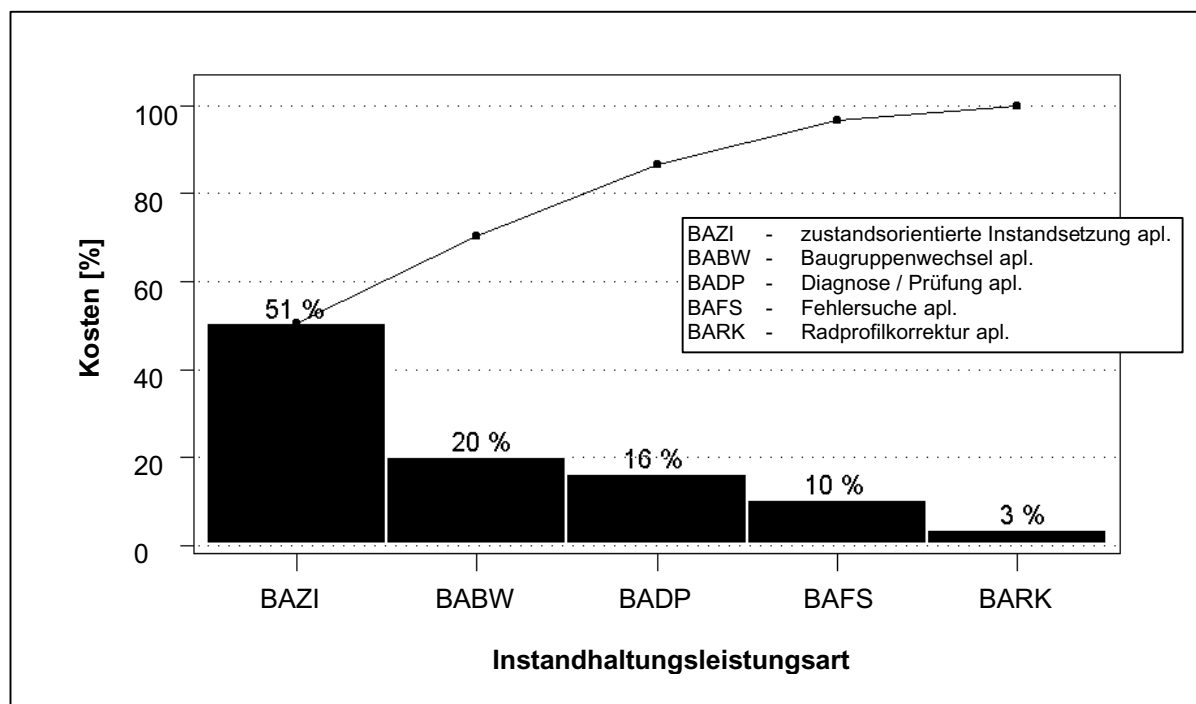


Abbildung 6-16: Aufteilung der Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung auf die Instandhaltungsleistungsarten

Ferner werden die Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung auf die Gesamtkosten je Fahrzeugserien aufgeschlüsselt. Abbildung 10-12 im Anhang zeigt, dass 19 % der Kosten nicht direkt einer Fahrzeugserie zuzuordnen sind. Diese resultieren größtenteils aus Daueraufträgen, z. B. für Umbauten. Da Umbauten Elemente der Verbesserung darstellen, werden die Kosten für die Daueraufträge nicht weiter analysiert. Mit 18 % trägt die Serie S7 einen überdurchschnittlich großen Anteil an den Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung.

In dieser Darstellung sind jeweils die Kostensummen aller Nutzwagen jeder Fahrzeugserie aufgezeigt. Es kann daher nicht direkt darauf geschlossen werden, welche Serie pro Nutzwagen die größten Kosten verursacht. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Kosten der einzelnen Serien weiter aufgeschlüsselt. Die 100 % Angabe der Kosten in Abbildung 6-17 entspricht der 100 %-Marke aus Abbildung 6-14.

In Abbildung 6-17 sind die durchschnittlichen monatlichen Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Serie S7 nicht nur bei den Gesamtkosten der außerplanmäßigen Instandhaltung, sondern auch bezogen auf den Nutzwagen (230 % im Vergleich zu den Durchschnittskosten) die größten Kosten verursacht. Die Kosten für diese Serie liegen hier, wie auch schon bei der Untersuchung der Fristenstufen, weit über dem Mittelwert. Im Gegensatz dazu sind die Fahrzeuge der noch relativ jungen Serien (Alter unter 10 Jahre) S17 (82 %) bis S19 (26 %), aber auch die älteren Fahrzeugserien S3 (65 %) und S8 (52 %) deutlich kostenärmer. Festzustellen ist, dass die Großprofilfahrzeuge durchschnittlich weniger Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung verursachen als die Kleinprofilfahrzeuge. Diese Aussage wird gestützt durch das Tortendiagramm in Abbildung 6-18, das die Kostenverteilung im Betrachtungszeitraum zwischen Klein- und Großprofil für die außerplanmäßige Instandhaltung zeigt.

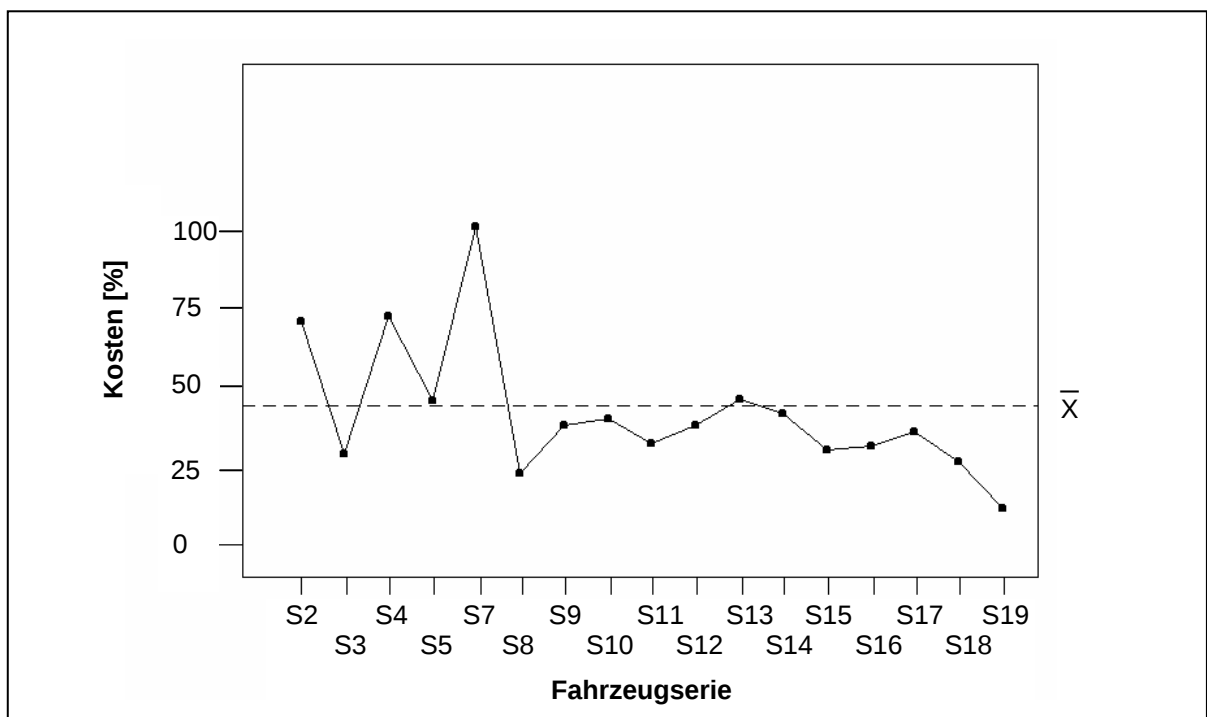


Abbildung 6-17: Durchschnittlich monatliche Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung je Fahrzeugserie

Das Kleinprofil hat einen Anteil von fast 60 % an den außerplanmäßigen Kosten. Allerdings stammen nur ca. 37 % im Betrachtungszeitraum eingesetzten Nutzwagen aus dem Kleinprofil. Teilt man diese Kosten weiter nach ihren Instandhaltungsleistungsarten auf, so beträgt der Kostenanteil des Kleinprofils für die zustandsorientierte Instandsetzung (apl) 80 % und für den Baugruppenwechsel (apl) 63 %. Daran wird deutlich, dass die Kosten für die außerplanmäßigen Arbeiten durch das Kleinprofil geprägt sind.

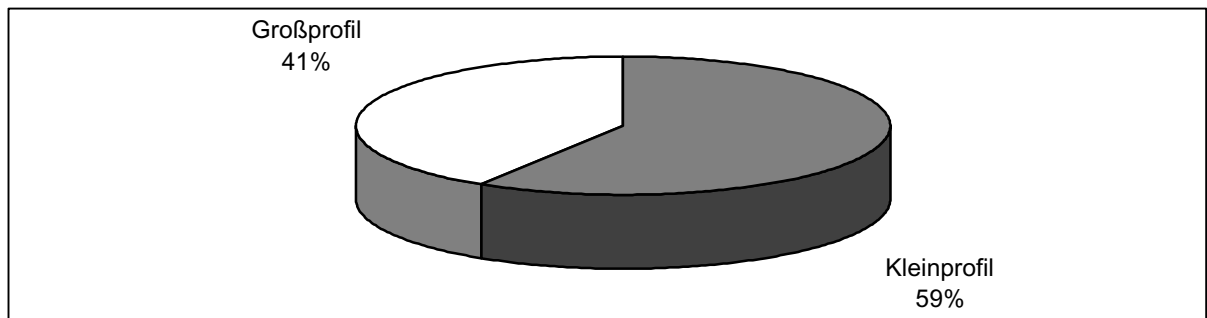


Abbildung 6-18: Kostenverteilung für die außerplanmäßigen Arbeiten in Abhängigkeit vom Fahrzeugprofil

Vergleichend dazu stehen die Ergebnisse der planmäßigen Instandhaltung. Das Kleinprofil hat dort einen Kostenanteil von 75 % am Baugruppenwechsel (pl) und von 57 % an der zustandsorientierten Instandsetzung (pl).

Die Kostenunterschiede zwischen den Fahrzeugserien nach Abbildung 6-17 machen es notwendig, eine Analyse hinsichtlich der Kostenverursacher durchzuführen. Diese ergab, dass an nachfolgend genannten Baugruppen unkontrolliert Schäden auftreten, die hohe Kosten zur Folge haben:

- Türen,
- Kupplungsautomaten,
- Umformer,
- Heizregister,
- Antriebe und
- Bremsen.

Zusammenfassung der Analyseergebnisse für die betriebliche Instandhaltung

Die betriebliche Instandhaltung hat im Betrachtungszeitraum einen Kostenanteil von 47 % an den Gesamtkosten. Mehr als 80 % der Kosten der betrieblichen Instandhaltung resultieren aus Inspektion & Wartung (29 %), zustandsorientierter Instandsetzung (38 %) sowie Baugruppenwechsel (15 %). Dabei sind die beiden letztgenannten Instandhaltungsleistungsarten Arbeiten infolge einer Frist oder der außerplanmäßigen Instandhaltung zuzuordnen. Sie werden somit zu einem nicht kalkulierbaren Faktor in der Planung der Instandhaltungsressourcen. Sie spiegeln wider, dass die Inhalte und Intervalle der geplanten Fahrzeuginstandhaltung und das Abnutzungsverhalten der einzelnen Baugruppen nicht aufeinander abgestimmt sind. Dadurch steigt die Ausfallquote der Bauteile und dementsprechend erhöhen sich die Kosten für Instandhaltung, die fahrgastwirksamen Ausfälle und der Instandhaltungsbedarf.

Bezogen auf die betriebliche Instandhaltung arbeitet die vier Jahre alte Fahrzeugserie S19 am kostengünstigsten. In allen Bereichen liegt sie weit unter den Mittelwerten

der anderen Serien. Im Gegensatz dazu verursachen die älteren Fahrzeugserien S2 und S7 bezogen auf einen Nutzwagen, überall die höchsten Kosten. Insgesamt ist allerdings nicht zu erkennen, dass junge Fahrzeuge weniger Kosten verursachen als alte.

In Summe haben die Arbeiten zur Frist F1 einen Kostenanteil von 24 % an der betrieblichen Instandhaltung, die zur F2 13 %. Durchschnittlich kostet die Arbeiten zu einer F2 107 % einer F1. Die Steigerung ist hauptsächlich durch den größeren Umfang von Inspektion & Wartung (113 %) und durch höhere Kosten beim Baugruppenwechsel (115 %) zurückzuführen. Bezogen auf alle Fristenarbeiten wird festgestellt, dass insgesamt ein sehr hoher Kostenanteil für Arbeiten infolge Inspektion & Wartung anfällt.

Weiterhin zeigt sich, dass die Fahrzeuge aus dem Kleinprofil durchschnittlich weniger Kosten für die Fristenarbeiten verursachen als die aus dem Großprofil. Im Gegensatz dazu sind die Kleinprofilfahrzeuge in der außerplanmäßigen Instandhaltung weitaus teurer.

Die außerplanmäßige Instandhaltung hat einen Anteil von 40 % an der betrieblichen Instandhaltung. Dieser resultiert zu 65 % aus Lohnkosten. Hauptverursacher davon sind die Fahrzeugserien S2, S4 und S7. Sie erzeugen im Durchschnitt weit mehr als 150 % des Kostenmittelwertes aller Fahrzeugserien für die außerplanmäßige Instandhaltung. Dagegen zeigen sich die Serien S19 mit 26 %, S8 mit 52 % und S18 mit 60 % des Durchschnitts deutlich kostengünstiger.

6.2.2 Analyse der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung (BOStrab)

Die gesetzliche Instandhaltung beinhaltet alle Vorgänge, die aus den nachfolgend genannten Instandhaltungsleistungsarten resultieren:

- Gesetzliche Inspektion & Wartung (GIW) und
- Instandsetzung infolge GIW.

Nach den Vorschriften zur Instandhaltung von Straßenbahnfahrzeugen, sind Fahrzeuguntersuchungen im Rhythmus von acht Jahren oder spätestens nach einer Fahrleistung von 500.000 km vorgeschrieben. Das bedeutet, dass nach Erreichen dieser Eckdaten eine gesetzliche Inspektion & Wartung und gegebenenfalls erforderliche Instandsetzungsarbeiten infolge dieser durchzuführen sind. Die Berliner Verkehrsbetriebe weiten die gesetzlichen Mindestanforderungen aus und führen zusätzliche Arbeiten durch. Diese beinhalten z. B. die Trennung von Drehgestell und Wagenkasten. Damit werden in der gesetzlichen Inspektion & Wartung nicht nur die ge-

setzlich vorgeschriebenen Inhalte sondern auch „freiwillig“ auferlegte Tätigkeiten und deren Kosten erfasst.

Die geplante Kilometerleistung für Gleichstromfahrzeuge beträgt 650.000 km und für Drehstromfahrzeuge 750.000 km. Für einige Fahrzeuge wurden Kilometerleistungen bis zu 1 Mio. km angestrebt.

Neben der gesetzlichen Inspektion & Wartung entstehen auch für die gesetzliche Instandhaltung Instandsetzungsarbeiten infolge von Voruntersuchungen. Die dadurch entstehenden Kosten fließen in die Instandhaltungsleistungsart Instandsetzung infolge GIW ein.

Im Betrachtungszeitraum verursachte die gesetzliche Instandhaltung insgesamt 43 % der Kosten aller in die Untersuchung einbezogenen Instandhaltungsleistungsarten.

Zunächst werden die Kosten für die gesetzliche Instandhaltung als Gesamtheit je Nutzwagen betrachtet. Die Analyse setzt sich über die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Kosten und der Kilometerleistung sowie Fahrzeugprofil und Fahrzeugserien fort. Weiterhin wird die Abhängigkeit zwischen den Kosten und den Instandhaltungsleistungsarten durchleuchtet.

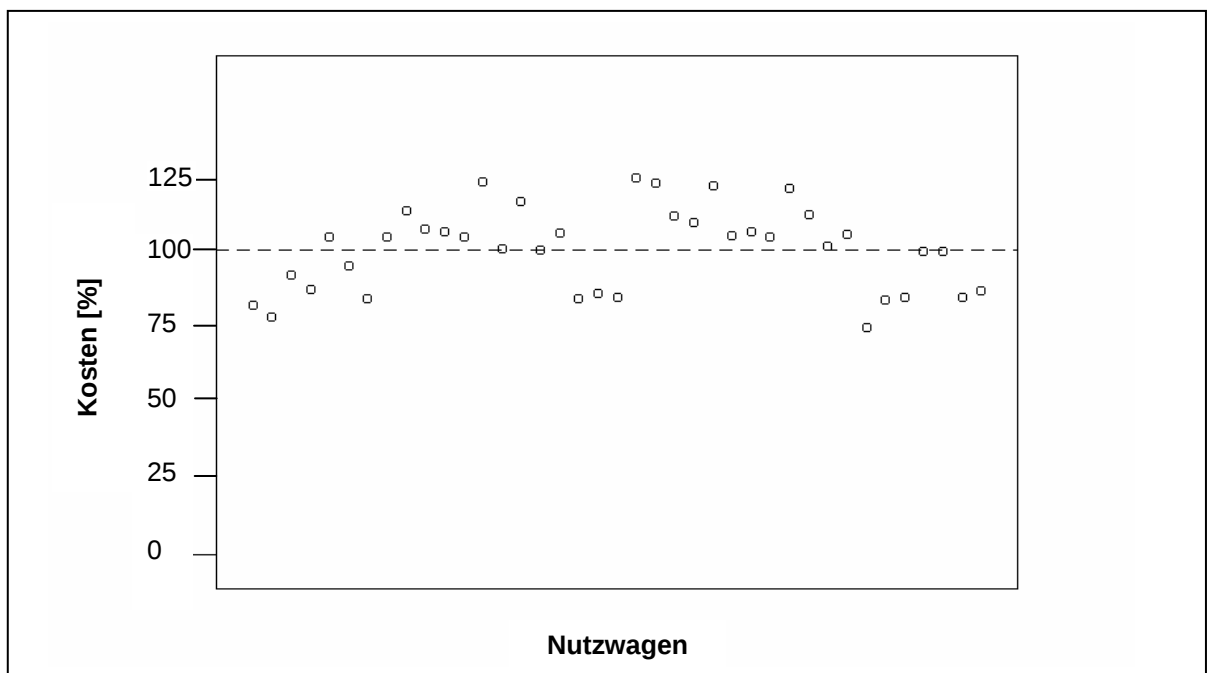


Abbildung 6-19: Kosten für die gesetzliche Instandhaltung je Nutzwagen

Im Betrachtungszeitraum wurde an Fahrzeugen der Serien S5, S10 bis S13 und S16 bis S19 eine gesetzliche Instandhaltung durchgeführt. In die weitere Betrachtung werden Fahrzeuge der Serien S17 bis S19 allerdings nicht einbezogen, da diese erstmalig einer gesetzlichen Instandhaltung zugeführt wurden und somit aufgrund

intensivster Untersuchungen eine überdurchschnittlich lange Standzeit aufwiesen. Dementsprechend verursachten diese Fahrzeugserien auch höhere Kosten.

Jeder Punkt in Abbildung 6-19 symbolisiert die Gesamtkosten aller Tätigkeiten im Rahmen einer gesetzlichen Instandhaltung nach §57 BOStrab für jeweils einen Nutzwagen. Die gestrichelte Linie gibt den arithmetischen Mittelwert der Kosten aus allen im Betrachtungszeitraum durchgeführten gesetzlichen Instandhaltungen an (ohne S17 bis S19).

Die Punktwolke gibt einen Überblick über die Schwankungen der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung. Legt man fest, dass der Mittelwert 100 % sei, liegen das Minimum bei 75 % und der Maximalwert bei 124 %. Welches sind die Ursachen für die Kostenunterschiede? Dazu werden die Abhängigkeiten zwischen den Gesamtkosten, den Lohn- und Materialkosten sowie den gefahrenen Kilometern analysiert.

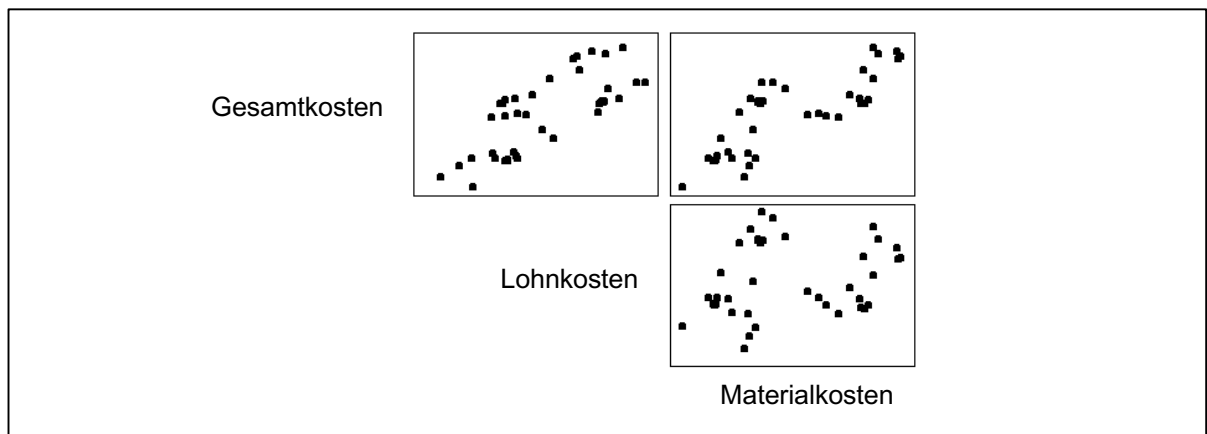


Abbildung 6-20: Zusammenhang zwischen den Gesamtkosten, den Lohnkosten und den Materialkosten der gesetzlichen Instandhaltung

Die Matrixdarstellung (jeder Punkt symbolisiert einen Nutzwagen) zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Gesamtkosten für die gesetzliche Instandhaltung und den darin enthaltenen Lohnkosten. Da die Kosten für Inspektion & Wartung über alle Fahrzeugserien nahezu konstant sind, lässt sich ableiten, dass die Lohnkosten für die Instandsetzung infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung, bezogen auf die einzelnen Nutzwagen, großen Schwankungen unterliegen. Die Materialkosten zeigen ebenfalls eine steigende Tendenz mit zunehmenden Gesamtkosten. Allerdings weisen sie eine größere Streuung als die Lohnkosten auf. Diese wird durch die Instandsetzung kostenintensiver Bauteile und Baugruppen erklärt. Zwischen Lohn- und Materialkosten ist kein direkter Zusammenhang erkennbar.

Die Einbeziehung der Kilometerleistung seit der vorangegangenen BOStrab in die Untersuchung erfolgt wie in Abbildung 10-13 im Anhang dargestellt. Die Grafik zeigt,

dass die Kilometerleistung seit der vorangegangenen gesetzlichen Instandhaltung zwischen ca. 490.000 km und 930.000 km schwankt. Bezogen auf die Antriebsart wurden die Gleichstromfahrzeuge zwischen 490.000 km und 640.000 km und die Drehstromfahrzeuge zwischen 590.000 km und 930.000 km gefahren.

Es wird gezeigt, dass die gefahrene Kilometerleistung seit der letzten gesetzlichen Instandhaltung keinen direkten Einfluss auf die Lohn- und Materialkosten für Inspektion, Wartung und Instandsetzung hat. Selbst bei sehr hohen Kilometerleistungen werden teilweise nur geringe Kosten verursacht.

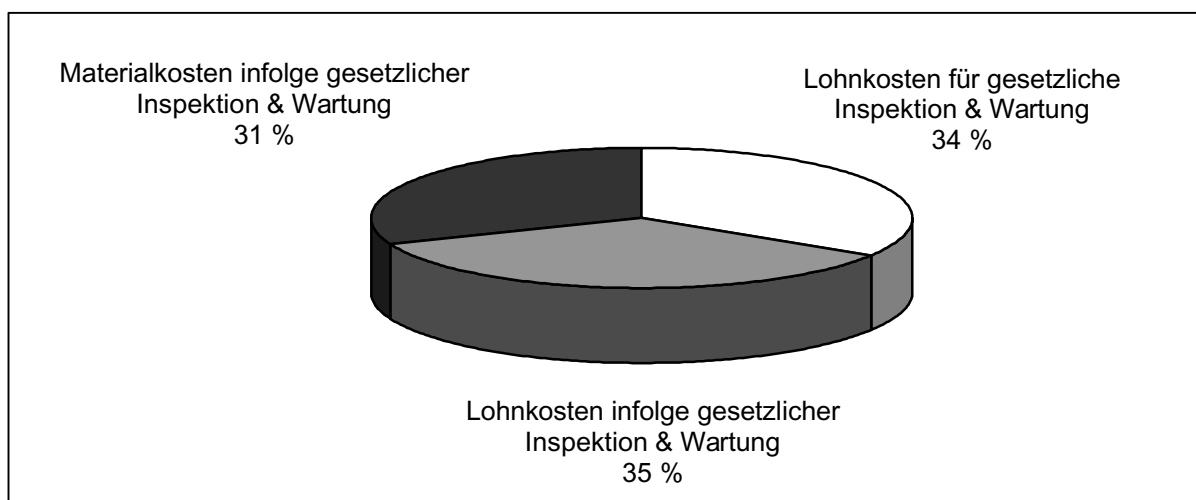


Abbildung 6-21: Kostenaufteilung für die gesetzliche Instandhaltung hinsichtlich Lohn und Material

Gliedert man die Gesamtkosten für alle Nutzwagen, die im Betrachtungszeitraum einer gesetzlichen Instandhaltung unterzogen worden, in die Anteile von Lohn- und Materialkosten auf, ergibt sich die in Abbildung 6-21 dargestellte Verteilung. Die Materialkosten, die bei der gesetzlichen Inspektion & Wartung anfallen, wurden hier nicht dargestellt, da sie weniger als 0,5 % ausmachen.

Es ist zu erkennen, dass die Materialkosten fast ausschließlich als Kosten infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung anfallen. Insgesamt haben sie einen Anteil von 47 % an den Folgekosten und einen Kostenanteil von nahezu einem Drittel an den Gesamtkosten der gesetzlichen Instandhaltung. Ca. zwei Drittel der Gesamtkosten für die gesetzliche Instandhaltung sind Kosten infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung. Das macht den großen Einfluss der Folgekosten deutlich. Die Lohnkosten sind mit 69 % an den Gesamtkosten der gesetzlichen Instandhaltung beteiligt. Ihr Anteil infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung beträgt über 50 % der gesamten Lohnkosten.

Die Betrachtung der Kostenaufteilung auf die beiden Instandhaltungsleistungsarten der gesetzlichen Instandhaltung unterstreicht die Dominanz der Kosten, die infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung anfallen. Bei keinem Nutzwagen, der im Betrachtungszeitraum einer gesetzlichen Instandhaltung unterzogen wurde, liegen die Folgekosten unter denen der gesetzlichen Inspektion & Wartung. Bezogen auf den Mittelwert über alle Nutzwagen stehen die Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung zu den Folgekosten etwa im Verhältnis 1 zu 2. Die 100 % Angabe entspricht der 100 %-Marke in Abbildung 6-19.

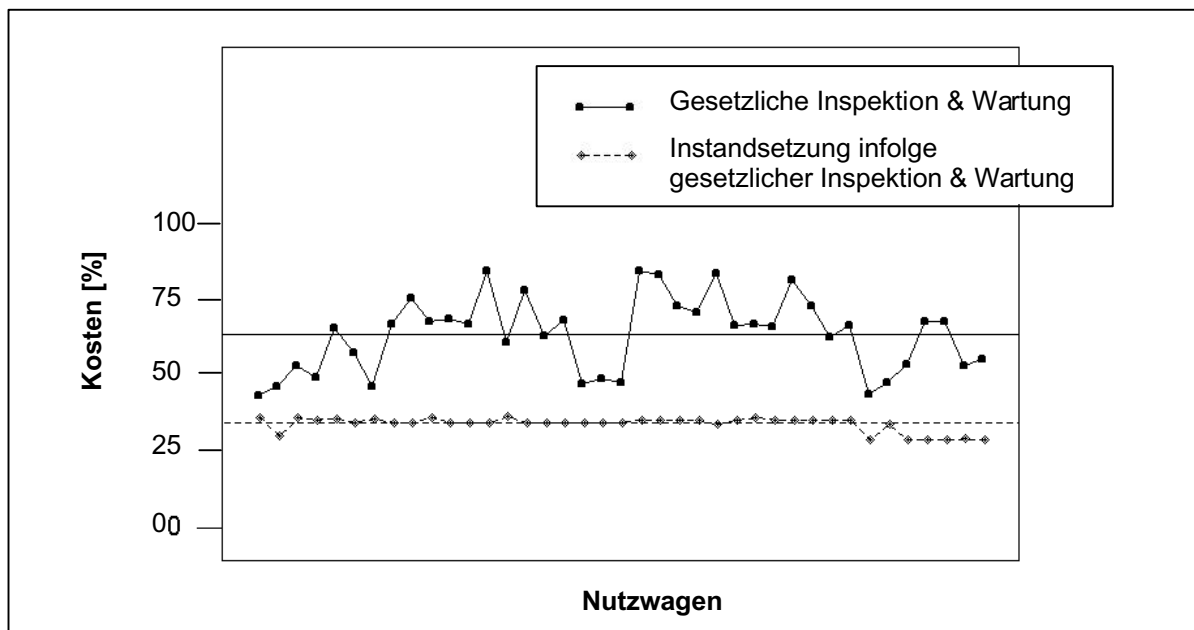


Abbildung 6-22: Verteilung der Kosten je gesetzlicher Instandhaltung eines Nutzwagens auf die Instandhaltungsleistungsarten

Abbildung 6-22 verdeutlicht, dass die Folgekosten auffallend großen Schwankungen unterliegen. Es gilt daher die Ursachen für die Kostenunterschiede herauszufinden.

Die Kosten für Inspektion & Wartung weisen für jeden Nutzwagen nahezu identische Werte auf. Sie sind detailliert geplant und werden dem Wartungsplan entsprechend ausgeführt.

Berechnet man ausgehend von den Wagendaten die mittleren Kosten je Fahrzeugserie für die gesetzliche Instandhaltung, zeigen sich Besonderheiten der einzelnen Serien. Die Fahrzeuge der Serien S5, S12 und S16 sind durchschnittlich kostengünstiger als die der Serien S10, S11 und S13. Bei den Serien S5 und S16 handelt es sich um relativ junge Fahrzeuge. Die Serie S12 ist seit über 25 Jahren in Dienst der Berliner Verkehrsbetriebe. Teilt man die Kosten wiederum nach den Instandhaltungsleistungsarten auf (vgl. Abbildung 10-14, Abbildung 10-15 im Anhang) zeigt sich,

dass die Serie S16 für beide Arten gegenüber dem Durchschnitt die geringsten Kosten verursacht. Die Serien S5 und S12 rufen die geringsten Folgekosten hervor.

Die Fahrzeugserien S5, S12 und S16 bilden bezugnehmend auf die gesetzliche Instandhaltung, eine kostengünstige Basis für die Zukunft. Insgesamt werden die durchschnittlichen Kosten durch die zusätzlichen freiwilligen Arbeitsinhalte und den großen Materialkostenanteil für alle Serien als zu hoch angesehen.

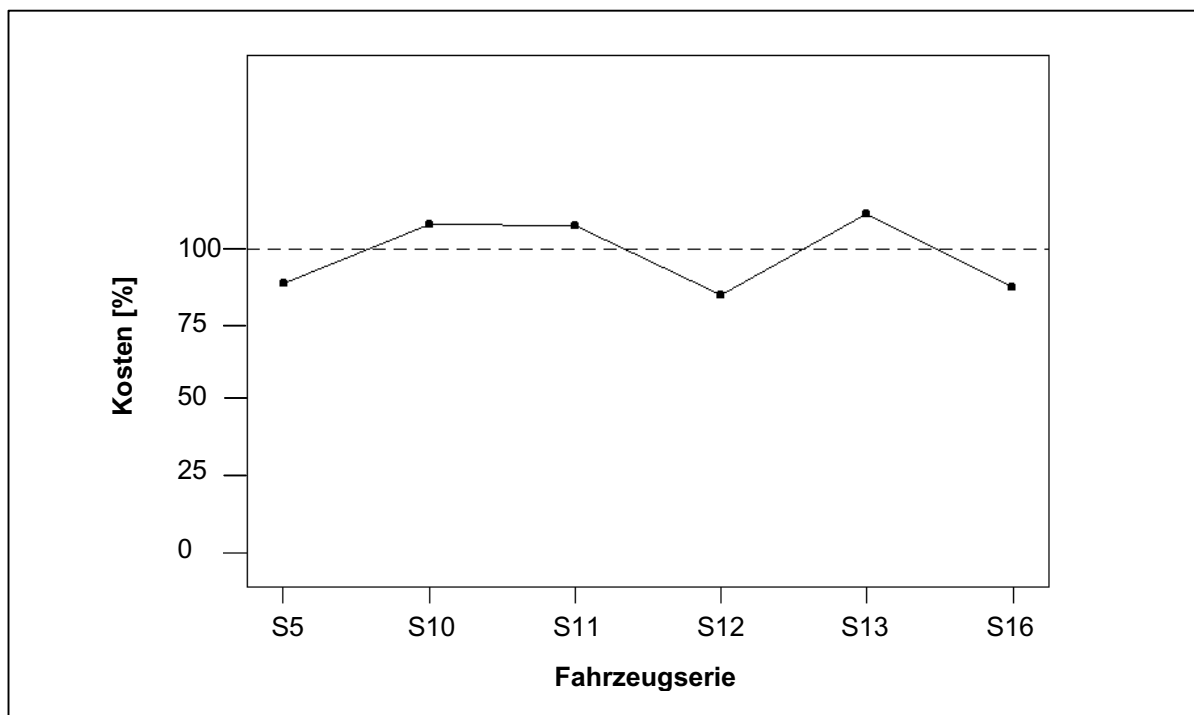


Abbildung 6-23: Durchschnittliche Gesamtkosten je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie für die gesetzliche Instandhaltung

Eine Abhängigkeit der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung vom Fahrzeugprofil ist ebenso wenig zu erkennen, wie eine Abhängigkeit von der Antriebsart der Fahrzeuge.

Zusammenfassung der Analyseergebnisse für die gesetzliche Instandhaltung

Die gesetzliche Instandhaltung hat im Betrachtungszeitraum einen Kostenanteil von 43% an den Gesamtkosten der Instandhaltung.

Ihre Kosten entstehen zu 34 % aus gesetzlicher Inspektion & Wartung und 66 % aus Arbeiten infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung. Die Materialkosten machen in der Gesamtheit 31 % der Kosten für die gesetzliche Instandhaltung aus. Von den Folgekosten tragen sie 47 %. Die Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung resultieren zu nahezu 100 % aus Lohn. Die Folgekosten hingegen basieren nur zu

ca. 53 % auf Lohn. Ein direkter Zusammenhang zwischen Lohn- und Materialkosten ist nicht zu erkennen.

Im Bereich der Folgekosten von gesetzlicher Inspektion und Wartung existieren Kostenschwankungen um den Mittelwert von bis zu $\pm 25\%$. Im Gegensatz dazu stehen die Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung, welche nur minimale Schwankungen aufweisen. Bei keinem Nutzwagen übersteigen die Kosten für Inspektion & Wartung die Folgekosten.

Die Fahrzeugserien S5, S12 und S16 sind durchschnittlich 25 % kostengünstiger in der BOStrab, als die Fahrzeugserien S10, S11 und S13. Die Serie S16 ist die einzige, die in den Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung und in den Folgekosten unter dem jeweiligen Mittelwert liegt. S5 und S12 verursachen die geringsten Folgekosten.

Eine Abhängigkeit zwischen den Kosten und den gefahrenen Kilometern seit der letzten BOStrab, dem Fahrzeugprofil oder der Antriebsart ist nicht zu erkennen. Des Weiteren bleibt zu erwähnen, dass trotz fest vorgegebenem km-Abstand zwischen den jeweiligen gesetzlichen Instandhaltungen eines Nutzwagens stark unterschiedliche Kilometerleistungen festgestellt werden konnten.

6.2.3 Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle

Als Kennzahl für die Bewertung der Fahrzeugqualität wurden u. a. die fahrgastwirksamen Ausfälle gewählt. Diese sind als Ausfall eines Bauteils oder einer Baugruppe der eine Beförderung der Fahrgäste aus technischen Gründen oder wegen eines erhöhten Sicherheitsrisikos verhindert, definiert. Sie werden fahrleistungsbezogen auf den Nutzwagenkilometer angegeben.

Im Betrachtungszeitraum sollten nicht mehr als 5,7 fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nutzwagenkilometer (Nwkm) auftreten. Tatsächlich liegt diese Kennzahl mit 6,1 fahrgastwirksamen Ausfällen je 1 Mio. Nutzwagenkilometer jedoch um 0,4 höher. Diese Überschreitung des Planwertes entspricht ca. 50 zusätzlichen Ausfällen im Betrachtungszeitraum. Insgesamt gab es 771 fahrgastwirksame Ausfälle. Das entspricht ca. zwei Ausfällen pro Tag. Dieses Ergebnis erscheint zunächst recht hoch, relativiert sich jedoch, wenn man beachtet, dass pro Tag eine Kilometerleistung von ca. 350.000 Nwkm erreicht wird. Im übertragenen Sinn entspricht diese Kilometerleistung in etwa einer achtfachen Umrundung der Erde. Dennoch ist eine Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter notwendig, um zukünftig die Kundenzufriedenheit zu steigern und den Instandhaltungsbedarf zu reduzieren.

Dazu werden u. a. Auswertungen in Abhängigkeit von der Jahreszeit, den U-Bahn-Linien und den Fahrzeugserien durchgeführt. Darüber hinaus werden die Ursachen für die fahrgastwirksamen Ausfälle analysiert.

Im Anhang sind die absoluten Werte für die fahrgastwirksamen Ausfälle im Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie und der U-Bahn Linie den Tabellen Abbildung 10-17 und Abbildung 10-18 zu entnehmen.

Die fahrgastwirksamen Ausfälle zeigen insgesamt einen saisonal beeinflussten Verlauf. In den Wintermonaten sind sie deutlich höher, als in den Monaten von April bis September. Die U-Bahnen sind im Winter durch das größere Fahrgastaufkommen und veränderte Umweltbedingungen stärker belastet. Damit wird u. a. durch die Passagiere mehr Schmutz (Split, Sand) von der Straße mit in die Fahrzeuge transportiert. Dieser verunreinigt zusätzlich z. B. den Türmechanismus und führt dadurch vermehrt zu Ausfällen.

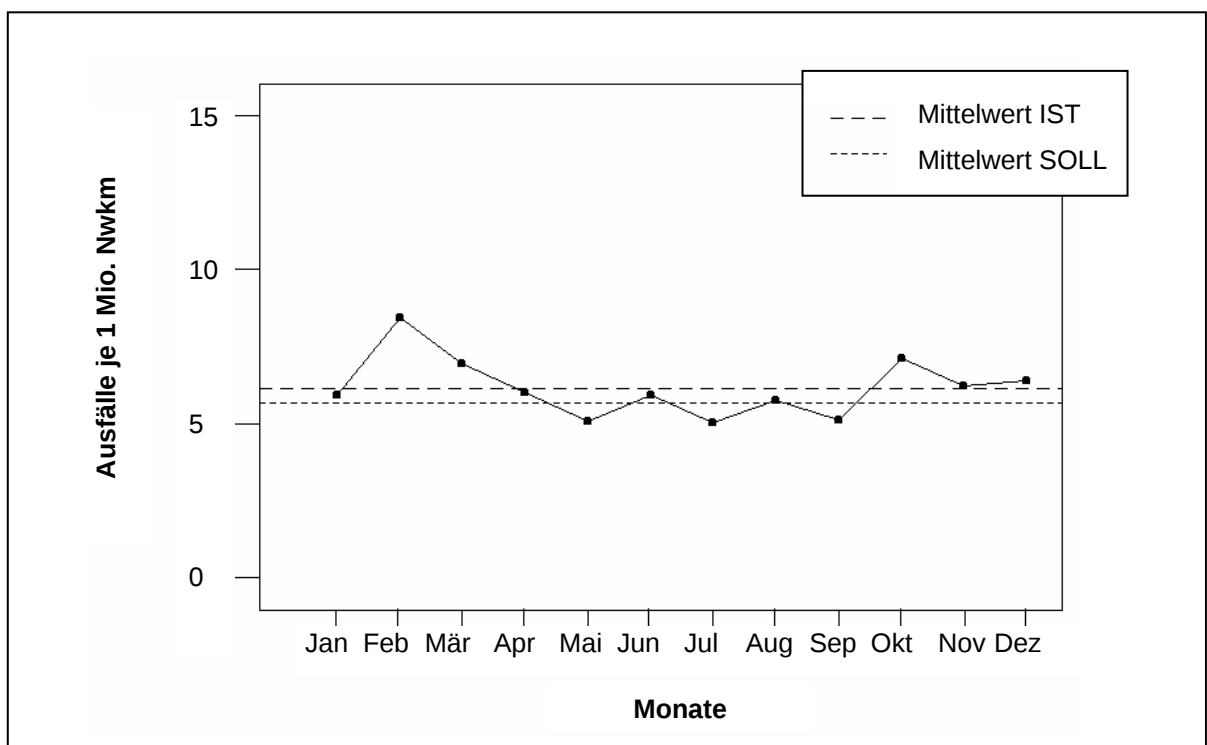


Abbildung 6-24: Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je Monat

Für die Analyse der fahrgastwirksamen Ausfälle wurden einige Fahrzeugserien zusammengefasst, da sie in ihrer Bauart im Hinblick auf die kritischen Schadensbilder keine gravierenden Unterschiede aufweisen. Folgende Serien wurden zusammengefasst. S8 und S9 zu SA; S15 und S16 zu SB; S17, S18 und S19 zu SC. Für die Fahrzeugserie S4 liegen aus dem Betrachtungszeitraum nur wenige Messwerte zur Bestimmung der fahrgastwirksamen Ausfälle vor. Diese Fahrzeugserie bleibt aus daher in der nachfolgenden Analyse unberücksichtigt.

Begutachtet man die einzelnen Fahrzeugserien hinsichtlich ihrer fahrgastwirksamen Ausfälle, ist zu erkennen, dass im Kleinprofil insbesondere die Fahrzeugserie S5 mit durchschnittlich über 10 fahrgastwirksamen Ausfällen je 1 Mio. Nwkm fast doppelt so viele Ausfällen aufweist, wie anvisiert. Auch die Fahrzeugserien SA, S10 sowie SB zeigen hier deutlich zu hohe Werte. Gerade die noch jungen Serien aus den Baujahren 1990 und 1992 zeigen hier große Schwächen, welche es gilt langfristig zu beseitigen. Geht man von einer durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeuge von 35 Jahren aus, sollten insbesondere diese Fahrzeuge aufgrund ihrer hohen Restlebensdauer auf ein Niveau hoher Zuverlässigkeit bei möglichst niedrigen Kosten angepasst werden. Die Fahrzeugserien SA hingegen werden in näherer Zukunft durch neue Fahrzeuge ersetzt. Es stellt sich die Frage, ob hier große Investitionen im Hinblick auf Kundenzufriedenheit, Instandhaltungskosten und Instandhaltungsbedarf lohnenswert sind.

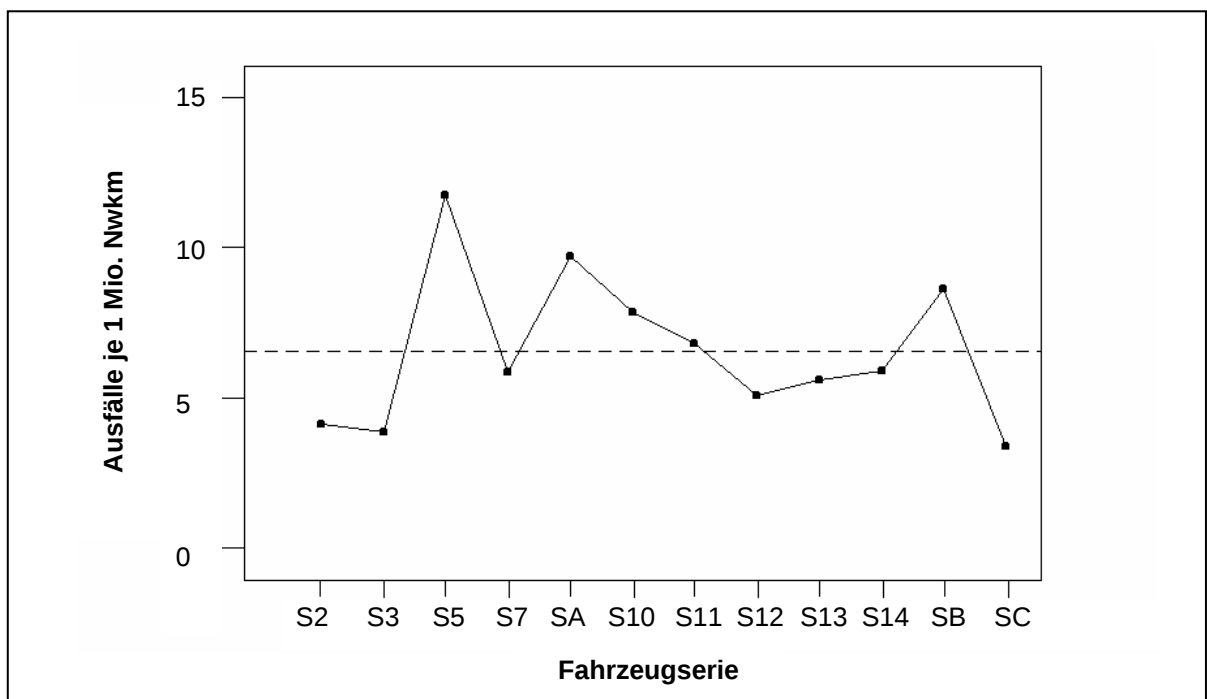


Abbildung 6-25: Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie

Eine Gliederung der Schadensbilder nach defekten Baugruppen, die verstärkt zu den fahrgastwirksamen Ausfällen führen, verdeutlicht, dass in allen Fahrzeugserien die Türen Hauptgrund für diese Ausfälle sind. Einen besonders großen Anteil daran haben die Fahrzeugserien S5 und SB. Allein durch Ausfälle im Bereich der Türen überschreiten sie den Planwert. Die jüngsten Serien des Fuhrparks SC aber auch ältere, wie S2, zeigen hier deutlich bessere Werte. Eine nähere Untersuchung der Baugruppen und ihrer Bauteile zeigt, dass die Defekte seitens der Elektrik größtenteils auf Ausfälle von Relais und Schaltern zurückzuführen sind. Seitens der Mechanik führten vorwiegend Türlaufschienen, Führungsrollen und Ausrückzylinder zu den fahrgast-

wirksamen Ausfällen. Die Türen sind zwar der Hauptgrund der fahrgastwirksamen Ausfälle, aber nicht der einzige. Verstärkt treten ebenfalls Ausfälle im Bereich des Bremssystems, der Pneumatikanlage und der Hilfsbetriebe auf.

Betrachtet man die fahrgastwirksamen Ausfälle in Abhängigkeit von der Linienführung (vgl. Abbildung 6-26), so sind insbesondere auf den Linien U2 (Ruhleben-Pankow) und U7 (Rathaus Spandau-Rudow) überdurchschnittlich viele fahrgastwirksame Ausfälle je Fahrleistung, verstärkt an Türen und Bremsen, zu verzeichnen. Die U1 liegt im Schnitt bei 4,4 fahrgastwirksamen Ausfällen pro 1 Mio. Nwkm und die U5 bei 3,9. Auf der Linie U2 treten 6,9 und auf der Linie U7 7,8 fahrgastwirksame Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm auf.

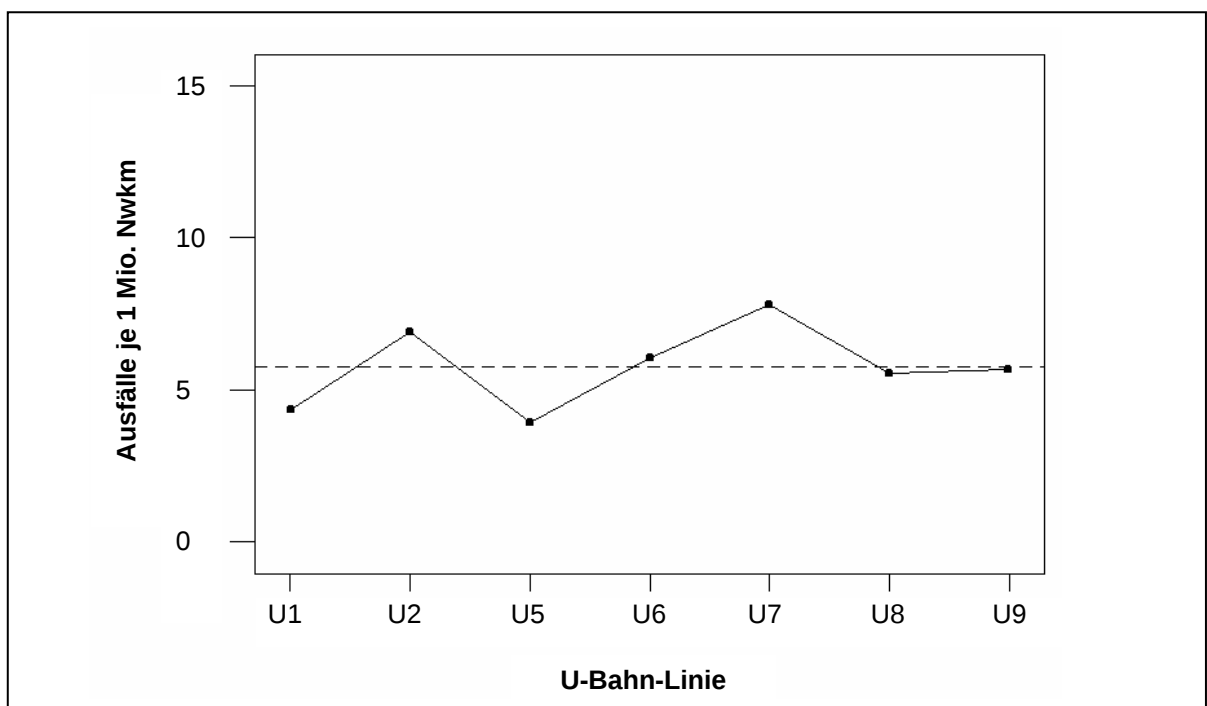


Abbildung 6-26: Durchschnittliche Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der U-Bahn Linie

Betrachtet man die Schadensbilder sind die Ausfälle im Bereich der Türen verstärkt auf den Linien U1 und U2 mit jeweils ca. 3 und im Großprofil die Linien U7 mit 5,3 und U6 mit 4,2 fahrgastwirksamen Ausfällen pro 1 Mio. Nwkm zu verzeichnen. Die Ausfälle im Bereich Druckluft treten am Häufigsten auf den Linien U2 und U5 auf. Ebenso verhalten sich die Hilfsbetriebe.

Der Dotplot in Abbildung 6-27 zeigt für jeden Monat die Anzahl der fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der U-Bahn-Linie. Jeder Kreis symbolisiert dabei einen monatlichen Wert. Die Abbildung unterstreicht, dass die U7 mehrfach Werte über 10 fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nwkm aufweist. Der Maximalwert wird mit ca. 15 fahrgastwirksamen Ausfällen je 1 Mio. Nwkm erreicht.

Dieser und die Höchstwerte der fahrgastwirksamen Ausfälle anderer U-Bahn-Linien treten den Wintermonaten auf. Ganz anders sehen die Werte für die Linie U2 aus. Diese schwanken lediglich zwischen 5 und 10 fahrgastwirksamen Ausfällen je 1 Mio. Nwkm, wobei hier nur einmalig der Sollwert von 5,7 unterschritten wird. Auf dieser U-Bahn-Linie liegt der Maximalwert bei 9,6 fahrgastwirksamen Ausfällen pro 1 Mio. Nwkm.

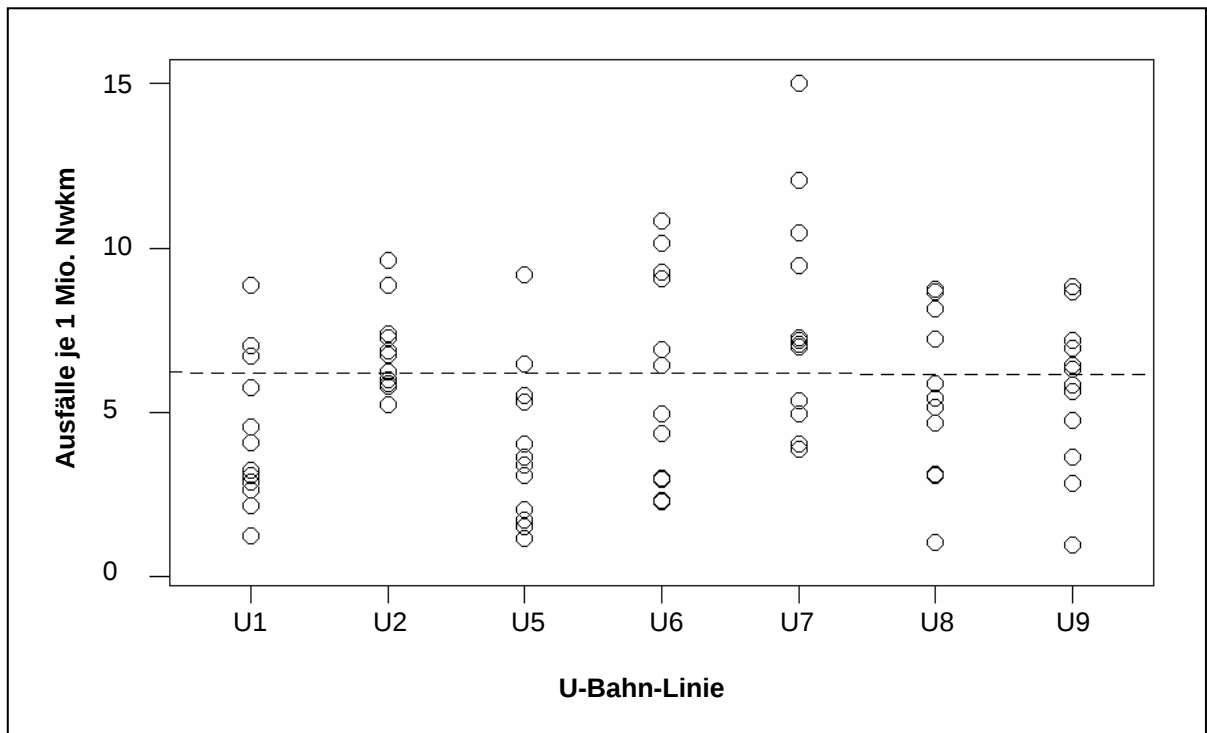


Abbildung 6-27: Monatliche fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der U-Bahn-Linie

Auf der Linie U1 wird der Minimalwert von 1,3 fahrgastwirksamen Ausfällen je 1 Mio. Nwkm im August, also in der Ferienzeit erreicht. Die Belastung aufgrund verminderter Fahrgastzahlen ist in diesem Monat geringer, als z. B. im Februar, wo auf der U1 der Höchstwert von 8,9 erreicht wird. Das Minimum an fahrgastwirksamen Ausfällen auf der U5 liegt bei 1,2 im Oktober und der Maximalwert bei 9,2 im März.

Abschließend ist zu bemerken, dass zwischen den fahrgastwirksamen Ausfällen je Serie und je Monat und den Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung keine direkten Abhängigkeiten erkennbar sind.

Zusammenfassung der Analyseergebnisse für die fahrgastwirksamen Ausfälle

Im Betrachtungszeitraum wurde das Ziel durchschnittlich nicht mehr als 5,7 fahrgastwirksame Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm zu erreichen, um 0,4 überschritten. Insgesamt kam es im betrachteten Jahr zu 771 Ausfällen mit Auswirkungen auf die Fahr-

gäste. Das entspricht ca. zwei Ausfällen pro Tag und bezogen auf die Kilometerleistung ca. 50 Ausfälle mehr als erwartet.

Generell ist zu erkennen, dass in den Wintermonaten vermehrt fahrgastwirksame Ausfälle auftreten. Hier zeigt insbesondere die noch recht junge Fahrzeugserien S5 erhöhte Anfälligkeiten. Bei ihr treten durchschnittlich 11,7 fahrgastwirksame Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm auf. Auch die Fahrzeugserien SA, S10 und SB liegen deutlich über dem Gesamtmittelwert. Die Serien S5 und SB haben einen sehr großen Anteil an den Türausfällen, die ca. 70% der gesamten fahrgastwirksamen Ausfälle ausmachen. Die Türausfälle sind häufig auf defekte Relais, Schalter, Türlaufschienen und Führungsrollen zurückzuführen. Neben den Türen treten verstärkt Ausfälle bei Bauteilen aus den Bereichen Bremse, Pneumatik und Hilfsbetriebe auf. Die Fahrzeugserien S2, S3 und SC weisen insbesondere im Bereich der Türen deutlich die niedrigsten Werte auf.

Die U-Bahn Linien U2 (6,9 fwA je 1 Mio. Nwkm) und U7 (7,8 fwA je 1 Mio. Nwkm) haben die größten Durchschnittswerte für die fahrgastwirksamen Ausfälle im Betrachtungszeitraum. Die U7 erreicht ebenfalls den Höchstwert bei den Ausfällen je Monat und bei den Türen, gefolgt von der U6. Die Linie U5 weist mit 3,9 durchschnittlich die wenigsten fahrgastwirksamen Ausfälle je 1 Mio. Nwkm auf. Das monatliche Minimum wird auf der Linie U9 mit 1 fahrgastwirksamen Ausfall je 1 Mio. Nwkm erzielt.

6.2.4 Analyse des Instandhaltungsbedarfs

Der Instandhaltungsbedarf ist hinsichtlich Verfügbarkeit und Instandhaltungskosten von besonderer Bedeutung. Er ist definiert als das Verhältnis von Fahrzeugen, die dem Fahrdienst aufgrund von Instandhaltungsaktivitäten entzogen werden und allen Fahrzeugen, die dem Fahrdienst generell zur Verfügung stehen. Damit spiegelt der Instandhaltungsbedarf direkt wider, wie hoch der prozentuale Anteil der Fahrzeuge ist, die zu einem fixen Zeitpunkt oder über eine definierte Zeitspanne dem Fahrdienst nicht zu Verfügung stehen. Fahrzeuge, die sich in der Instandhaltung befinden, stellen gebundenes Kapital dar, das zeitweise nicht an der Erbringung der erforderlichen Beförderungsleistung beteiligt und damit nicht produktiv ist.

In der Praxis existieren zur Bewertung des Fuhrparks und dessen Instandhaltung zwei Sichtweisen auf den Instandhaltungsbedarf (vgl. Kapitel 4). Man unterscheidet gesamten und den beeinflussbaren Instandhaltungsbedarf. Der gesamte Instandhaltungsbedarf beinhaltet alle Fahrzeuge in der Werkstatt, unabhängig vom Grund für den Aufenthalt, z. B. Vandalismus, Unfall, planmäßige Instandhaltung. Dagegen berücksichtigt der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf keine Fahrzeuge, die aufgrund

von Versuchen, Garantie- oder Vandalismusschäden der Werkstatt zugeführt wurden.

In Abbildung 6-28 sind der gesamte und der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf über die Monate des Betrachtungszeitraums aufgetragen. Die horizontalen Linien symbolisieren jeweils die Mittelwerte. Der Qualitätsreport sieht als Ziel einen Instandhaltungsbedarf von 9,8 % vor. Der beeinflussbare Instandhaltungsbedarf liegt mit durchschnittlich 11,2 % deutlich über dem Sollwert. Eine objektive Bewertung ist erst durch den Vergleich des gesamten Instandhaltungsbedarfs gegenüber der Sollvorgabe möglich. Der gesamte Instandhaltungsbedarf zeigte im Betrachtungszeitraum einen Mittelwert von 12,8 %. Damit liegt dieser 3 % über dem erwarteten Ziel. Das entspricht, bei durchschnittlich 1150 vom Fahrdienst benötigten Nutzwagen, einer zusätzlichen Bindung 35 Nutzwagen in den Werkstätten. Die monatlichen Werte für den Instandhaltungsbedarf weisen insgesamt große Schwankungen auf. Im November erreicht der Instandhaltungsbedarf mit ca. 14,8 % sein Maximum. Das Minimum liegt im Januar bei ca. 10,5 %. Tendenziell weist der Instandhaltungsbedarf im Verlauf des Jahres einen relativ kontinuierlichen Anstieg auf, bei dem die monatlichen Durchschnittswerte immer über der Sollvorgabe liegen.

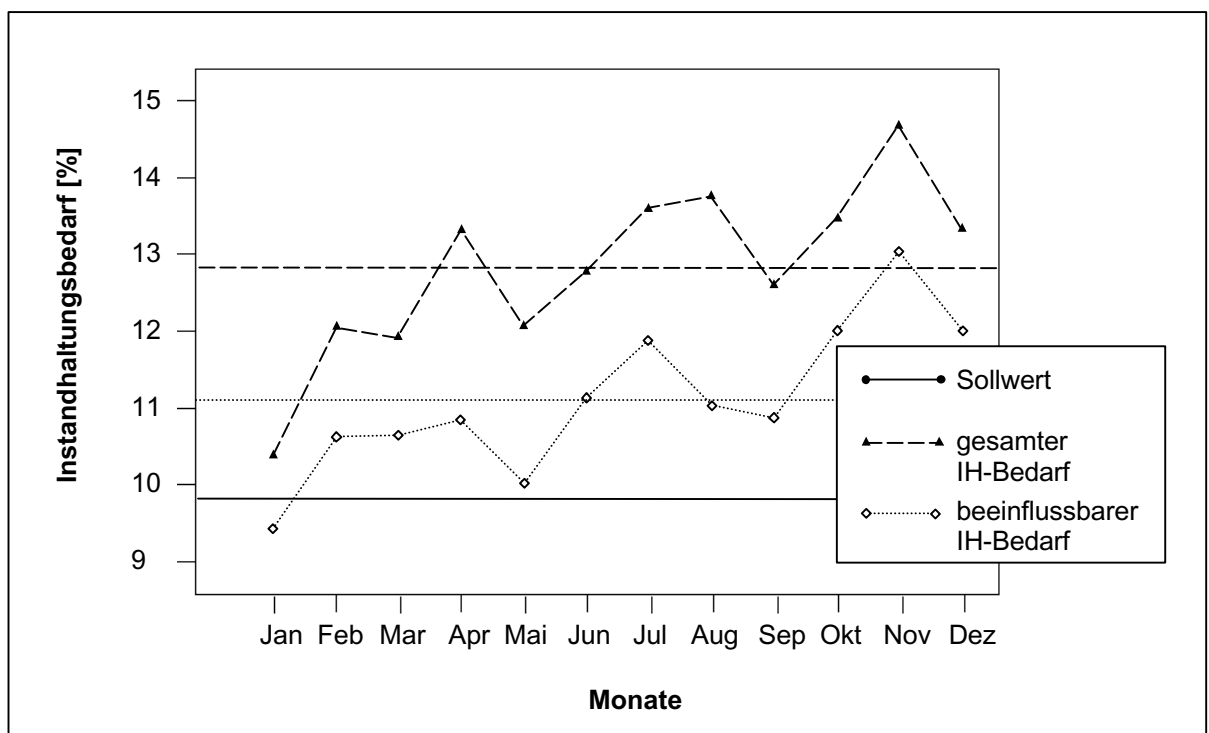


Abbildung 6-28: Instandhaltungsbedarf je Monat

Vergleicht man den Verlauf von gesamtem und beeinflussbarem Instandhaltungsbedarf, ist zu erkennen, dass die Anzahl der Fahrzeuge, die aufgrund von Garantie- oder Vandalismusschäden der Werkstatt zugeführt werden, relativ konstant ist. In

den Monaten April, August und September werden dem Verkehr mehr Fahrzeuge, im Januar weniger aufgrund solcher Vorfälle entzogen.

Der Verlauf und der Mittelwert des Instandhaltungsbedarfs wurden anhand der Werte aus einem anderen Jahr kontrolliert. Dieser Vergleich zeigt, dass der Verlauf nicht, der Mittelwert jedoch sehr gut reproduzierbar ist.

6.3 Erkenntnisse aus der Analyse für die Ableitung eines allgemeingültigen Konzeptes zur Verbesserung der Wettbewerbsposition bestehender Instandhaltungssysteme von Schienenfahrzeugen

Die vielfältigen Einflüsse auf die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen im ÖPNV wurden anhand des Instandhaltungssystems für U-Bahn-Fahrzeuge der Berliner Verkehrsbetriebe untersucht und bewertet. Von der Vielzahl der Einflüsse sind der Fuhrpark, der Fahrzeughersteller, die Instandhaltungsstrategie, die Gesetze und die Fahrgäste von besonderer Bedeutung.

Der Fuhrpark beeinflusst die Instandhaltung vor allem durch seine Fahrzeugstruktur und durch die Zuverlässigkeit seiner Fahrzeuge. Die Zuverlässigkeit wiederum wird hauptsächlich durch den Fahrzeughersteller und den Instandhalter beeinflusst. Der Grundstein für ein zuverlässiges Fahrzeug wird vom Fahrzeughersteller und seinen Zulieferern gelegt. Die Aufrechterhaltung und ggf. eine Steigerung der Zuverlässigkeit liegt in den Händen des instandhaltenden Betriebes. Die Untersuchung hat beispielhaft gezeigt, dass eine große Variantenvielfalt an Türsystemen existiert und keines der analysierten Türsysteme konstruktiv so gestaltet ist, dass es eine hohe Zuverlässigkeit bei wechselnden Belastungen durch Fahrgast und Umwelt gewährleistet. Ein wichtiges Ziel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit in diesem Bereich muss es daher sein, die Türsysteme grundsätzlich zu durchdenken und zu verbessern, zumal ihr Versagen zu fahrgastwirksamen Ausfällen führen kann. Andere wichtige Einflussgrößen auf die fahrgastwirksamen Ausfälle sind die Bremsen und die Pneumatik. Ihre Ausfallursachen sind ebenso zu analysieren und dem Ziel einer Reduzierung der Ausfälle anzupassen.

Bedingt durch das i. A. lange Bestehen der einzelnen Verkehrsunternehmen ist der Fahrzeugpark bezüglich der konstruktiven Gestaltung der Fahrzeuge, des Lichtraumprofils und der Antriebsart heterogen strukturiert. Die Beschaffung einer neuen Fahrzeugserie nutzt die Vorteile neuester Technik im Hinblick auf Sicherheit, Kosten und Fahrkomfort. Dem gegenüber stehen jedoch Nachteile in der Instandhaltung, die aus der Variantenvielfalt der Fahrzeuge resultieren. Die Analyse hat gezeigt, dass Instandhaltungskosten und Ausfälle stark von der Fahrzeugserie abhängen. Die unterschiedliche Größe der Instandhaltungskosten für die einzelnen Fahrzeugserien

erklärt sich durch einen stärkeren Bauteilausfall bei der einen Fahrzeugserie gegenüber der anderen. Das Versagen der Bauteile wird entweder bei der Inspektion und Wartung festgestellt oder es tritt während des Betriebs ein. Um in einem Fuhrpark mit hoher Variantenvielfalt derartige Ausfälle zu reduzieren und damit langfristig Kosten und Instandhaltungsbedarf zu senken, sind weitaus größere Anstrengungen notwendig, als bei einem Fuhrpark mit wenigen unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Der Mehraufwand resultiert vor allem aus zusätzlichen Analysen, Umkonstruktionen, Umbauten und Tests.

Anhand der Analyseergebnisse wurden die Fahrzeugserien hinsichtlich der fahrgastwirksamen Ausfälle und der Kosten in den verschiedenen Bereichen der Instandhaltung bewertet und in Tabelle 6-5 zusammengefasst.

Tabelle 6-5: Bewertung der Fahrzeugserien in Bezug auf fahrgastwirksame Ausfälle und Kosten für die betriebliche und die gesetzliche Instandhaltung

	S2	S3	S4	S5	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
Fahrgastw. Ausfälle	+	+	■	--	○	--	--	-	○	+	○	○	-	-	++	++	++
Kosten f. I&W F1	+	+	+	++	○	+	+	--	--	--	--	○	-	-	-	-	-
Kosten f. Zust. IS F1	--	-	+	-	--	○	○	+	+	+	○	○	○	+	+	+	++
Kosten f. Baugrw. F1	-	-	+	○	--	○	-	+	+	+	○	+	+	+	+	○	++
Kosten f. I&W F2	○	○	+	++	○	+	+	-	-	-	--	○	-	-	○	++	○
Kosten f. Zust. IS F2	-	-	++	--	--	+	+	++	++	+	○	○	○	○	++	++	++
Kosten f. Baugrw. F2	-	-	+	○	--	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kosten f. außerpl. IH	-	+	-	○	--	+	○	○	○	○	○	○	+	+	+	+	++
Kosten f. I&W gesetzl. IH	■	■	■	○	■	■	■	○	○	○	○	■	■	+	■	■	■
Kosten f. infolge gesetzl. IH	■	■	■	+	■	■	■	-	-	+	-	■	■	+	■	■	■

-- = sehr schlecht; - = schlecht; ○ = mittel; + = gut; ++ = sehr gut; ■ = keine Angabe möglich

Die Fahrzeugkonstruktion beeinflusst maßgeblich die Instandhaltbarkeit des Fahrzeugs. Viele notwendige Instandsetzungsarbeiten, sind die Folge des Einsatzes nicht beanspruchungsgerecht konstruierter Bauteile und Baugruppen. Sie werden damit durch den Fahrzeughersteller und seine Zulieferer verursacht. Werden in der Konstruktionsphase Beanspruchung und Instandhaltbarkeit unzureichend berücksichtigt, hat dies langfristige Auswirkungen auf die Instandhaltung und die damit verbundenen Kosten. Als Hauptgrund für die unzureichende Bauteilauslegung wird vor allem das

Streben des Herstellers nach einer möglichst kostengünstigen Entwicklung und Konstruktion der Fahrzeuge gesehen. Dazu können z. B. vereinfachende Annahmen für Berechnungen, ohne sich mit den tatsächlichen Belastungen und den Verschleißmechanismen intensiv auseinander zusetzen, einen lohnenswerten Beitrag leisten. Weiterhin stellt der Verkauf von Ersatzteilen ein strategisch wichtiges Instrument für den Fahrzeughersteller dar.

Im Rahmen der Analyse wurden Baugruppen ermittelt, die verstärkt zu fahrgastwirksamen Ausfällen führten. Generell verursachen die Ausfälle nicht nur Kosten für das Instandhaltungspersonal und die Ersatzteile, sondern auch einen zusätzlichen Aufwand für die Fahrzeugzuführung, die Werkstattlogistik sowie für die Personalkapazitäts- und Materialplanung. Um die Instandhaltungskosten zu reduzieren und die Fahrzeugzuverlässigkeit zu steigern, muss es also Ziel sein, möglichen Ausfällen schon in der Konstruktionsphase vorzubeugen. Die Untersuchung zeigte, dass die außerplanmäßigen Ausfälle zu 19 % an den gesamten Instandhaltungskosten beteiligt sind. Weitere 15 % sind Kosten infolge Inspektion & Wartung. Könnten die Kosten für die außerplanmäßige Instandhaltung sowie für Arbeiten infolge Inspektion & Wartung allein durch entsprechende Maßnahmen der Hersteller nur um 1 % Prozent reduziert werden, würde dies in dem Fuhrpark der BVG zu jährlichen Einsparungen in der Größe eines sechsstelligen Betrags führen.

Besonderen Einfluss auf die BauteilAusfälle, auf die Kosten der betrieblichen Instandhaltung, die Kosten für die gesetzliche Instandhaltung, die fahrgastwirksamen Ausfälle und den Instandhaltungsbedarf, hat die Instandhaltungsstrategie. Sie bildet die Grundlage für den zeitlichen Ablauf und die Inhalte aller Instandhaltungstätigkeiten. Sie beinhaltet die Konzepte, nach denen die Zeitpunkte für Instandhaltungsarbeiten festgelegt werden und Strategien, die eine kosten- und qualitätsoptimale Umsetzung der Konzepte anstreben.

Im Rahmen der Untersuchung wurde deutlich, dass die Arbeitsinhalte und die Intervalle für geplante Tätigkeiten im Rahmen der betrieblichen und gesetzlichen Instandhaltung großen Einfluss auf BauteilAusfälle und Kosten haben. Deshalb ist es bei einem hohen Prozentsatz außerplanmäßiger Ausfälle ratsam, die Inspektionsintervalle dem Abnutzungsverlauf anzupassen. Dadurch verringern sich die Anzahl der Fahrzeugzuführungen zur Werkstatt und der administrative Aufwand. Der bei der Analyse festgestellte hohe Aufwand für inspektive Arbeiten deutet auf ein vornehmlich zustandsorientiertes Instandhaltungskonzept hin. Die zustandsorientierte Instandhaltung bietet die Möglichkeit, eine optimale Ausbeute des Abnutzungsvorrates der Bauteile zu erreichen. Die Folge davon sind höhere Kosten für die Zustandserfassung und -beurteilung, die Kosten für zusätzliche Fahrzeugzuführungen und Administration sowie eine Erhöhung des Instandhaltungsbedarfs. Mit zusätzlichen fahrgastwirk-

samen Ausfällen ist zu rechnen, wenn die Restnutzungsdauer einzelner Bauteile bei Inspektionen falsch eingeschätzt wurde und es dadurch zu Bauteilausfällen kommt. Eine uneingeschränkte zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung, wie sie durch RCM oder RAMS-LCC, indirekt aber auch durch Kaizen und Six Sigma gefordert werden, ist im betrachteten Instandhaltungssystem nur ansatzweise vorhanden. Unterstrichen wird dies durch die hohe Anzahl an außerplanmäßigen Ausfällen, an fahrgastwirksamen Ausfällen. Fest vorgegebene betriebsinterne Inspektionsfristen und Arbeitsinhalte sowie Auflagen der BOStrab behindern die Entwicklung kostenreduzierender Instandhaltungsstrategien. Die im betrachteten Verkehrsunternehmen umgesetzte Vorgehensweise, die auf dem Gedanken von TQM aufbaut, ist, gemessen an erreichbaren Fortschritten, z. B. durch die Anwendung von Kaizen oder Six Sigma, für die Verwirklichung eines optimalen Instandhaltungssystems nicht ausreichend.

Inspektion und Wartung für die Instandhaltung nach BOStrab rufen einen Kostenanteil von 14 % an den Gesamtkosten hervor. Der zusätzliche Kostenanteil für Lohn und Material, um die vorhandenen Fahrzeugmängel entsprechend den Gesetzen zu beheben und um das geforderte Maß an Fahrsicherheit wieder herzustellen, beträgt 29 % der Gesamtkosten. Die Arbeiten infolge Inspektion und Wartung für die gesetzliche Instandhaltung verursachen demnach annähernd das Doppelte der Kosten wie für die geplanten Tätigkeiten Inspektion und Wartung selbst. Die Tätigkeiten im Rahmen der gesetzlichen Instandhaltung des betrachteten Fuhrparks tragen mit 43 % fast dieselben Kosten, wie die betriebliche Instandhaltung. Aufgrund der gesetzlichen Regelungen werden Kosten hervorgerufen, die nur teilweise durch den Instandhalter beeinflusst werden können. Eine Möglichkeit zur Kostenreduzierung ist die Anpassung der Intervalle an das Abnutzungsverhalten sicherheitsrelevanter Bauteile sowie die Veränderung der Tätigkeiten im Rahmen der gesetzlichen Instandhaltung. Laut Gesetz kann die Technische Aufsichtsbehörde (TAB) eine Verlängerung des BOStrab-Intervalls genehmigen. Dazu ist ein umfangreiches Genehmigungsverfahren zu durchlaufen, das zusätzliche Kosten verursacht. Das Verfahren ist für jede Fahrzeugserie einzeln und nach jeder durchgeführten BOStrab neu zu durchlaufen. Die Genehmigungsgebühr spielt im Gegensatz zu den Kosten für die umfassenden technischen Nachweise und Dokumentationen eine untergeordnete Rolle. Nach Angaben der Berliner Verkehrsbetriebe wird für die Voruntersuchungen zur Erbringung der technischen Nachweise und für die Erstellung des Verlängerungsantrags ein Mannjahr benötigt. Die Genehmigungsgebühr hingegen liegt bei ca. 150 Euro. Eine genehmigte Laufleistungsverlängerung z. B. um 50 % des Standardintervalls, erwirkt in Summe eine vergleichbare Reduzierung der Kosten für Inspektion und Wartung der gesetzlichen Instandhaltung. Zusätzlich ist eine Anpassung der durchzuführenden Tätigkeiten im Rahmen der gesetzlichen Instandhaltung möglich, bedarf allerdings der Abstimmung mit der TAB. Im betrachteten Fuhrpark ist die Anpassung der Tätigkeiten in gewissem Maß auch ohne die Zustimmung der TAB möglich, da hier

Arbeiten im Rahmen der BOStrab durchgeführt werden, die nicht auf gesetzlichen Forderungen basieren.

In einigen Bereichen haben die Fahrgäste verstärkten Einfluss auf das Abnutzungsverhalten von Bauteilen und damit auf Bauteilausfälle. Als gutes Beispiel dienen hier die Türen. Unabhängig vom Bedienmechanismus wird ein Großteil der Bauteile bei jedem Öffnen und Schließen mechanisch belastet. Ein ständiges Auf und Zu beschleunigt die Abnutzung ebenso, wie gewaltsame Öffnungsversuche. Zusätzlich verschleißeln beispielsweise Führungsschienen durch Verschmutzung aufgrund von Staub, Sand, Steinen etc. und aufgrund von Abfall, der unsachgemäß in den Türtaschen entsorgt wird. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ausfälle gerade bei den Türen, zwischen U-Bahn-Linien unterschiedlicher Streckenführungen, großen Schwankungen unterliegen. Erklärt wird dies durch das hohe Fahrgastaufkommen und die daraus resultierende Beanspruchung der Fahrzeuge. Die Fahrzeuge der U-Bahn-Linie U1 z. B. sind durch die Fahrgäste aufgrund ihrer Streckenführung durch dünner besiedelte Stadtgebiete mit höherem Anteil von Einwohnern über 65 Jahren weitaus weniger belastet, als die der U7 mit einem sehr hohen Fahrgastaufkommen.

Im Rahmen der Untersuchung wurden die gesetzten Zielwerte nur im Bereich der Lohnkosten unterschritten. Die Lohnkosten machten im Betrachtungszeitraum 93 % des Zielwertes aus. Bezogen auf das gesamte Instandhaltungssystem des Verkehrsunternehmens bringt diese Unterschreitung jedoch keine Kosteneinsparung, da das Personal für Arbeiten eingesetzt wurde, die nicht Bestandteil der Untersuchung waren. Dadurch erfolgte nur eine Verschiebung der Kosten auf andere Kostenträger. Hingegen überstiegen die Materialkosten, die fahrgastwirksamen Ausfälle und der Instandhaltungsbedarf jeweils die für den Betrachtungszeitraum definierten Zielwerte. So betragen die tatsächlichen Materialkosten 245 % des Zielwertes. Die fahrgastwirksamen Ausfälle überstiegen den Zielwert um 7 %, der Instandhaltungsbedarf um 30 %.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass in den Bereichen Lohn und Materialkosten Einsparungen notwendig sind, um wachsenden Anforderungen der geöffneten Märkte im Bezug auf die Wettbewerbsfähigkeit gerecht zu werden. Dies wird für den Lohn insbesondere durch seinen hohen Kostenanteil an außerplanmäßigen Tätigkeiten und an der Suche nach defekten Bauteilen unterstrichen. Die Materialkosten werden zusätzlich zu den außerplanmäßigen Ausfällen auch infolge Inspektion verursacht. Dabei handelt es sich teilweise um kostenintensive Baugruppenwechsel, z. B. von Antrieben.

Die außerplanmäßigen Ausfälle beeinflussen neben den Lohn- und Materialkosten auch den Instandhaltungsbedarf und die fahrgastwirksamen Ausfälle. Damit wirken sie sich negativ auf die Kundenzufriedenheit aus. Die außerplanmäßigen Aktivitäten verursachen weiterhin einen zusätzlichen logistischen und personal- sowie materialplanerischen Aufwand. Sie machen zusätzliche Fahrzeuge nötig, um den Fahrdienst ausreichend bedienen zu können. Aufgrund der großen Anzahl außerplanmäßiger Aktivitäten, verliert die Strukturierung der Instandhaltung nach vorgegebenen Fristenabständen und -inhalten ihre eigentliche Wirkung, abnutzungsbedingt in Abhängigkeit von den Betriebsstunden oder der km-Laufleistung tätig zu werden und somit außerplanmäßige Ausfälle zu verhindern. Um diesen Ausfällen entgegenzuwirken wurde im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Berliner Verkehrsbetrieben ein Projekt unter dem Namen „PABIAK“ (Permanente Analyse von Bauteilausfällen zur Identifizierung von Ausfallursachen und Kostentreibern) durchgeführt, das auf Ergebnissen dieser Arbeit aufbaut. Ziel dieses Projektes ist es, die Instandsetzungskosten und den Instandhaltungsbedarf langfristig zu reduzieren sowie die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge zu verbessern.

Die fahrgastwirksamen Ausfälle überstiegen mit insgesamt 771 Ausfällen im Betrachtungszeitraum ihre Vorgabe von 5,7 Ausfällen je 1 Mio. Nwkm um +0,4 Ausfälle je 1 Mio. Nwkm. Dies entspricht ca. zwei Ausfällen pro Tag. Die Verfehlung des Ziels bedeutet ca. 1 zusätzlichen fahrgastwirksamen Ausfall pro Woche. Mit einer Reduzierung der Kundenzufriedenheit ist aufgrund des zusätzlichen wöchentlichen Ausfalls nicht zu rechnen.

Für den Instandhaltungsbedarf wurde das angestrebte Ziel um 3 % verfehlt. Das entspricht bei einem durchschnittlichen Fahrzeugbedarf des Fahrdienstes von 1150 Nutzwagen, einer zusätzlichen Bindung von 35 Nutzwagen in den Werkstätten. Wenn man von einem Anschaffungspreis von ca. 1,2 Mio. € je Nutzwagen ausgeht, entspricht dies zusätzlichen 42 Mio. € gebundenen Kapitals. Durch eine Reduzierung des Instandhaltungsbedarfs könnten dem Fahrdienst im Falle der Erweiterung des Streckennetzes oder Reduzierung der Taktzeiten weitere Fahrzeuge ohne Neuanschaffungen zur Verfügung gestellt werden. Sieht eine langfristige Planung dies nicht vor, sollte der Überschuss an Fahrzeugen im Rahmen von regulären Verschrottungen oder Verkäufen reduziert werden.

Abschließend hat die Untersuchung gezeigt, dass eine strukturierte und zielgerichtete Vorgehensweise zur Bewertung der Instandhaltung und ihrer Prozesse hilft, Problemfelder zu identifizieren und deren Abhängigkeiten zu durchleuchten. Das wurde insbesondere durch den Einsatz bewährter Hilfsmittel, wie sie z. B. Six Sigma vorsieht, unterstützt. Diese statistischen Werkzeuge helfen, Stärken und Schwächen des bestehenden Systems zu erkennen. Dabei gewährleistete die kennzahlengestützte Analyse eine durchgehende Mess- und Bewertbarkeit einzelner Systempara-

meter. Durch die direkte Orientierung am Kunden wurde zusätzlich eine wettbewerbsgerichtete Zielsetzung erreicht. Diese zwingt Unternehmen im ÖPNV ihre eigene Aufstellung am Markt zu analysieren und die internen Prozesse entsprechend zu gestalten, um die eigene Position im Wettbewerb zu verbessern.

7 Modulares Konzept zur Verbesserung bestehender Instandhaltungssysteme schienengebundener Fahrzeuge im ÖPNV

Die Analysen in den Kapiteln 5 und 6 haben die Problemfelder von Instandhaltungssystemen aufgezeigt. Aus diesen Ergebnissen heraus wird ein Konzept zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bestehender Instandhaltungssysteme für Schienenfahrzeuge im ÖPNV entwickelt und in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Das Fundament des Konzeptes besteht aus einem modularen Aufbau (vgl. Abbildung 7-1). Dieser unterstützt vor allem eine strukturierte und zielgerichtete Vorgehensweise und hilft, sich auf Teilbereiche in der Instandhaltung zu konzentrieren sowie Verbesserungsansätze konsequent zu verfolgen und umzusetzen.

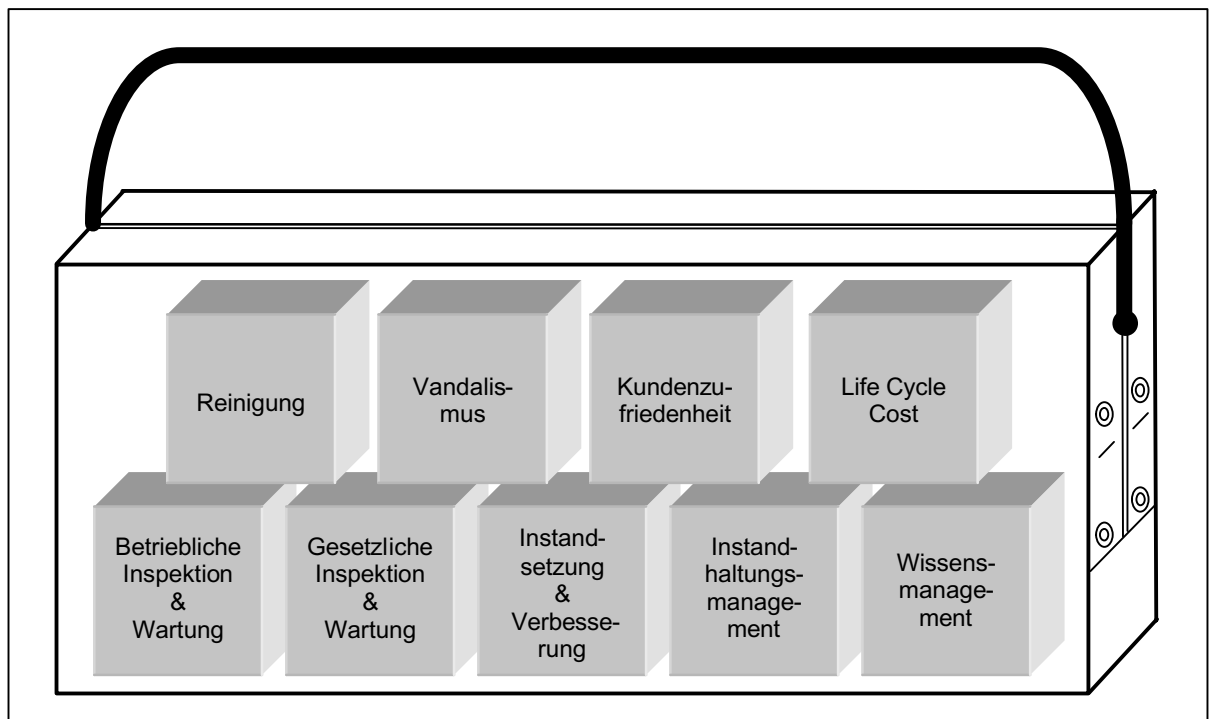


Abbildung 7-1: Modularer Werkzeugkasten zur Verbesserung bestehender Instandhaltungssysteme im ÖPNV

Die einzelnen Module beschreiben Aufgabengebiete, die für eine wettbewerbsorientierte Instandhaltung zyklisch wiederkehrend oder kontinuierlich durchlaufen werden sollten. Zwischen den Modulen existieren Abhängigkeiten, die zu einem späteren Zeitpunkt herausgearbeitet und diskutiert werden.

Sämtliche hier behandelte Tätigkeiten im Werkstattbereich sind einer Make-or-Buy Analyse zu unterziehen. Die Anwendbarkeit dieses Konzeptes ist nicht auf Verkehrsunternehmen beschränkt, sondern lässt sich bei entsprechender Modifikation auch auf reine Instandhaltungsbetriebe anwenden.

Nachfolgend werden die Aufgabengebiete und Ziele der einzelnen Module beschrieben.

7.1 Modul I – Kundenzufriedenheit

Die Kenntnis über die Zufriedenheit der Kunden, also des Fahrgastes, ist im ÖPNV ein wichtiges Instrument, um die Bemühungen eines Verkehrsunternehmens den Gewinn zu steigern und die Wettbewerbsposition zu verbessern, kundenwirksam zu unterstützen. Innerhalb dieses Moduls sind folgende Aufgabengebiete zu bearbeiten, um die Kundenzufriedenheit zu messen, zu bewerten und zu verbessern:

- Kundenorientiertes Kennzahlensystem
- Kundenbefragungen
- Bewertung von Veränderungen

Voraussetzung für die Messbarkeit der Kundenzufriedenheit bildet ein Kennzahlensystem, dass die erbrachte Leistung am Kunden bewertbar macht. Dabei spielen die Faktoren Zeit, Kosten und Qualität eine entscheidende Rolle. Sie lassen sich in vielerlei Kriterien aufschlüsseln. Es wird empfohlen, das Kennzahlensystem durch strikte Begrenzung der Anzahl von Bewertungsgrößen auf maximal sechs in überschaubarem Rahmen zu halten. Hierzu können vorab Befragungen der Fahrgäste über die Wichtigkeit einzelner Kriterien hilfreich sein. Dazu ist es sinnvoll, eigene Kriterien vorzugeben und frei geäußerte Wünsche der Kunden aufzunehmen. Es ergibt sich damit je nach Gewicht und Häufigkeit der Nennungen eine Rangfolge, anhand dieser das Kennzahlensystem aufgebaut oder verändert werden kann. Intern ist darauf zu achten, dass das System zur Bewertung der Kundenzufriedenheit mit dem Kennzahlensystem zur Bewertung der Instandhaltungsleistung (vgl. Modul IX) einhergeht.

Generell sollten in definierten Zyklen oder vor und nach der Umsetzung von gravierenden kundenwirksamen Veränderungen Befragungen der Kunden durchgeführt werden. Die Zeitpunkte sind frei wählbar. Es muss jedoch beachtet werden, dass gewisse Maßnahmen erst einige Monate später ihre Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit zeigen. Die Art der Durchführung von Kundenbefragungen sollte gefächert in verschiedene Altersstufen ausgehend vom persönlichen Interview bis hin zur Onlinebefragung gestaltet sein. Dabei können kleine Dankeschönprämien die Hilfsbereitschaft der Kunden fördern.

Für eine Bewertung von Veränderungen der Kundenzufriedenheit sind die aktuellen Kennzahlenwerte und die Kennzahlenwerte der Vergangenheit miteinander zu vergleichen. Damit ist der jeweils aktuelle Trend bestimmt. Die damit erzielten Veränderungen der Kundenzufriedenheit sind messbar. Erfolg oder Misserfolg von eingeleite-

ten Maßnahmen sind dadurch direkt zu erkennen. Es wird empfohlen, die Daten über längere Zeiträume zu sammeln und gegenüber zu stellen, um eine Bewertung verschiedener Maßnahmen in Bezug auf Kosten und Erfolg vornehmen zu können. Entsprechend der Ergebnisse können weitere Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden.

7.2 Modul II – Reinigung

Die Reinigung der Fahrzeuge wird vornehmlich aus Gründen der Kundenzufriedenheit und der Sicherheit sowie zum Erhalt der Fahrzeuge durchgeführt. Wie in Kapitel 5 dargestellt, treten im Laufe des Lebenszyklus eines Fahrzeugs hohe Kosten für die Reinigung auf. Bei der dort untersuchten Fahrzeugserie sind innerhalb von 13 Jahren durchschnittlich Kosten von mehr als 4 % bezogen auf die Anschaffungskosten angefallen.

Für eine effiziente und kostengünstige Reinigung der Fahrzeuge fordert das gleichnamige Modul nachfolgende Aufgabengebiete in der Reinigungsstrategie zu beachten:

- Philosophie des Verkehrsunternehmens
- Kosten-Nutzen-Analyse
- Arbeitsinhalte
- Zeitvorgaben
- Intervalle

Die Philosophie des Verkehrsunternehmens und die Anforderungen des Bestellers legen auch die Grundlagen hinsichtlich der Sauberkeit der Fahrzeuge fest. Werden hier umfassende Vorgaben gemacht, z. B. tägliches Aufwischen des Fahrzeugbodens, bestehen damit Randbedingungen für Inhalte und Intervalle der Reinigungsarbeiten. Die Philosophie sollte sich auch an wirtschaftlichen Faktoren orientieren, die aus einer Kosten-Nutzen-Analyse stammen. Dabei sind die Kundenzufriedenheit und der Erhalt der Fahrzeuge monetär zu bewerten und dem entsprechenden Reinigungsaufwand gegenüberzustellen. Eine Gefährdung der Sicherheit durch unzureichende Reinigungsmaßnahmen ist in jedem Fall zu vermeiden.

Die Reinigungsintervalle und die Arbeitsinhalte sollten an die Ergebnisse einer Kosten-Nutzen-Analyse angepasst werden. Dazu sind anhand von Betriebsstunden oder gefahrenen Nutzwagenkilometern erforderliche Reinigungsarbeiten zu definieren. Das maximale Reinigungsintervall orientiert sich dabei am für den Fahrgast maximal zumutbaren Verschmutzungsgrad ohne verstärkte Einbußen in der Kundenzufriedenheit zu haben. Zusätzlich können saisonale Unterschiede für die Reinigungsinter-

valle eine wichtige Rolle spielen. Durch Variation bestehender Intervalle einzelner Reinigungsarbeiten bei gleichzeitiger Beobachtung der Entwicklung der Kundenzufriedenheit können langfristig die Kosten für die Reinigung der Fahrzeuge reduziert werden.

Zusätzlich zu den Arbeitspaketen sind die Vorgabezeiten entsprechend anzupassen. Diese sollten sich auf reale Zeitmessungen stützen und können z. B. in Benchmarks mit anderen Verkehrsunternehmen verglichen werden.

Eine Verlagerung der Reinigungstätigkeiten in Schwachlastzeiten bewirkt eine langfristige Reduzierung der Fahrzeugreserve, da die zur Verkehrsspitze benötigte Fahrzeugreserve sinkt. Es ist weiterhin zu prüfen, ob eine Kopplung mit Intervallen der Instandhaltung sinnvoll und realisierbar ist. Dabei kann der logistische Aufwand für die Fahrzeugzuführung und die Summe der Stillstandzeiten erheblich reduziert werden. Eine solche Verzahnung von Reinigungs- mit Inspektions- oder Wartungsleistungen je nach den Anforderungen an die Sauberkeit für einen großen Teil der zu reinigenden Gewerke vorstellbar. Allerdings können dann jedoch die angestrebten Intervalle vom eigens bestimmten Optimum abweichen. Eine zusätzliche Möglichkeit der Fahrzeugreinigung besteht während der Totzeiten der Fahrzeuge. Diese werden dann auf entsprechenden Abstellgleisen geparkt und während der Stillstandzeit, ohne zusätzliche Zuführung der Fahrzeuge in entsprechende Werkstätten, durch mobile Reinigungsteams gereinigt.

7.3 Modul III – Betriebliche Inspektion & Wartung

Die betriebliche Inspektion & Wartung bildet die Grundlage zur Gewährleistung eines zuverlässigen Fahrbetriebes bei hoher Sicherheit. Ihre Bedeutung für die Verkehrsunternehmen wächst weiter, wenn man beachtet, dass aus diesen Forderungen große Kosten für Instandhaltungstätigkeiten resultieren. Ein langfristiges Ziel muss es daher sein, seine Bemühungen in diesem Bereich dergestalt zu orientieren, dass ein zuverlässiger Fahrbetrieb mit hoher Sicherheit bei möglichst niedrigen Kosten erzielt wird.

Zum Erreichen dieser Ziele, sieht das Modul folgende drei Arbeitspakete vor:

- Intervalle und Arbeitsinhalte
- Zeitvorgaben
- Tätigkeitsbeschreibungen

Insbesondere die Analyse in Kapitel 6 hat gezeigt, dass in diesem Bereich zwischen den Fahrzeugserien erhebliche Unterschiede in den verursachten Kosten bestehen.

Für eine wettbewerbsfähige Instandhaltung ist es erforderlich, sich intensiv mit der Frage nach Inspektionsintervallen und den erforderlichen Arbeitsinhalten zu beschäftigen. Dazu ist es sinnvoll, zunächst das Fahrzeug gedanklich in Baugruppen zu gliedern und diese nach dem Entscheidungsbaum in Abbildung 7-2 in Kategorien einzuteilen.

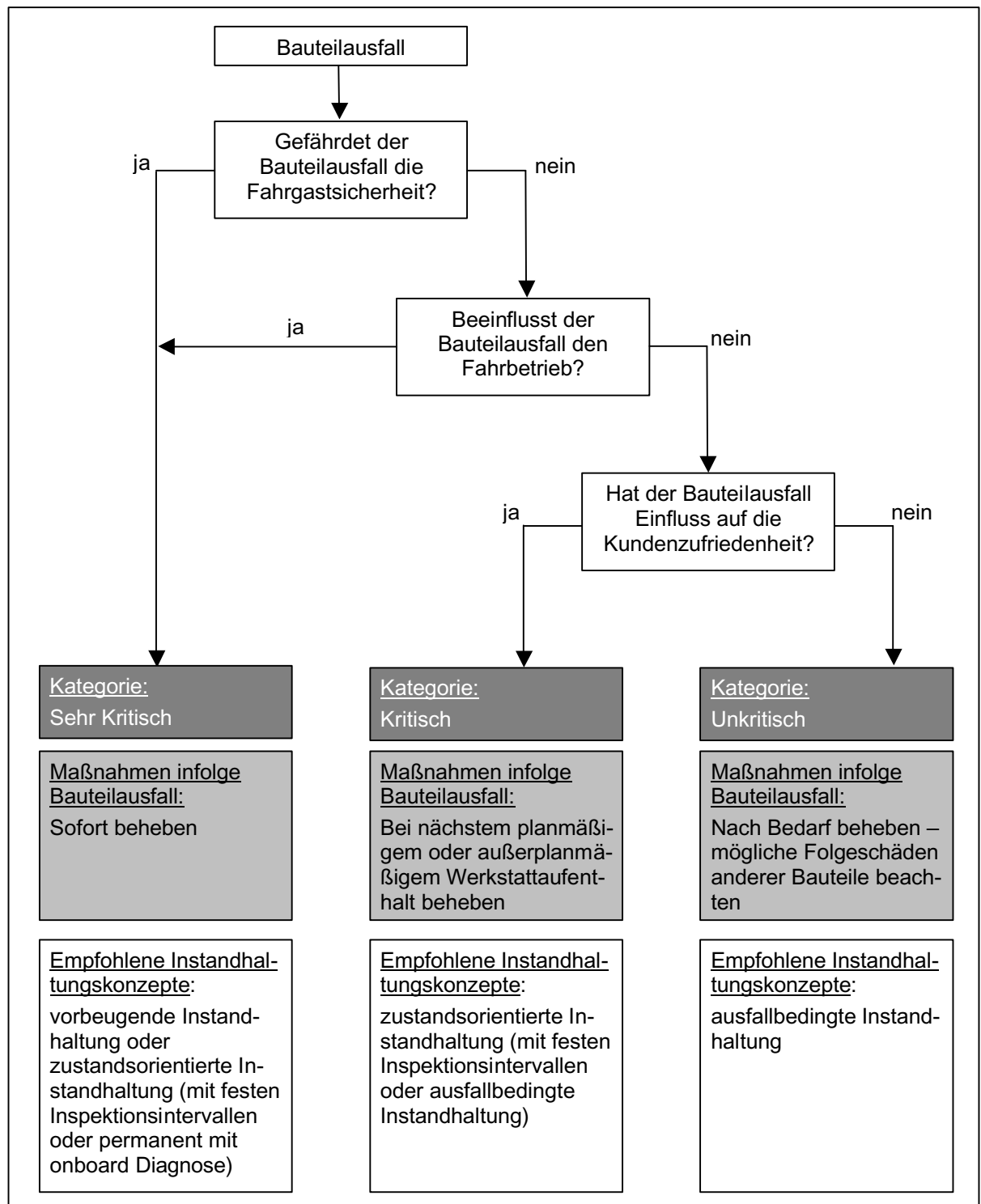


Abbildung 7-2: Entscheidungsbaum zur Kategorisierung von Bauteilausfällen

Ist das Fahrzeug vollständig über diese Einteilung abgebildet, müssen entsprechende Inspektionsintervalle für die Bauteile der Kategorien „sehr kritisch“ und „kritisch“ definiert werden. Die Festlegung der Inspektionsintervalle basiert hauptsächlich auf eigenen Erfahrungen oder auf Vorgaben des Fahrzeugherstellers. Dabei müssen die Intervalle nicht zwingend statisch sein, sondern können durchaus dynamisch, d. h. mit sich ändernden Laufleistungen zwischen Inspektion & Wartung gestaltet werden. Vorteile können in einer besseren Ausnutzung des Abnutzungsvorrates und in einer Verlängerung der Intervalle liegen. Nachteilig dabei ist der steigende logistische Aufwand für die Planung der Intervalle und der Werkstattstellplätze sowie des Personalbedarfs.

Ein weiteres Ziel der Planung von Inspektions- und Wartungsintervallen muss sein, die Stillstandzeiten der Fahrzeuge unter Beachtung der Personalkapazitäten möglichst kurz zu gestalten. Damit kann eine Reduzierung der für den reibungslosen Fahrbetrieb notwendigen Werkstattreserve an Fahrzeugen und eine Verminderung des durch die Fahrzeuge gebundenen Kapitals durch erreicht werden.

In den Stillstandzeiten spiegeln sich auch die Arbeitszeitvorgaben für die Einzelschritte der Tätigkeiten wieder. Diese sollten durch Zeitmessungen unter realen Bedingungen ermittelt werden. Durch eine geringe Abweichung zwischen den vorgegebenen Zeiten für die Arbeitsschritte und der tatsächlich benötigten Zeit steigt die Planungssicherheit für Verkehr, Werkstatt und den kaufmännischen Bereich.

Mit Hilfe detaillierter Tätigkeitsbeschreibungen verringern sich Fehler, die bei den auszuführenden Tätigkeiten aufgrund mangelnder Kenntnis entstehen können. Diese sind in Zusammenarbeit mit der Werkstatt zu definieren. Zu den beschriebenen Aufgaben zählen neben den Instandhaltungstätigkeiten auch Prüftätigkeiten an bereits gewarteten Bauteilen oder Baugruppen.

Der dargestellte Entscheidungsbaum geht weit über die Kategorisierung von Bauteilausfällen hinaus. Er liefert zusätzlich Hinweise für Maßnahmen infolge eines Bauteilausfalls und insbesondere Empfehlungen für die umzusetzenden Instandhaltungskonzepte. Er bietet somit eine Entscheidungsgrundlage für die generelle Konzeption eines Instandhaltungssystems.

7.4 Modul IV – Gesetzliche Inspektion & Wartung

Das Modul IV beschäftigt sich vornehmlich mit gesetzlich vorgeschriebenen Tätigkeiten im Rahmen von Inspektion & Wartung in Anlehnung an die BOStrab. Darüber hinaus sind hier Tätigkeiten zu planen, die über die von der TAB als notwendig festgelegten Arbeiten hinausgehen. Es erscheint sicherlich lohnenswert auch Inhalte einer ohnehin anstehenden Inspektion & Wartung dabei zu berücksichtigen. Damit

wird die Stillstandzeit effektiv genutzt und eine weitere Fahrzeugzuführung zur Betriebswerkstatt vermieden. Für eine effiziente Gestaltung der gesetzlichen Inspektion & Wartung sind folgende Arbeitspakete umzusetzen:

- Arbeitsinhalte nach BOStrab
- Intervalle nach BOStrab
- Zusätzliche Arbeitsinhalte
- Zeitvorgaben
- Tätigkeitsbeschreibungen

Zur Festlegung der Arbeitsinhalte kann der Entscheidungsbaum in Abbildung 7-3 genutzt werden. Hier sind insbesondere sicherheitsrelevante Bauteile und Baugruppen von Bedeutung.

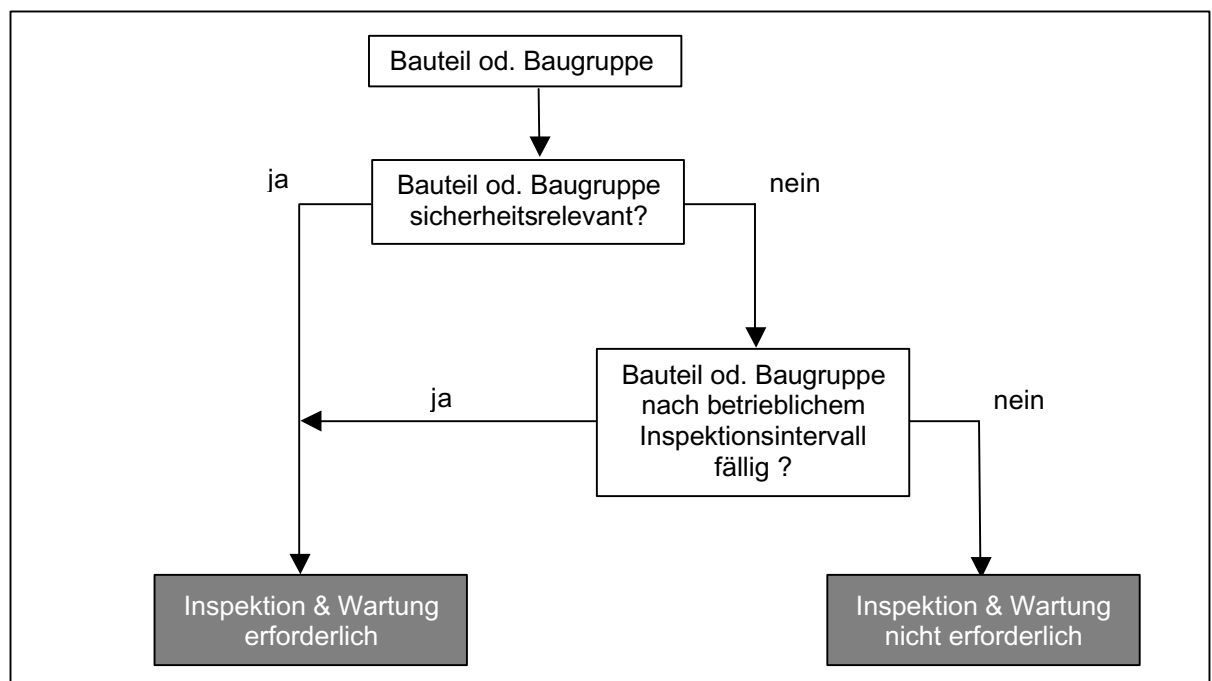


Abbildung 7-3: Entscheidungsbaum für die Festlegung der Arbeitsinhalte von gesetzlicher Inspektion & Wartung

Die Intervalle für die gesetzliche Inspektion & Wartung sind im §57 BOStrab festgelegt. Eine Verlängerung dieser Intervalle ist anzustreben, um die mit den Tätigkeiten verbundenen Kosten in Summe über den gesamten Lebenszyklus zu reduzieren. Allerdings muss in diesem Fall der Aufwand für das zyklisch wiederkehrende Genehmigungsverfahren den langfristigen Kosteneinsparungen gegenübergestellt werden. Die Kosten für das Genehmigungsverfahren spielen im Vergleich zu den Einsparungen jedoch eine untergeordnete Rolle. Lohnenswert ist eine Verlängerung, wenn dadurch mindestens eine gesetzliche Inspektion & Wartung im gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs eingespart werden kann. Je mehr Fahrzeuge einer

Fahrzeugserie mit Genehmigung zur Laufleistungsverlängerung entstammen, desto größer sind die Einsparungen.

Die Inspektionsintervalle sind entsprechend den betrieblichen Inspektionsintervallen in die Abfolge zu integrieren. Zeitvorgaben und Tätigkeitsbeschreibungen orientieren sich an den Vorgaben der betrieblichen Inspektion & Wartung.

7.5 Modul V – Instandsetzung & Verbesserung

Das Modul Instandsetzung steht in enger Verknüpfung mit den Modulen zur betrieblichen und gesetzlichen Inspektion & Wartung. In der Regel werden bei der Kontrolle Schäden an Bauteilen festgestellt, die einer Instandsetzung bedürfen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass ein Bauteilausfall während des Betriebes durch den Fahrer festgestellt wird und dieser entsprechende Maßnahmen zu Behebung auslöst. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Instandsetzung in erster Linie nicht nur rein monetären Einfluss auf das Instandhaltungssystem eines Verkehrsunternehmens hat, sondern ebenso auf die Werkstattreserve, die Inspektions- und Wartungsintervalle, die Fahrzeug- und Werkstattlogistik sowie auf die Kundenzufriedenheit. Den Ausfall von Bauteilen zu kontrollieren und ggf. deren Abnutzungsverhalten zu steuern, ist ein Ziel dieses Moduls.

Als Leitfaden zur Reduzierung des Instandsetzungsaufwandes, langfristiger Kostensenkung und Zuverlässigkeitssteigerung werden folgende Arbeitspakete empfohlen:

- Fehlersuche und -beurteilung
- Tätigkeitsbeschreibungen
- Zeitvorgaben
- Ersatzteilwesen
- Kennzahlensystem
- Identifikation von Ausfall- und Kostentreibern
- Ursachenforschung
- Verbesserungswesen

Den eigentlichen Instandsetzungsarbeiten geht meist eine Fehlersuche voraus, die von wenigen Minuten bis hin zu einigen Stunden dauern kann (vgl. Kapitel 6). Sie erfordert großes Fachwissen und Systemkenntnis, um zielgerichtet und effizient die defekten Bauteile zu identifizieren. Hilfreich können dabei Diagnosesysteme sein, die entweder onboard integriert sind oder mobil eingesetzt werden können. Weiterhin ist es sinnvoll Erfahrungswerte über die Fehlersuche bei bestimmtem Fehlverhalten des Fahrzeugsystems zu nutzen. Die Erfahrungswerte können der eigenen Werkstatt, Informationen des Fahrzeugherstellers oder anderer Verkehrsunternehmen ent-

stammen. Diese Erfahrungen sind in einer Wissensdatenbank (vgl. Modul VIII) zu speichern. Daraus müssen Routinen entwickelt werden, die eine zielgerichtete Fehlersuche unterstützen und so den damit verbundenen Zeitaufwand deutlich reduzieren.

In enger Verbindung zur Fehlersuche steht die Fehlerbeurteilung. Sie entscheidet darüber, ob ein aufgetretener Defekt zwingend behoben werden muss, oder nicht. Die Entscheidung kann mit Hilfe des Entscheidungsbaums aus Abbildung 7-2 getroffen werden. Sie beeinflusst die Instandsetzungskosten, die nach den Kapiteln 5 und 6 einen großen Anteil der an den Gesamtkosten tragen.

Die eigentlichen Instandsetzungsarbeiten sind mit Tätigkeitsbeschreibungen unter Angabe von benötigten Werkzeugen und mit unter realen Bedingungen ermittelten Zeitvorgaben zu definieren. Zur optimalen Lösungsfindung ist es auch hier zwingend erforderlich, die Erfahrungswerte des Werkstattpersonals zu nutzen.

Für eine Reduzierung von Materiallagerbeständen wäre es wünschenswert, wenn der Verbrauch des Abnutzungsvorrates jedes einzelnen Bauteils vorhergesagt werden könnte. Diese Wunschvorstellung wird unterstützt durch die Vision, dass die Fehlersuche bereits vor der Fahrzeugzuführung zur Werkstatt durch mobiles Personal oder Diagnosesysteme durchgeführt wird. Damit wäre für einen großen Teil der Maßnahmen eine zeitnahe Zuführung der Ersatzteile zur Instandhaltung möglich, ohne große Lagerbestände aufzubauen. Die Realität zeigt hier jedoch Randbedingungen, die eine zeitnahe Materialzuführung ohne eine kostenintensive Materialbevorratung nicht möglich machen, da Ersatzteile, wie z. B. Getriebe, Lieferzeiten von mehreren Wochen haben. Um dennoch den Lagerbestand langfristig zu reduzieren, können Statistiken über die Ausfallraten und das Abnutzungsverhalten der verschiedenen Bauteile und Baugruppen helfen, den Entscheidungsprozess über die Lagerung insbesondere kostenintensiver Materialien zu beeinflussen. Zu beachten sind dabei ebenso die Lieferzeiten der Ersatzteile, welche in ungünstigen Situationen zu längerfristigem Stillstand von Fahrzeugen führen und damit die Werkstattreserve negativ beeinflussen.

Die Einführung eines instandsetzungsgerechten Kennzahlensystems ermöglicht die Beurteilung von Bauteilausfällen in Bezug auf die Gefährdung von Fahrgastsicherheit und Fahrbetrieb, in Bezug auf Ausfallhäufigkeit, Instandsetzungskosten, Stillstandzeit und Kundenwirksamkeit. Dazu ist die Bestimmung von MDBF-Werten (Mean Distance Between Failure) sinnvoll, die auf einige der oben genannten Parameter angewendet werden können. Sie ermöglichen eine lauffleistungsbezogene Beurteilung der aufgetretenen Defekte und helfen Maßnahmen präventiv einzuleiten. Weiterhin können dadurch Ausfalltreiber eindeutig identifiziert werden. Zusätzlich ist es erforder-

derlich die Ausfälle finanziell zu bewerten. Dazu werden die mit den Instandsetzungstätigkeiten verbundenen Kosten auf die jeweiligen Baugruppen unter Einbeziehung von Stillstandzeit und Kundenwirksamkeit bezogen. Es empfiehlt sich, das Kennzahlensystem für die Instandsetzung so zu gestalten, dass es in ein umfassendes System zur Beschreibung der gesamten Instandhaltung integriert werden kann. Die für den Instandsetzungsbereich einzuführenden Kennzahlen sind dem Modul IX zu entnehmen.

Für die zukünftige Vermeidung von Bauteilausfällen ist eine detaillierte Ursachenforschung unerlässlich. Dabei sind die größten Bemühungen zunächst auf diejenigen Baugruppen zu richten, die anhand ihrer Kennzahlen als Kosten- und Ausfalltreiber identifiziert werden. Oberste Priorität liegt demnach bei Baugruppen, deren Instandsetzungskosten pro Nutzwagenkilometer oder ihre Ausfallhäufigkeit bei gleichzeitiger Wirkung auf Fahrgäste sehr hoch sind. Es sind dementsprechend Inspektions-, Wartungs- oder Instandsetzungsintervalle und deren Inhalte sowie eventuelle konstruktive Änderungsmaßnahmen im Hinblick auf Kosten, Werkstattreserve, logistischen und planerischen Aufwand zu prüfen und in einer gesamtheitlich guten Lösung umzusetzen. Damit wird auch eine Steigerung der Kundenzufriedenheit durch höhere Zuverlässigkeit der Fahrzeuge erzielt.

Aus den auftretenden Bauteilausfällen entsteht die Forderung nach Verbesserung der aktuellen Situation. Hierzu wird eine Bündelung von Expertenwissen empfohlen, um diese zielgerichtet auf die Problemfelder anzuwenden. Als Experten können dazu interne und externe Fachspezialisten hinzugezogen werden. Das damit verfolgte Ziel liegt in der langfristigen Vermeidung konstruktiver Gestaltungsmängel. Um dieses Ziel zu erreichen muss ein Informationsrückfluss aus der Instandhaltung zu den Fahrzeugherstellern aber auch die Umsetzung daraus abgeleiteter Maßnahmen gewährleistet werden. Die Fahrzeughersteller sind dahingehend zu beeinflussen, die Erfahrungen und Analysen der Verkehrsunternehmen in ihren Neukonstruktionen zu berücksichtigen und in beanspruchungs- und instandhaltungsgerechten Konstruktionen umzusetzen. Nur so kann die Anzahl potentieller Fehlerquellen vor Inbetriebnahme der Fahrzeuge reduziert und damit deren Instandsetzungskosten gesenkt sowie die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge gesteigert werden. Bei Neuanschaffungen ist dieser Aspekt zwingend zu berücksichtigen, da sich Fehlgestaltungen langfristig in den Instandhaltungskosten negativ widerspiegeln (vgl. Kapitel 5 und 6).

Weiterhin ist anhand der Analyse der Bauteilausfälle eine zeitnahe Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen zu prüfen. Um eine optimale Lösung zu erzielen, sollten die Erfahrungen und das Fachwissen der Werkstattmitarbeiter unter allen Umständen eingebracht werden. Für einen langfristig kostenreduzierten Betrieb sind die mit den für eventuelle Umbauten entstehenden Kosten und die prognostizierten Kosten-

einsparungen gegenüberzustellen. Entsprechend diesem Prüfergebnis wird eine umfangreiche Versuchsreihe mit umgebauten Zügen unter realen Einsatzbedingungen empfohlen. Stellt sich dabei die vorhergesagte Kostenreduzierung bei gleichzeitiger Zuverlässigkeitssteigerung ein, ist ein sukzessiver Umbau aller Fahrzeuge dieser Serie durchzuführen.

7.6 Modul VI – Vandalismus

Im letzten Jahrzehnt ist Vandalismus mehr und mehr zu einer „Sprache“ vieler Jugendlicher geworden. Diese Entwicklung zeichnet sich auch in der mutwilligen Beschädigung und Verschmutzung von U-Bahnfahrzeugen ab. Scheibenscratching, Graffiti sowie beschmierte und zerschlitzte Inneneinrichtungen gehören dabei zu den häufigsten Vandalismusschäden.

Neben den finanziellen Schäden, die einem Verkehrsunternehmen durch Vandalismus zugefügt werden, stellt sich die Frage nach der Beeinflussung von Fahrgastsicherheit, Fahrbetrieb und Kundenzufriedenheit. Die mit dem Vandalismus verbundenen Aufwendungen (vgl. Kapitel 5) werden sich langfristig auch auf die Kundenzufriedenheit auswirken, da die zusätzlichen Kosten durch Mehreinnahmen, möglicherweise in Form einer Fahrpreiserhöhung, gedeckt werden müssen.

Für eine bessere Beeinflussbarkeit des Vandalismus und der damit verbundenen Schäden an den Fahrzeugen, wird empfohlen, sich mit folgenden Thematiken zu befassen und die Ergebnisse zielgerichtet anzuwenden:

- Interne und externe Anforderungen
- Schadensbewertung
- Maßnahmen

Vandalismus zieht häufig kundenwirksame Beschädigungen der Fahrzeuge nach sich. Dieser Einfluss auf die Kunden resultiert nicht allein aus der Tatsache, dass ein Fahrzeug z. B. beschmiert ist. Vielmehr wird durch die Häufigkeit und den Umfang der Beschädigungen eine gewisse Unzufriedenheit der Kunden hervorgerufen. Aus diesem Zusammenhang definieren sich interne oder externe Anforderungen als eine Art „Philosophie über die Notwendigkeit zur Vermeidung und zur Beseitigung von Vandalismusschäden“. Diese steht in engem Zusammenhang mit den zur Vermeidung und zur Beseitigung von mutwilligen Beschädigungen anfallenden Kosten.

Für eine Definition interner Anforderungen hinsichtlich vorbeugender Maßnahmen und Schadensbeseitigung ist es erforderlich, die auftretenden Schadensbilder nach den Kategorien Fahrgastsicherheit, Fahrbetrieb, Kundenzufriedenheit und Kosten zu

bewerten und zu gewichten. Es lässt sich daraus ein Gesamtgewicht der Schadensbilder bestimmen. Das Schadensbild mit dem größten Gesamtgewicht hat oberste Priorität in Bezug auf die Einführung von Präventionsmaßnahmen. Damit ist das Gesamtgewicht Entscheidungsgrundlage für die Festlegung einer internen Philosophie, die die Notwendigkeit zur Beseitigung von Vandalismusschäden widerspiegelt. Die Bestimmung des Gesamtgewichts kann anhand der Matrix in Tabelle 7-1 durchgeführt werden.

Externe Anforderungen an vorbeugende Maßnahmen und Schadensbeseitigung begründen sich vornehmlich auf der Kundenwirksamkeit. Sie können durch den Gewerksträger, i. d. R. die Stadt oder Kommune, vorgegeben werden. Damit ergibt sich die Pflicht für ein Verkehrsunternehmen, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Jedoch sollte die Einflussnahme auf diese externen Vorgaben durch Gespräche mit dem Gewerksträger auf Basis der Ergebnisse der oben gezeigten internen Untersuchung verfolgt werden.

Tabelle 7-1: Matrix zur Bestimmung des Gesamtgewichts verschiedener Schadensbilder infolge Vandalismus als Entscheidungsgrundlage für den erforderlichen Handlungsbedarf

Kategorien	Gewicht	Schadensbild 1	Schadensbild 2	Schadensbild 3	Schadensbild ...	
Fahrgast-sicherheit	0...1	0...10	0...10	0...10	0...10	0...10
Fahrbetrieb	0...1	0...10	0...10	0...10	0...10	0...10
Kunden-zufriedenheit	0...1	0...10	0...10	0...10	0...10	0...10
Verursachte Kosten	0...1	0...10	0...10	0...10	0...10	0...10
Gesamtgewicht						

Einflussfaktor von Schadensbild auf Kategorie

Gewichteter Einfluss
 =
 Einflussfaktor von Schadensbild auf Kategorie x Gewicht

Gesamtgewicht
 =
 Summe „Gewichteter Gesamteinfluss“

Aus den internen und externen Anforderungen sowie der damit verbundenen Schadensbewertung sind Maßnahmen abzuleiten, die langfristig Kosten senken sowie Fahrgastsicherheit, reibungslosen Fahrbetrieb und hohe Kundenzufriedenheit sicher-

stellen sollen. Da sich mit der Zeit immer wieder neue Formen des Vandalismus entwickeln, sind die Maßnahmen entsprechend anzupassen.

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Vandalismus erhebliche Kosten zur Schadensbeseitigung verursacht werden, die im Vergleich zu den Reinigungskosten, den Kosten für Inspektion & Wartung sowie zu den Kosten für Instandsetzungstätigkeiten jedoch eine untergeordnete Rolle spielen.

7.7 Modul VII – Life Cycle Cost

Die Kontrolle und Prognose von Lebenszykluskosten eignet sich hervorragend als Instrument für strategische Entscheidungen. Insbesondere im Bereich der schienengebundenen Fahrzeuge im ÖPNV, in dem die Betriebs- und Instandhaltungskosten die Anschaffungskosten übersteigen können und diese stark durch die Instandhaltung der Fahrzeuge beeinflusst werden, ist eine Verfolgung der Kostenentwicklung über den Lebenszyklus von großer Bedeutung.

Dieses Modul bietet Hinweise und Entscheidungshilfen, die mit den fahrzeugbezogenen Lebenszykluskosten in Verbindung stehen. Inhaltlich werden folgende Aufgabengebiete unterschieden:

- Kostenentwicklung
- Vergleich
- Prognose
- Entscheidungskriterien

Für eine Kontrolle der Lebenszykluskostenentwicklung ist es erforderlich die fahrzeugbezogenen Kosten über den gesamten Lebenszyklus zu erfassen. Dabei sind die Kosten mindestens den Kostenträgern

- Anschaffung,
- Betriebliche Inspektion & Wartung,
- Gesetzliche Inspektion & Wartung,
- Instandsetzung,
- Vandalismus,
- Energie,
- Reinigung und
- Entsorgung

zuzuordnen. Eine weiterreichende Gliederung bietet die Möglichkeit Problemfelder noch gezielter zu erkennen.

Die Lebenszykluskostenanalyse bietet die Möglichkeit die verschiedenen Kostenträger untereinander serienspezifisch oder serienübergreifend zu vergleichen und daraus z. B. Ergebnisse in Bezug auf Fahrzeugkonstruktionen mit kostengünstigen Betriebs- und Instandhaltungseigenschaften abzuleiten. Es besteht die Möglichkeit, daraus direkt Vergleiche über die Kostenwicklung in Abhängigkeit vom Anschaffungspreis zu ziehen. Diese Informationen sind dem Fahrzeughersteller zur Verfügung zu stellen, der die Erkenntnisse in zukünftigen Konstruktionen berücksichtigen sollte. Somit wird zusätzlich zum technologischen Fortschritt eine kontinuierliche Verbesserung für Neufahrzeuge erreicht.

Die Einbeziehung der Inflationsrate bietet eine objektive Betrachtung und wahrt die Vergleichbarkeit von Kosten aus mehreren Jahren sowie von Fahrzeugserien unterschiedlichen Alters. Weiterhin sind die verschiedenen jährlichen Laufleistungen der Fahrzeuge zu beachten, da viele Gewerke der Instandhaltung in laufleistungsbezogenen Intervallen durchgeführt werden. Es wird empfohlen die Lebenszykluskostenbetrachtung zunächst vereinfachend in Jahresscheiben abzubilden, um den mit der Datenerhebung und Datenaufbereitung verbundenen Aufwand zu reduzieren. Besonderheiten können nach Bedarf zu späteren Zeitpunkten detailliert werden.

Aus den Informationen über die Kostenentwicklung einzelner Kostenträger pro Fahrzeug können in Verbindung mit der jährlichen Kilometerleistung für einige der Kostenträger recht gute Prognosen über deren Kostenentwicklung erarbeitet werden. Die Prognosegenauigkeit der einzelnen Kostenträger wurde in Kapitel 5, Tabelle 5-1, bewertet. Die Untersuchung in Kapitel 5 hat weiterhin gezeigt, dass diese Prognose nicht als alleiniges Entscheidungskriterium ausreicht. Vielmehr sind die tatsächlichen Kosten für Instandsetzung, Inspektion & Wartung sowie für die Reinigung der Fahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus zu verfolgen. Dabei sind die Kosten für die gesetzliche Instandhaltung nicht den Jahren ihrer Durchführung zuzuordnen, sondern über die Betriebsjahre gleichmäßig zu verteilen. Als Entscheidungskriterium zur Neuanschaffung von Fahrzeugen und damit verbundener Entsorgung der Altfahrzeuge ist Abbildung 5-17 in Kapitel 5 zu verwenden. Demnach lohnt sich der Ersatz der Altfahrzeuge aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten, wenn einer der dort aufgeführten Entscheidungsfälle eintritt.

Neben der Neuanschaffung kann auch eine Ertüchtigung der Fahrzeuge in Betracht gezogen werden. Dazu sind technische Gutachten zu erstellen und die mit den potentiellen Umbauten verbundenen Kosten sowie die mit den Umbauten erzielbare Lebensdauerverlängerung zu bestimmen. Für die Entscheidung, eine Ertüchtigung durchzuführen oder abzulehnen, gelten dieselben Kriterien, wie bei der Neuanschaffung.

Die Untersuchung in Kapitel 5 hat gezeigt, dass nach 35 Jahren Lebensdauer die dort analysierten Fahrzeuge noch keine bedeutsame Steigerung der Kosten aufweisen. Sie sind damit aus wirtschaftlicher Sichtweise weiterhin zu betreiben.

7.8 Modul VIII – Wissensmanagement

Innerhalb komplexer Instandhaltungssysteme von U-Bahnfahrzeugen ist es wichtig, das Fachwissen z. B. über Vorgehensweisen zur Diagnose oder Kenntnisse über Bauteilausfälle und deren Ursachen langfristig zu nutzen und zu erweitern. Ziel ist es, diese Informationen dergestalt zu verarbeiten, dass Fehler innerhalb der Instandhaltung vermieden, Fahrzeuge verbessert sowie Zeiten zur Fehlersuche und Fehlerbehebung reduziert werden.

Das Modul Wissensmanagement behandelt folgende Themengebiete:

- Vorgehensweisen
- Konstruktion

Zur systematischen Herangehensweise an diese Problemfelder empfiehlt es sich, Kompetenzteams aus Mitarbeitern von Werkstatt und Arbeitsvorbereitung zu bilden und diese eventuell durch Systemspezialisten zu ergänzen, um das individuelle Know-how in einer gemeinsamen Lösung zu vereinen. Die Ergebnisse dieser Projekte sind in der Arbeitsvorbereitung zu sammeln und den anfallenden Arbeiten entsprechend den Werkstattmitarbeitern zur Verfügung zu stellen. Verfügt ein Verkehrsunternehmen über mehrere Werkstätten, ist ein entsprechender Wissensaustausch zu gewährleisten.

Das Aufgabengebiet „Vorgehensweisen“ zielt darauf ab, den Werkstattmitarbeitern gebündeltes Fachwissen zur Verfügung zu stellen. Insbesondere geht es hierbei um das zielgerichtete Aufspüren von defekten Bauteilen und deren Ausfallursachen sowie um die Reduzierung der Arbeitszeiten bei Standardvorgängen. Eine Möglichkeit Fachwissen zur effizienten Fehlersuche einzusetzen, besteht in der Erstellung von Arbeitsplänen oder von Entscheidungsbäumen. Somit wird eine größere Effektivität bei der Fehlersuche gewährleistet.

Die gleiche Vorgehensweise bietet sich auch zur Verbesserung von Standardarbeiten z. B. im Rahmen von Inspektionen. Durch die tägliche Arbeit mit standardisierten Tätigkeits- und Zeitvorgaben setzen sich die Handwerker automatisch mit Verbesserungsmöglichkeiten auseinander, um die Arbeit für sich selbst zu erleichtern und diese effizienter zu gestalten. Daraus können Zeitreserven und Qualitätsverbesserungen entstehen, die es langfristig zu nutzen gilt. Die Umsetzung dieses Spezialwis-

sens sollte daher ebenso wie in den oben angesprochenen Kompetenzteams erfolgen.

Das Know-how der eigenen Mitarbeiter kann zusätzlich zur konstruktiven Verbesserung von Fahrzeugen eingesetzt werden. Dazu empfiehlt es sich, wiederkehrende Schadensbilder anhand ihrer MDBF-Werte und ihrer verursachten Instandhaltungskosten zu untersuchen und somit Ausfall- und Kostentreiber zu identifizieren. Entsprechend den Schadensbildern werden Teams aus Fachspezialisten gebildet, die Verbesserungsvorschläge erarbeiten. Dabei ist neben der Gewährleistung einer hohen Sicherheit und Verfügbarkeit insbesondere auf eine langfristige Kostenreduzierung zu achten. Es müssen hier auch Entscheidungen getroffen werden, für welche Fahrzeuge die Umsetzung entsprechender Verbesserungsmaßnahmen finanziell lohnenswert sind. Dazu kann u. a. die Entscheidungsmatrix aus Modul III genutzt werden.

Im eigenen Interesse ist es erforderlich, die unternehmensinternen Kenntnisse über beanspruchungs- und instandhaltungsgerechte Konstruktionen von U-Bahnfahrzeugen aus den Erfahrungen der Werkstattmitarbeiter an die Fahrzeughersteller weiterzuleiten und somit zu einem Erfahrungsrückfluss zu gelangen. Der Fahrzeughersteller ist dadurch in der Lage, die Fahrzeuge den realen Beanspruchungsbedingungen und angestrebten Instandhaltungsintervallen entsprechend auszulegen. Erzielt werden damit kürzere Stillstandzeiten der Fahrzeuge, eine Reduzierung der außerplanmäßigen Ausfälle und eine Reduzierung der Werkstattreserve. Die Intervalle sind so zu aufeinander abzustimmen, dass die eingesetzten Baugruppen ähnliche Instandhaltungsintervalle oder ganzzahlige Vielfache davon aufweisen. Somit wird zusätzlich die Verschwendung von Abnutzungsvorräten reduziert.

Durch die Umsetzung des Moduls „Wissensmanagement“ werden die Werkstattmitarbeiter aktiv in einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess einbezogen. Damit steigen zusätzlich ihre Motivation und ihre Arbeitsleistung.

7.9 Modul IX – Instandhaltungsmanagement

Zentrales Modul des gesamten Werkzeugkastens zur Verbesserung von Instandhaltungssystemen im ÖPNV bildet das Instandhaltungsmanagement. Es vereint sämtliche Aktivitäten in der Instandhaltung, die für eine optimale Performance des Systems notwendig sind.

Basis des Instandhaltungsmanagements bildet die Steuerung der Module I bis VIII und die Bündelung des werkstattinternen Fachwissens unter Einbeziehung eines Kennzahlensystems. Darauf aufbauend sind folgende Kernbereiche dieses Moduls

zur verfolgen:

- Zentrales Inhouse Consulting
- Strategie
- Instandhaltungsgerechtes Kennzahlensystem

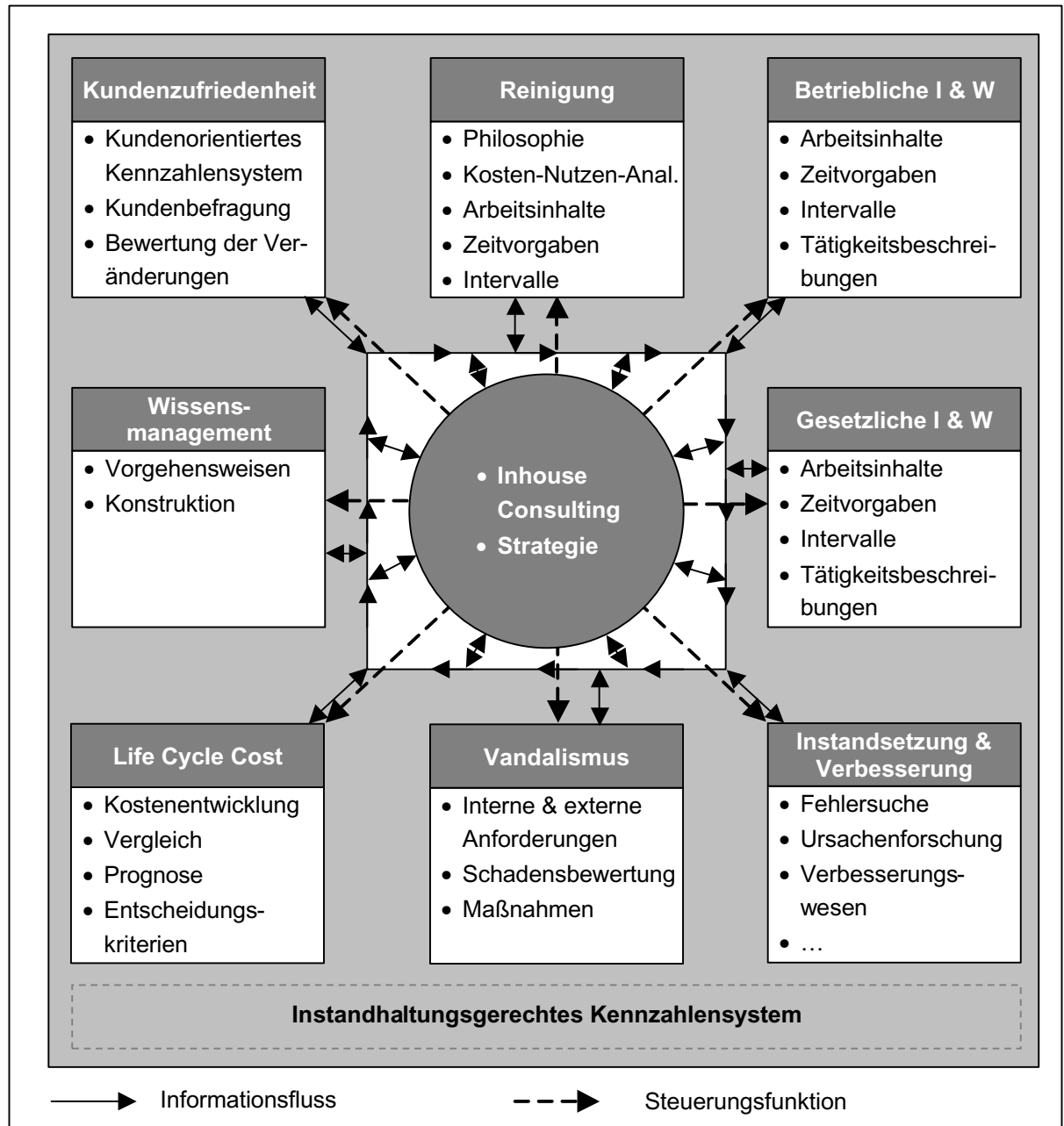


Abbildung 7-4: Funktionsprinzip des Moduls „Instandhaltungsmanagement“

Das hier vorgestellte Konzept bietet eine strukturierte und zielorientierte Vorgehensweise, die auf der Grundlage von Kennzahlen gesteuert wird. Vor allem die Untersuchungen in Kapitel 6 haben gezeigt, dass eine kennzahlenorientierte Analyse, die auf Statistiken beruht, die Ursachen für den Handlungsbedarf zur Reduzierung der In-

standhaltungskosten und des Instandhaltungsbedarfs bei verbesserter Kundenzufriedenheit aufzeigen kann.

Das Funktionsprinzip dieses Moduls ist in Abbildung 7-4 dargestellt und stellt die Schnittstellenfunktionen und den Informationsfluss zwischen den Modulen dar.

Alle Module dieses Systems stehen in enger Verbindung mit dem Instandhaltungsmanagement. Dieses steuert gezielt den Informationsfluss z. B. aus dem Wissensmanagement und übernimmt die Funktion eines zentralen Projektmanagements. Der modulinterne Bereich „Inhouse Consulting“ steht dabei im Mittelpunkt. Die Aktivitäten im Rahmen von Projekten zur Verbesserung des bestehenden Systems werden aus diesem Bereich heraus verwaltet, gesteuert und geleitet. Somit ist gewährleistet, dass Problemfelder aus anderen Modulen bereits bekannt sind und diese daher im Vorfeld berücksichtigt werden können. Dieses wird ebenfalls durch eine zentrale Fehlerauswertung unterstützt. Es sind den Mitarbeitern des Beratungsbereichs weiterhin erarbeitete Ergebnisse aus vergangenen oder aktuellen Aktivitäten bekannt und können so zielgerichtet eingesetzt werden. Damit wird Doppelarbeit vermieden. Es entstehen zusätzlich Lerneffekte, die eine ständige Weiterentwicklung der modulinternen Handlungs- und Sichtweisen fördern. Die Zentralisierung der Projekte wirkt gegenseitigen Behinderungen entgegen und gewährleistet eine gemeinsame strategische Ausrichtung.

Der Bereich Inhouse Consulting steht zusätzlich zu den internen Bereichen auch in enger Verbindung mit dem Fahrzeughersteller. Dabei ist die Weitergabe von Informationsmaterial z. B. von Konstruktionszeichnungen und Statistiken über Bauteilausfälle beiderseitig hilfreich, um ihre Leistungen am Kunden zu verbessern. Weiterhin kann im Vorfeld auf die Konstruktion von Fahrzeugen eingewirkt und das Fachwissen aus den Werkstätten des Verkehrsunternehmens genutzt werden. Ökologieorientierte Ansätze, wie z. B. konstruktionsbedingt gleiche Instandhaltungsintervalle sämtlicher Baugruppen, der Einsatz recyclingfähiger Materialien und eine lange Produktlebensdauer sind von Seiten des Herstellers ebenso während des Konstruktionsprozesses zu beachten, wie eine beanspruchungsgerechte und instandhaltungsorientierte Gestaltung der Fahrzeuge.

Der Kernbereich Strategie hat die Aufgabe eine unternehmensweit einzuführende Strategie zu entwickeln, die sich an den verfolgten Instandhaltungskonzepten orientiert. Diese Strategie ist zwingend kunden- und ergebnisorientiert zu gestalten, um langfristig eine Steigerung der Fahrgastzahlen zu erzielen und so die Einnahmen zu erhöhen. Er wird empfohlen, diese Strategie mit dem nachfolgend erklärten Kennzahlensystem zu koppeln und diese gegenseitig auszurichten. Das Fundament der Strategie sollte anhand der bisherigen Voruntersuchungen auf einem System der kontinuierlichen Verbesserung aufbauen. Nur so ist bei einer Fahrzeugnutzungsdau-

er von über 35 Jahren ein kostenreduzierter Fahrbetrieb auf hohem Zuverlässigkeitsniveau zu erreichen. Als Basis sollte auf bewährte Techniken und Methoden wie Kaizen oder Six Sigma zurückgegriffen werden. Beide Instrumente streben eine uneingeschränkte Kundenorientierung und eine kontinuierliche Verbesserung der Systeme an. Darauf aufbauend sind ggf. Mischformen mit eigenen strategischen Elementen zu bilden, um die Werkzeuge für eine unternehmensspezifisch gute Gesamtlösung einzusetzen. Der Bereich Strategie ist weiterhin für die gezielte Schulung der Mitarbeiter, über die anzuwendenden Techniken und Methoden, verantwortlich. Diese Schulungen können durch internen Wissenstransfer oder von externen Unternehmen durchgeführt werden, wobei interne Schulungen mehr auf die Gegebenheiten des eigenen Systems eingehen können und so eine größere Spezialisierung zu Folge haben.

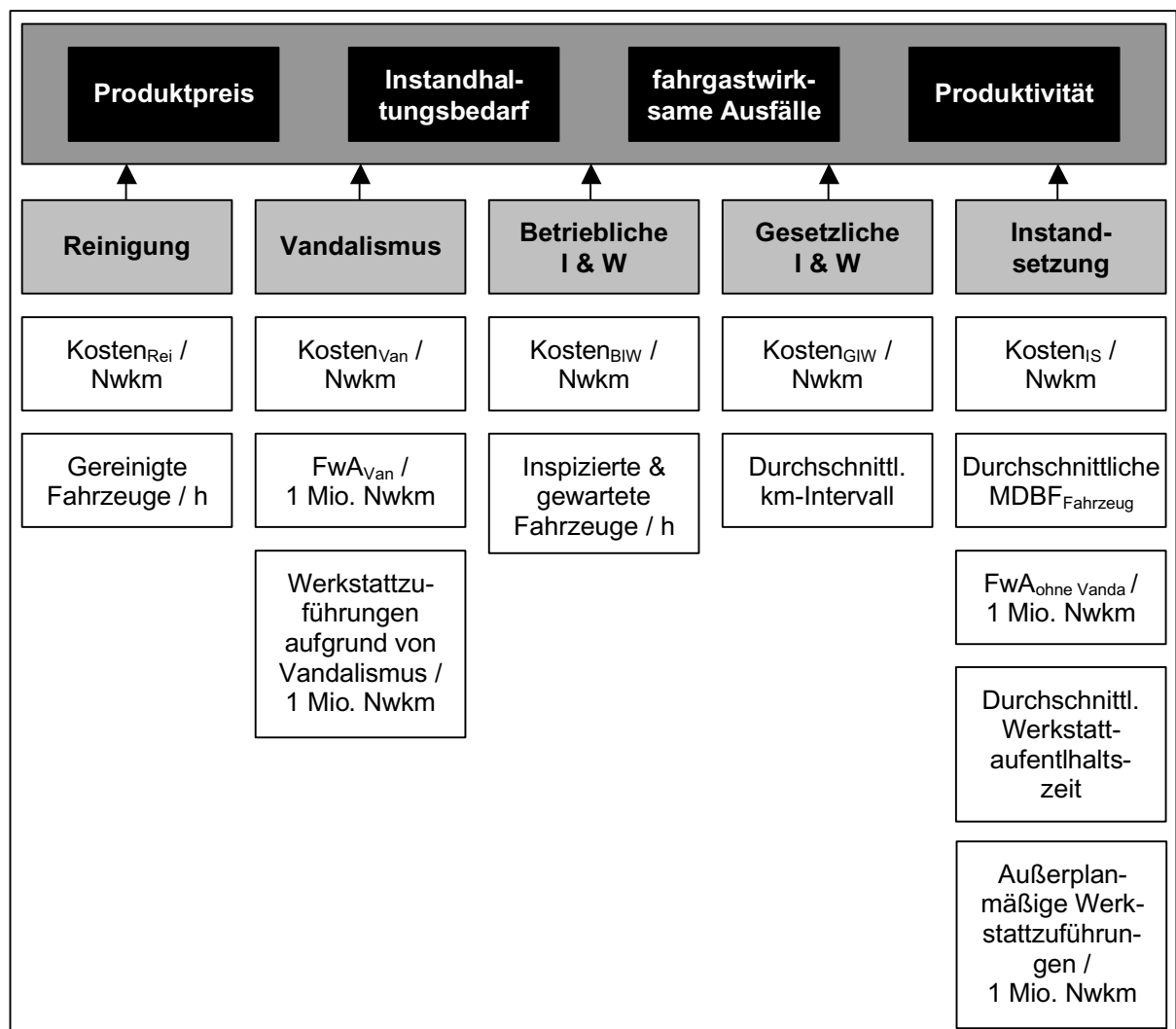


Abbildung 7-5: Instandhaltungsgerechtes Kennzahlensystem

Das instandhaltungsgerechte Kennzahlensystem ist zweistufig aufgebaut. Die Grundlage bilden die Kennzahlensysteme der einzelnen Module. Erweitert werden diese durch die Festlegung übergeordneter Kennzahlen, die das Gesamtsystem cha-

rakterisieren. Für die Einführung eines solchen Kennzahlensystems ist es unerlässlich, die Kennzahlen unmissverständlich für alle Bereiche des Unternehmens einheitlich zu definieren. Weiterhin sind alle Datenquellen zu berücksichtigen und die für die Bestimmung der Kennzahlenwerte heranzuziehenden Quellen festzulegen. Dadurch ist eine durchgängige Konsistenz und Vergleichbarkeit der Werte gewährleistet.

Der Aufbau und die Inhalte des Instandhaltungsgerechten Kennzahlensystems sind in Abbildung 7-5 dargestellt.

Der strukturierte Aufbau des Kennzahlensystems ermöglicht es, den Einfluss von Veränderungen der Kennzahlenwerte auf Modulebene direkt in Veränderungen der übergeordneten Kennzahlen zu überführen. Ebenso wird die Analyse innerhalb der Module durch die Kennzahlen getragen. Sie gewährleisten dabei eine durchgängige Mess- und Bewertbarkeit der einzelnen Gewerke.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, ein in der Praxis anwendbares Konzept zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bestehender Instandhaltungssysteme für schienengebundene Fahrzeuge im ÖPNV zu entwickeln, das auf einer kennzahlengestützten Vorgehensweise aufbaut.

Entscheidend für die Akzeptanz eines regionalen Verkehrsunternehmens ist seine Orientierung auf die Bedürfnisse der Fahrgäste. Deshalb stellt diese Arbeit zunächst die Beziehung zwischen dem Verkehrsunternehmen und der Kundenzufriedenheit heraus. Dabei zeigt insbesondere die Instandhaltung der Fahrzeuge einen großen Einfluss auf die Erfüllung der Kundenerwartungen.

Basierend auf umfangreichen Felddaten eines realen Instandhaltungssystems gründen sich anforderungsspezifische Datenbanken, die als Fundament des analytischen Teils dieser Arbeit dienen.

Darauf aufbauend zeigt eine Lebenszykluskostenanalyse die Entwicklung der Kosten für definierte Kostenträger im Fahrzeugbetrieb und in der Instandhaltung über einen Zeitraum von 13 Jahren. Wie sich daraus ableiten lässt, ist eine Kostenprognose besonders für die Instandsetzung mit großen Ungenauigkeiten verbunden. Die Abweichungen beruhen auf unkontrollierten Bauteilausfällen, die es nicht möglich machen eine Kostenentwicklung über einen größeren Zeitraum mit hoher Genauigkeit vorherzusagen. Ebenso schwierig gestaltet sich die Prognose der vorbeugenden und der infolge von Vandalismus auftretenden Kosten.

Um aus der vorangegangenen Analyse der Lebenszykluskosten eine Aussage über die tatsächliche Kostenentwicklung treffen zu können, wird die Datenbank so erweitert, dass die sich Kosten ausgewählter Kostenträger über einen Zeitraum von 35 Jahren anhand von realen Daten abbilden lassen. Wie diese Untersuchung nachweist, ist es aus wirtschaftlichen Gründen ratsam, die Fahrzeuge länger als 35 Jahre zu betreiben.

Neben der Lebenszykluskostenuntersuchung von U-Bahnfahrzeugen wird die Struktur in einem bestehenden Instandhaltungssystem, basierend auf kosten- und qualitätsorientierten Kennzahlen, analysiert. Eine strukturierte und zielorientierte Vorgehensweise unter Einsatz von statistischen Hilfsmitteln deckt die Problemfelder der Instandhaltung unter Berücksichtigung von Kosten und Kundenzufriedenheit auf. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die mit der Instandhaltung verbundenen Kosten und die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge stark durch die Fahrzeugkonstruktion und damit durch den Fahrzeughersteller beeinflusst werden, das Fahrzeugalter je-

doch eine untergeordnete Rolle spielt. Auch hier hat die Instandsetzung eine Schlüsselfunktion inne, da die mit ihr verbundenen Kosten ca. $\frac{1}{4}$ der jährlichen Gesamtkosten für die Instandhaltung betragen. Darüber hinaus erfordern Fahrzeugausfälle eine kostspielige Reserve an Fahrzeugen, um den geforderten Fahrgastdurchsatz ohne Einschränkungen zu gewährleisten.

In dieser Untersuchung wird deutlich, dass die Vorschriften der BOStrab einen großen Einfluss auf die Instandhaltungskosten haben, obwohl die darauf beruhenden Maßnahmen nur vier bis sechs Mal im Lebenszyklus eines U-Bahnfahrzeugs durchgeführt werden. Eine Laufleistungsverlängerung durch eine Genehmigung der Technischen Aufsichtsbehörde, könnte somit vorhandene Einsparpotentiale nutzen und langfristig Kosten reduzieren.

Auf der Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen wird ein praxisnahes Konzept entwickelt, das hilft, die Wettbewerbsposition von Verkehrsunternehmen oder Instandhaltungsbetrieben im schienengebundenen ÖPNV durch eine ganzheitliche und kennzahlengestützte Sichtweise zu verbessern. Der modulare Aufbau bildet die Basis des Konzeptes. Er erlaubt es, sich auf einzelne Gebiete der Instandhaltung zu konzentrieren, ohne ihr Zusammenspiel in Rahmen der Instandhaltung zu vernachlässigen. Die Steuerungsfunktion übernimmt ein zentrales Instandhaltungsmanagement, das alle Module miteinander vereint. Dieses System zielt darauf ab, die einzelnen Bereiche der Instandhaltung aufeinander abzustimmen und in Kooperation mit dem Hersteller der Fahrzeuge langfristig eine Steigerung der Bauteilzuverlässigkeit sowie eine beanspruchungs- und instandhaltungsgerechte Fahrzeugkonstruktion zu erreichen, die eine Verbesserung der Kundenzufriedenheit und eine Reduzierung der Gesamtkosten unterstützt. Um den Forderungen an das System gerecht zu werden sowie kunden- und kennzahlenorientiert eine kontinuierliche Verbesserung zu erreichen, wird die Einführung von Strategien in Anlehnung an Kaizen oder Six Sigma empfohlen. Ein zweistufig aufgebautes instandhaltungsgerechtes Kennzahlensystem, dass eine durchgängige Mess- und Bewertbarkeit einzelner Systemparameter ermöglicht, rundet das Konzept ab.

Eine Schwierigkeit bei der Umsetzung des Instandhaltungskonzeptes ist die begrenzte Einflussmöglichkeit der Verkehrsunternehmen und Instandhaltungsbetriebe auf den Fahrzeughersteller. Dieser sollte das Know-how der Instandhalter nutzen und bei der Entwicklung in einer kosten-, zuverlässigkeits- und instandhaltungsorientierten Fahrzeugkonstruktion umsetzen.

Durch Einführung des hier erarbeiteten, auf praxisgebundenen Daten beruhenden, Instandhaltungskonzeptes, lässt sich die Effizienz der Instandhaltung und damit die Wettbewerbsfähigkeit steigern. Nicht zuletzt deswegen haben die Berliner Verkehrsbetriebe damit begonnen, Erkenntnisse dieser Arbeit in Ihrem Unternehmen umzusetzen.

9 Quellenverzeichnis

Literatur

- /BAH-70/ Bahr, J.: Instandhaltung dargestellt an Beispielen des Bergbaus Leipzig: VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1970.
- /BAL- 03/ Balzer, G.: Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung am Beispiel eines regionalen Netzbetreibers, Mannheim 2003.
- /BAN-04/ Bannasch, M., Maly, H., Klose, c., Säglitz, M.: Intelligente und flexible Zuginspektion im Hochgeschwindigkeitsverkehr. Hamburg Hestra-Verlag 2004.
- /BEC-94/ Beckmann, G.: Instandhaltung von Anlagen: Konzepte, Strategien , Planung. Leipzig: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1994.
- /BEH-94/ Behrenbeck, K.R.: DV-Einsatz in der Instandhaltung. Erfolgskonzepte und betriebswirtschaftliche Gesamtkonzeption, Wiesbaden 1994.
- /BOS-87/ Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahnen-Bau- und Betriebsordnung BOStrab). 11.12.1987
- /BRU-04/ Brunner, F.J.: Taschenbuch Qualitätsmanagement. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2004.
- /BUT-03/ Butzke, Hentzschel, Jung: Optimierte Instandhaltung, München: Carl Hanser Verlag 2003.
- /BVG-05/ Berliner Verkehrsbetriebe: Ergänzungsbericht zum Marktmonitor 2003, Bearbeitungszustand 27.10.2005.
- /DIN-00/ N.N.: DIN EN 50126 Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) für Bahnanwendungen. Berlin: Beuth Verlag 2000.
- /DIN-03/ N.N.: DIN 31051:2003 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag 2003.

- /DIN-99/ N.N.: DIN IEC 60300-3-3 Zuverlässigkeitsmanagement Teil 3: Anwendungsleitfaden, Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth Verlag 1999.
- /DKI-78/ Deutsches Komitee Instandhaltung. DKIN-Empfehlungen Nr.2.
Gliederung der Instandhaltungsmaßnahmen 1978.
- /DUD-05/ Duden Fremdwörterbuch. Mannheim: Bibliographisches Institut 2005
- /EBO-67/ Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung. Vom 8. Mai 1967.
- /EIC-77/ Eichler, C.: Instandhaltungstechnik, Berlin: VEB Verlag Technik Berlin 1977.
- /ERB-00/ Erb, A.: RAM- und LCC-Modelle für instandhaltungsarme Schienenverkehrs-Infrastrukturen, Wien: Georg Siemens Verlagsbuchhandlung 2000.
- /GEI-98/ Geiger, W.: Qualitätslehre. Einführung, Systematik, Terminologie. Wiesbaden/Braunschweig: Vieweg Verlag 1998.
- /HAR-00/ Harry, M.; Schröder, R.: Six Sigma. Prozesse optimieren, Null-Fehler-Qualität schaffen, Rendite radikal steigern. Frankfurt: Campus Verlag 2000.
- /HER-03/ Herrmann, J.: Techniken des Qualitätsmanagement I+II. Vorlesungsskripte der Technischen Universität Berlin. Berlin 2003.
- /IMA-92/ Imai, M.: Kaizen. Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. München: Langenmüller Verlag 1992.
- /JUN-01/ Jung, H., Junghänel, U.: Bewertung und Optimierung von Zuverlässigkeit und Lebenszykluskosten. EI-Eisenbahningenieur 11/2001.
- /KAL-90/ Kalaitzis, K.: Instandhaltungs-Controlling. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1990.
- /KNE-97/ Knezevic, J.: Systems Maintainability. London: St Edmundsbury Press 1997.
- /KRÜ-95/ Krüger, Anlagenmanagement 1995 (S. 163 ff)

- /KUB-03/ Kubran, M.: Management-„Geheimnis“ Kaizen, Europa Universität Viadrina Frankfurt, Lehrstuhl für BWL 2003.
- /KUH-03/ Kuhn, A.: Wege zu neuen Dienstleistung für die Instandhaltung, Universität Dortmund, Lehrstuhl für Fabrikorganisation 2003.
- /LAN-03/ Lang, G., Reemtsema, K.D.: Konzept und Management des Veränderungsprozesses, Die Qualitätsinitiative Six Sigma der DB AG. Hamburg: Hestra-Verlag 2003.
- /LBS-96/ Landesbildstelle Berlin: Verkehr in Berlin, Berlin: Haude & Spenger 1996
- /LÜR-01/ Lüring, A.: Qualitative Aspekte und quantitative Methoden der Instandhaltung. 2001
- /MAS-98/ Masaaki, I.: „Kaizen“ – Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. Ullstein 1998.
- /MAT-99/ Matyas, K.: Taschenbuch Instandhaltungslogistik. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1999.
- /MAT-02/ Matyas, K.: Taschenbuch Instandhaltungslogistik. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2002.
- /MER-99/ Merckel, C. : Die Ingenieurtechnik im Altertum. Berlin : Verlag von Julius Springer 1899.
- /MEY-81/ Meyer, F.W. : Inspection, I.: Wernecke: Instandhaltung Köln 1981.
- /MOU-96/ Moubray, J. : RCM - die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produktion und Systemen. Landsberg: Verlag moderne Industrie 1996.
- /NAK-88/ Nakajima, S.: Total productive maintenance, Cambridge: Productivity Press 1988.
- /PER-00/ Perganade H.-G., Neuorientierung der Fahrzeuginstandhaltung: Projekt QSI. Hamburg: Hestra-Verlag 2000
- /PRZ-05/ Przybysz, G.: Strategien zur Instandhaltung von Kraft- und Schienenfahrzeugen, Diplomarbeit, Berlin 2005.

- /RAS-00/ Rasch, A. A.: Erfolgspotential Instandhaltung. Duisburg: Erich Schmidt Verlag 2000.
- /RAT-00/ Rath, Strong's: Six Sigma 34 Werkzeuge zur Prozessverbesserung, Köln: TÜV-Verlag, 2002
- /ROE-01/ Rötzel, A.: Instandhaltung. Berlin, Offenbach: VDE Verlag 2001.
- /SIE-02/ Siemens AG Power Generation: Business Excellence Staff Training, Erlangen 2002
- /SIM-98/ Simon, H., Homburg, C.: Kundenzufriedenheit, Konzepte, Methoden, Erfahrungen. Wiesbaden: Gabler-Verlag 2003.
- /SOL-04/ Solleder, Magg: RAMS-Management nach CENELEC in der Praxis. Hamburg: Tetzlaff Verlag 2004.
- /STA-05/ Statistisches Bundesamt: Verbraucherpreisindex und Index der Einzelhandelspreise. 2005.
- /TNS-05/ tnsinfratest Bielefeld: Das ÖPNV-Kundenbarometer. 2005.
- /TNS-05a/ tnsinfratest Bielefeld: Kundenbedürfnisse ÖPNV-Anspruch und Wirklichkeit. 2005.
- /TRA-04/ Trauner, B.; Lucko, S.: ABC der Managementtechniken. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2004.
- /TSU-05/ Tsuda, Y.: Kaizen, Ausgewählte japanische Methoden des Qualitätsmanagements 2005.
- /VDV-00/ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen: Instandhaltung von Schienenfahrzeugen nach BOStrab, Köln 2000.
- /WAR-92/ Warnecke, H-J.: Handbuch der Instandhaltung. Band 1: Instandhaltungsmanagement. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1992.

Quellen aus dem Internet

- /FIR-04/ N.N.:<http://www.fir.de/> : Integration von Instandsetzungsverfahren. Zugriff am 25.06.05

- /MAN-05/ N.N.:<http://www.4mangagers.de/> Zugriff am 16.05.05
- /TQM-05/ N.N.:<http://www.tqm.de/> Zugriff am 31.06.05
- /VER-03/ Verkehrswerkstatt, Haas, H.: Vom Pferdeomnibus zur Pferdestraßen-
bahn.:
<http://www.bics.be.schule.de/son/verkehr/gesch/openv/openv02.htnr/>
Zugriff am 27.10.2005

10 Anhang



Abbildung 10-1: Elemente des Kaizen Schirmkonzeptes

Reinigung	R3		R3	R4 R3	R3		R3	R5 R4 R3	R3		R3	R4 R3	R3		R3	R5 R4 R3
km	10.000	15.000	20.000	30.000	40.000	45.000	50.000	60.000	70.000	75.000	80.000	90.000	100.000	105.000	110.000	120.000
Frist		F0		F1		F0		F1 F2		F0		F1		F0		F1 F2

Abbildung 10-2: Ausschnitt aus einem Fristenplan beispielhaft für die Serien S16/S17

Legende und Erläuterungen zu Abbildung 10-2

Beispielhafte Arbeitsinhalte zu den Fristen (F)	Beispielhafte Arbeitsinhalte der Reinigung (R)
Eingangs- und Ausgangskontrolle	Aufkleber entfernen
Kontrolle Inneneinrichtung	Wandverkleidungen reinigen
Kühlaggregat reinigen	Fenster reinigen
Elektrik prüfen	Fahrerstand säubern
Türrevision, abschmieren	Fußboden wischen
Bremsenprüfung	Lampen reinigen
Radsätze messen	Deckenwäsche
Prüfung der Pneumatikanlage	Sitzpolster reinigen
Motore abschmieren	Zugzielanzeige reinigen

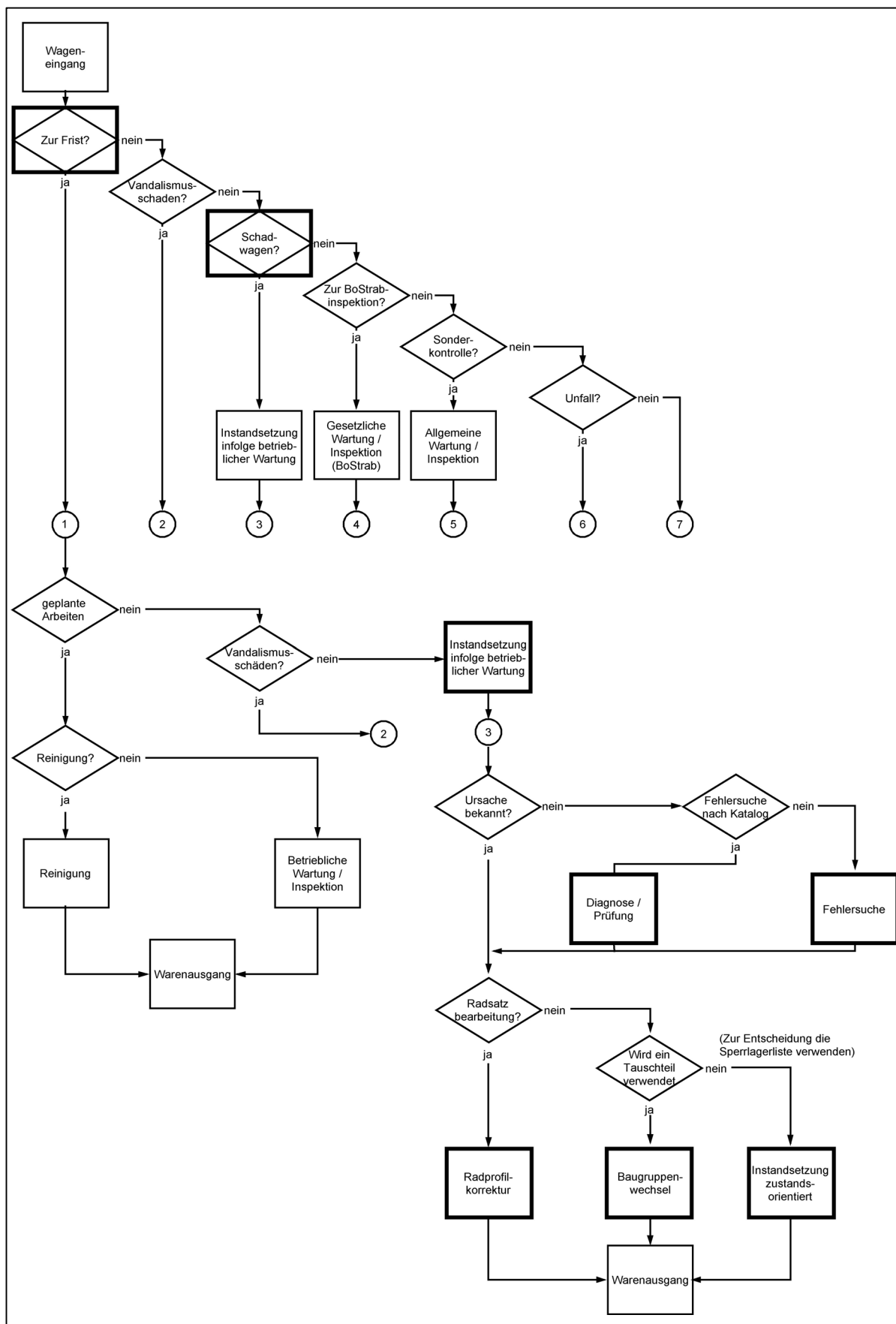


Abbildung 10-3: Buchungsablauf gemäß Instandhaltungsleistungsart Katalog
(Quelle: BVG)

Abbildung 10-4: Inflationsrate der Jahre 1992 - 2004 /STA-05/

Jahr	Inflationsrate
1992	5,0
1993	4,5
1994	2,7
1995	1,7
1996	1,4
1997	1,9
1998	1,0
1999	0,6
2000	1,9
2001	2,0
2002	1,4
2003	1,1
2004	1,6

Supplier	Input	Process	Output	Customer
Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst	Aufgetretene Störung, Fahrzeug	Störung an Bereich Fahrzeuge melden	Info über Fahrzeugstörung via SAP-Meldung/ Telefon	Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge
Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge	Info über Fahrzeugstörung via SAP-Meldung/ Telefon	Bereitstellung Fahrzeug, Weiterleitung Störung	Info über Fahrzeugstörung, Fahrzeug	Technischer Bereichsleiter Bereich Fahrzeuge
Technischer Bereichsleiter Bereich Fahrzeuge	Info über Fahrzeugstörung, Fahrzeug	Planung Stellplatz und Personal	Meldung an Vorhandwerker, Störungsmeldung, Fahrzeug	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Störungsmeldung, Prüfauftrag, Fahrzeug	Eingangsprüfung, Instandhaltungsauftrag in SAP erstellen	Störungsursache, Materialplanung, Arbeitsplan	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Störungsursache, Materialplanung, Arbeitsplan	Durchführung Instandhaltungsmaßnahmen, Endprüfung	Störungsfreies Fahrzeug, Fertigmeldung	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Störungsfreies Fahrzeug, Fertigmeldung	Abschließen des Auftrags	Fertigmeldung	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Fertigmeldung	Fertigmeldung und Fahrzeugbereitstellung für Bereich Fahrdienst	Fertigmeldung, Fahrzeug	Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst

Abbildung 10-5: SIPOC für die außerplanmäßige Instandhaltung

Supplier	Input	Process	Output	Customer
Bereich Fahrzeuge	Änderungs-/ Versuchsmittelung	Fahrzeug anfordern	Fahrzeuganforderung	Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst
Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst	Fahrzeuganforderung	Bereitstellung Fahrzeug	Zuführung des Fahrzeugs	Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge
Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge	Zuführung des Fahr- zeugs	Planung Stellplatz	Stellplatz	Technischer Be- reichsleiter Bereich Fahrzeuge
Technischer Be- reichsleiter Bereich Fahrzeuge	Stellplatz, Auftrag	Beauftragung der Modifikation des Fahr- zeugs	Stellplatz, Auftrag	Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge
Vorhandwerker Bereich Fahrzeuge	Stellplatz, Auftrag	Modifikation des Fahr- zeugs, Endprüfung	Freigegebenes Fahrzeug	Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge
Fahrzeugdisposition Bereich Fahrzeuge	Freigegebenes Fahrzeug	Fahrzeuggestellung	Bereitgestelltes Fahrzeug	Bereich Betrieb Bereich Fahrdienst

Abbildung 10-6: SIPOC für die Verbesserung

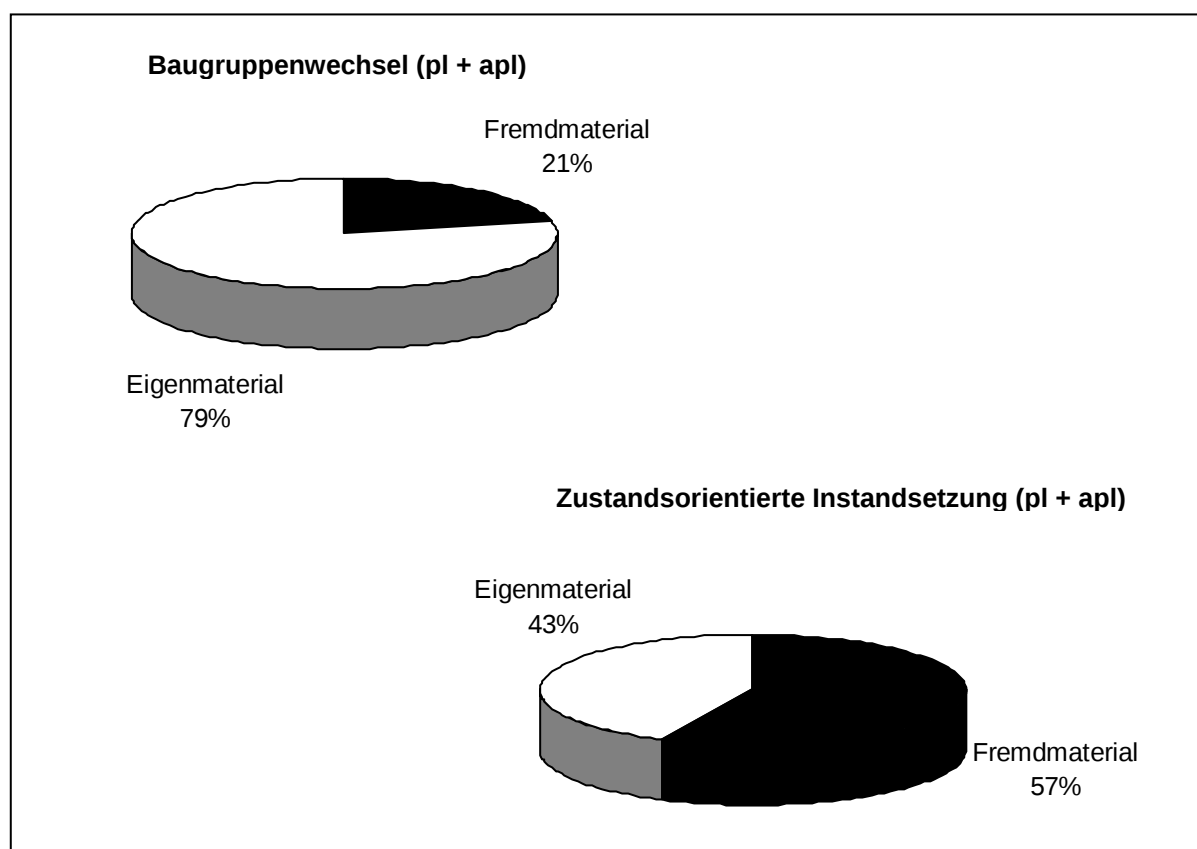


Abbildung 10-7: Kostenverteilung für Fremd- und Eigenmaterialien auf die Instandhaltungsleistungsarten zustandsorientierte Instandsetzung und Baugruppenwechsel

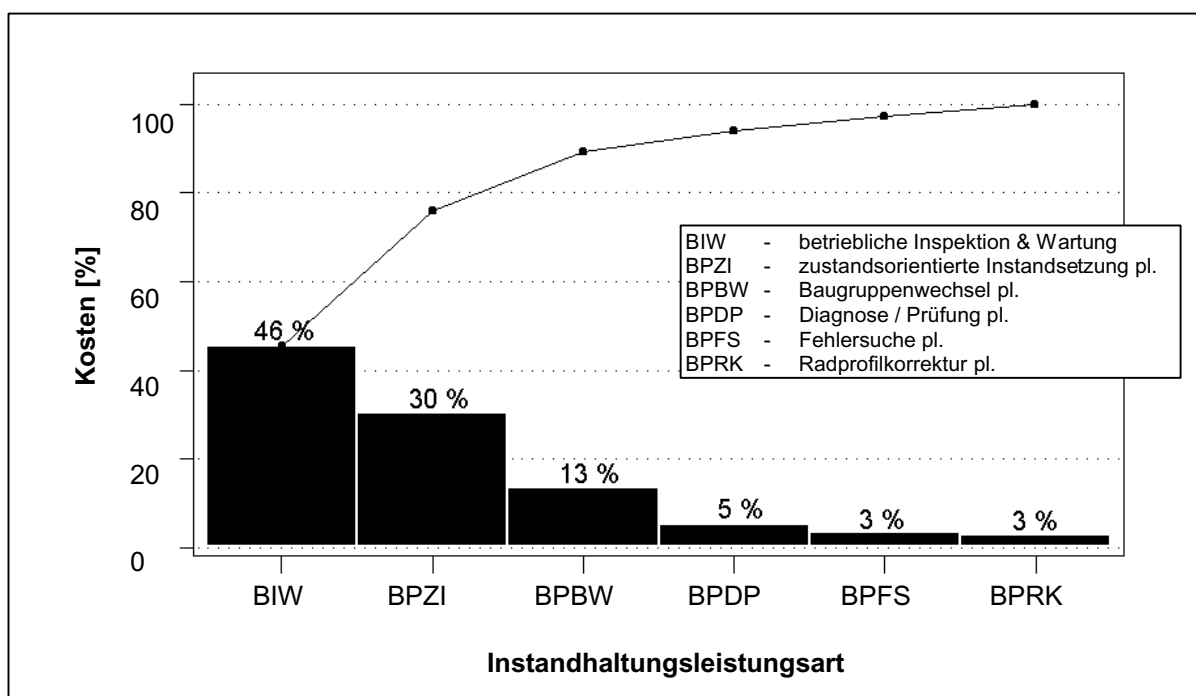


Abbildung 10-8: Gliederung der Kosten für die Arbeiten zur Frist F2

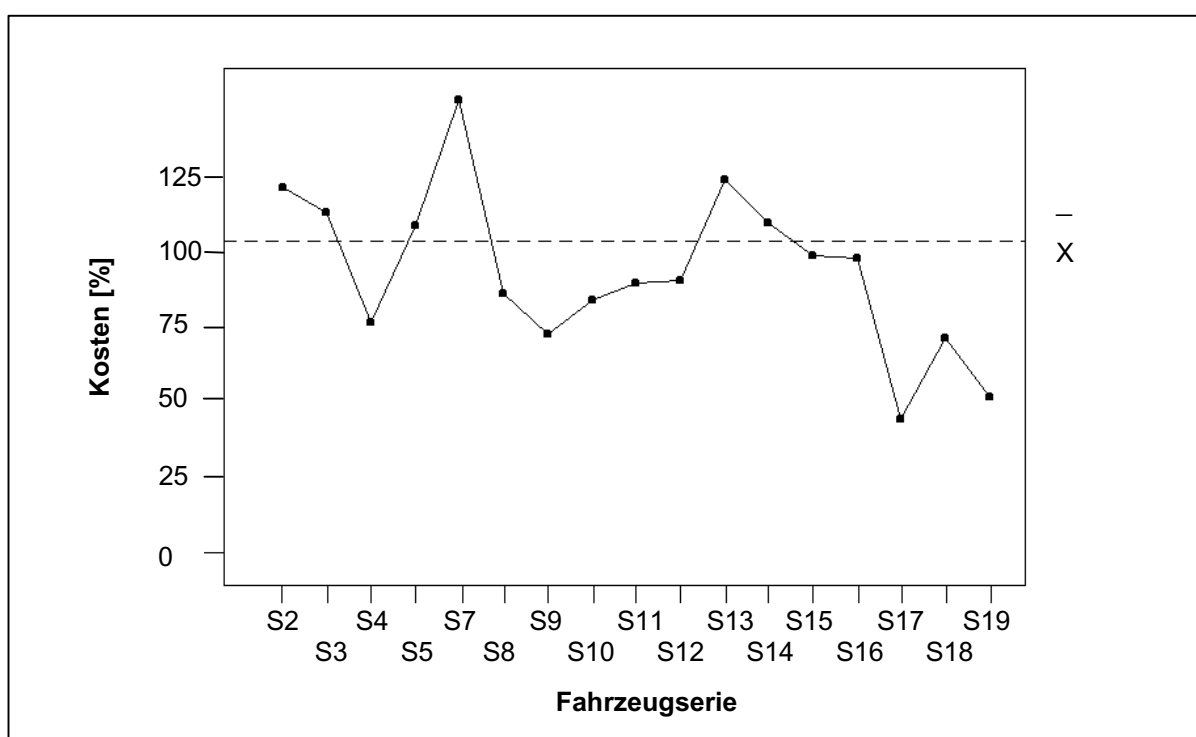


Abbildung 10-9: Durchschnittliche Gesamtkosten pro Nutzwagen für die Arbeiten zur Frist F2 in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie (Die 100 % Angabe der Kosten entspricht der 100 % Marke aus der analogen Darstellung zur Frist F1)

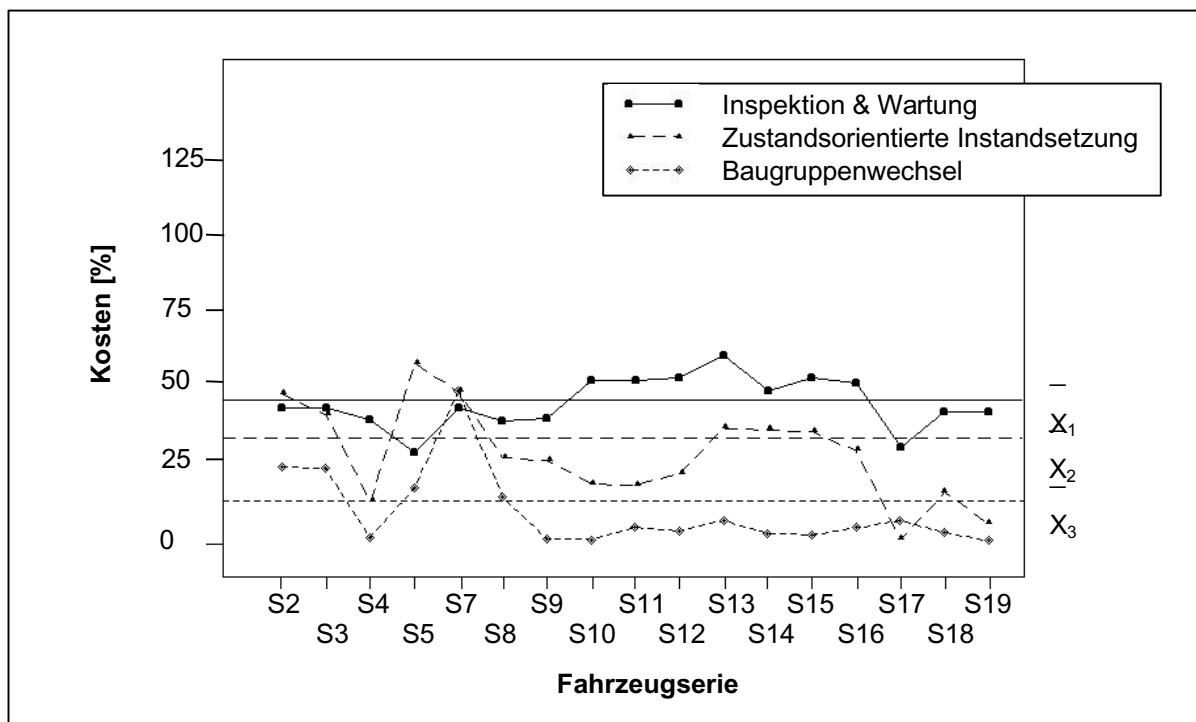


Abbildung 10-10: Durchschnittliche Kosten pro Nutzwagen für Inspektion & Wartung, zustandsorientierte Instandsetzung und Baugruppenwechsel einer Frist F_2

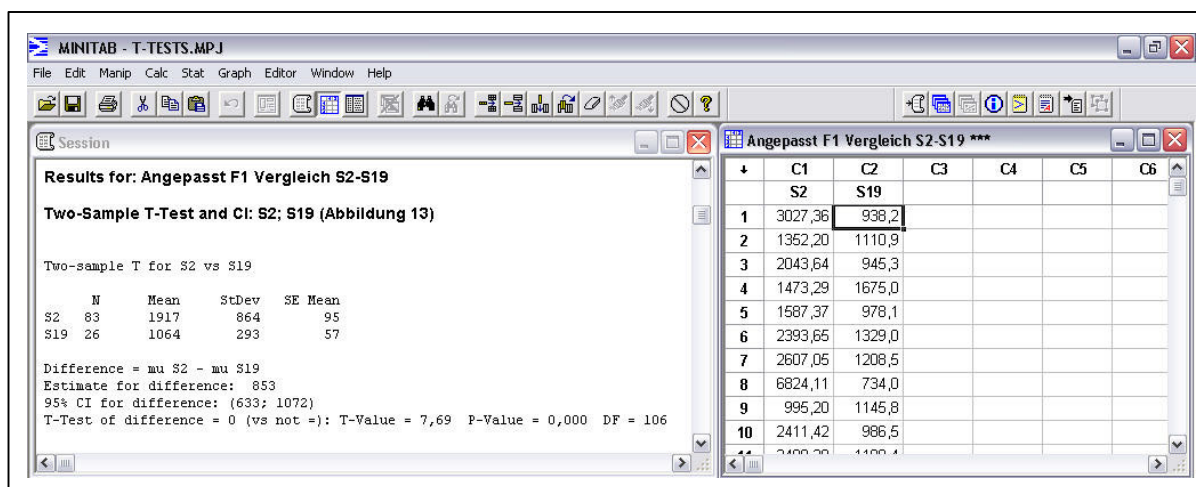


Abbildung 10-11: Beispielhafte Ergebnisse eines t-Test

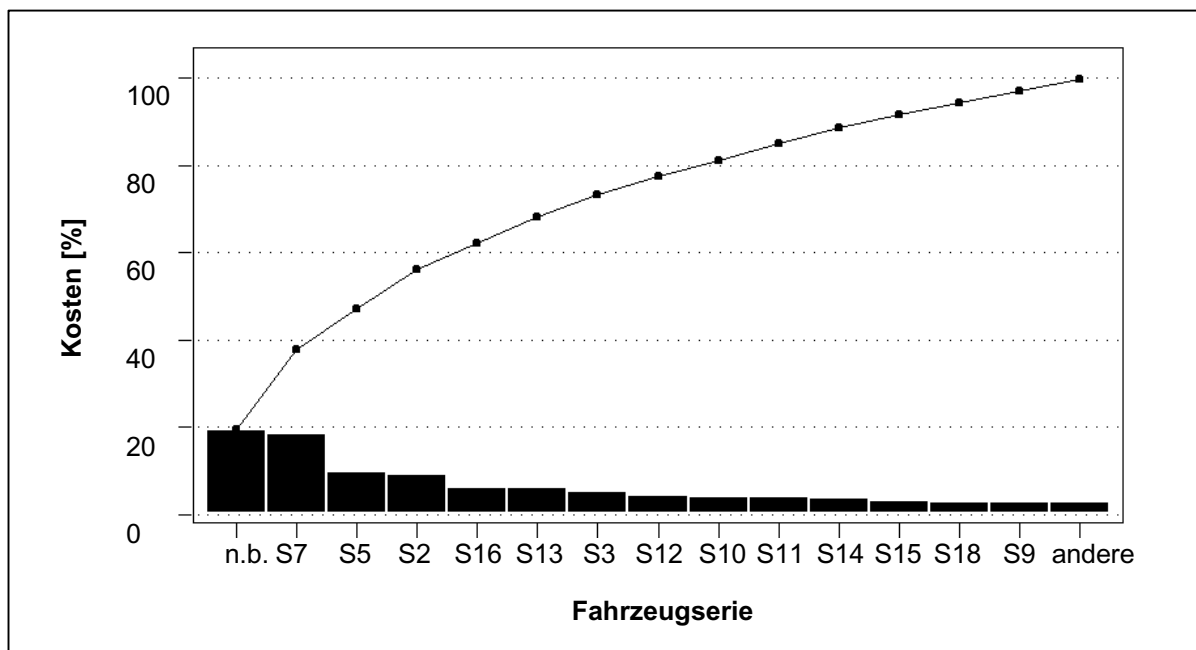


Abbildung 10-12: Kosten je Fahrzeugserie für die außerplanmäßige Instandhaltung

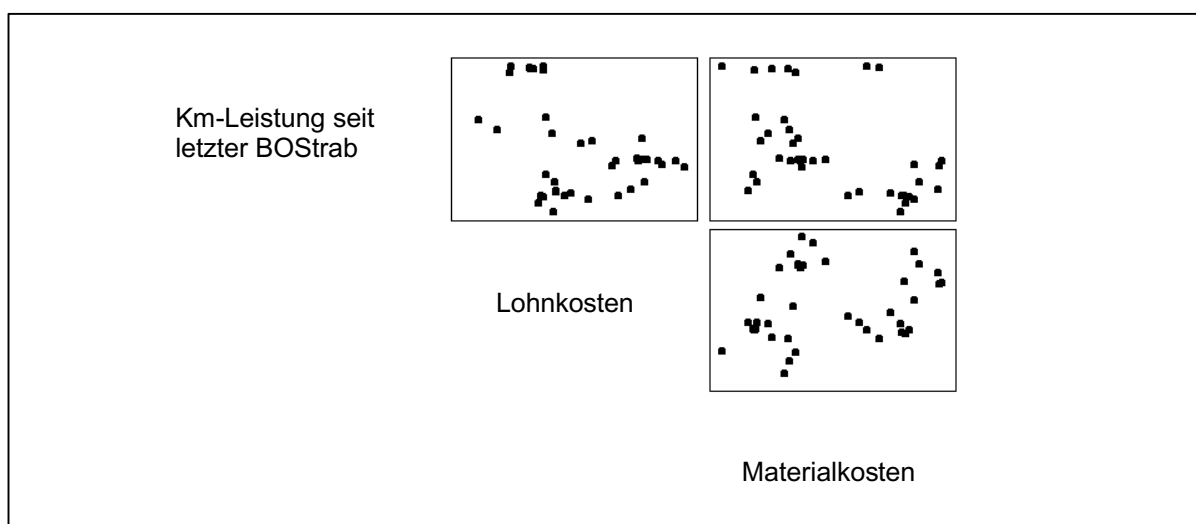


Abbildung 10-13: Zusammenhang zwischen den gefahrenen Kilometern seit der letzten BOStrab, den Lohnkosten und den Materialkosten der gesetzlichen Instandhaltung

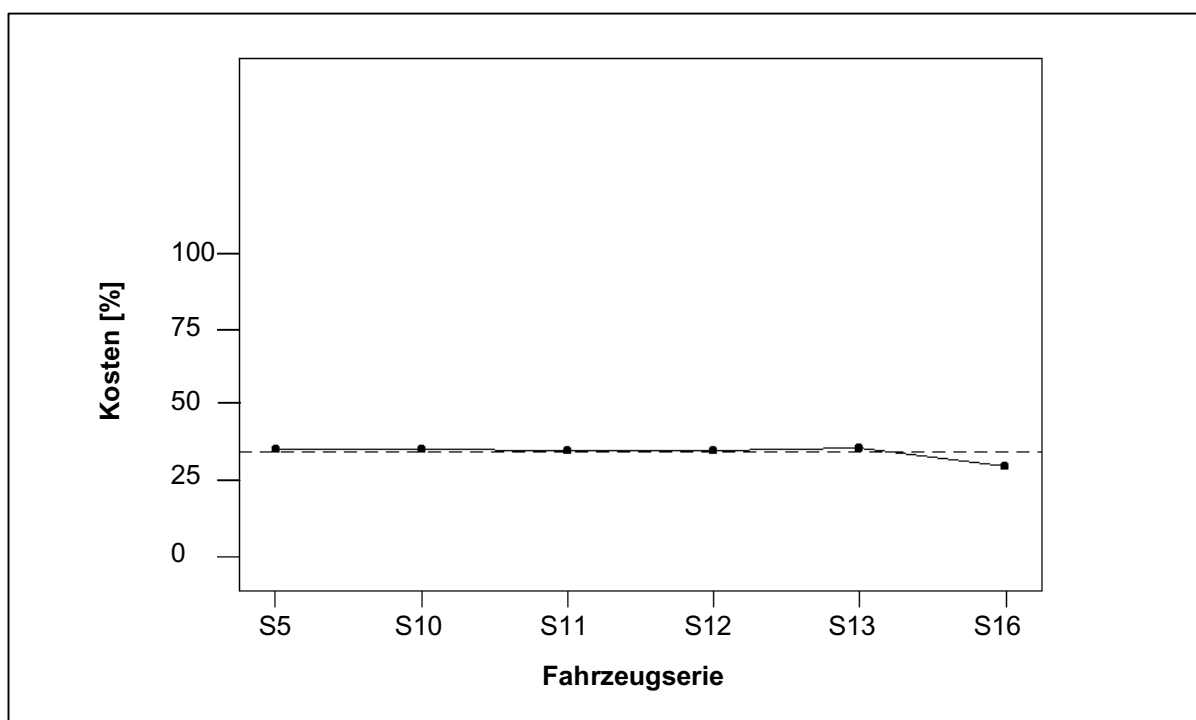


Abbildung 10-14: Durchschnittliche Kosten für die gesetzliche Inspektion & Wartung je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie

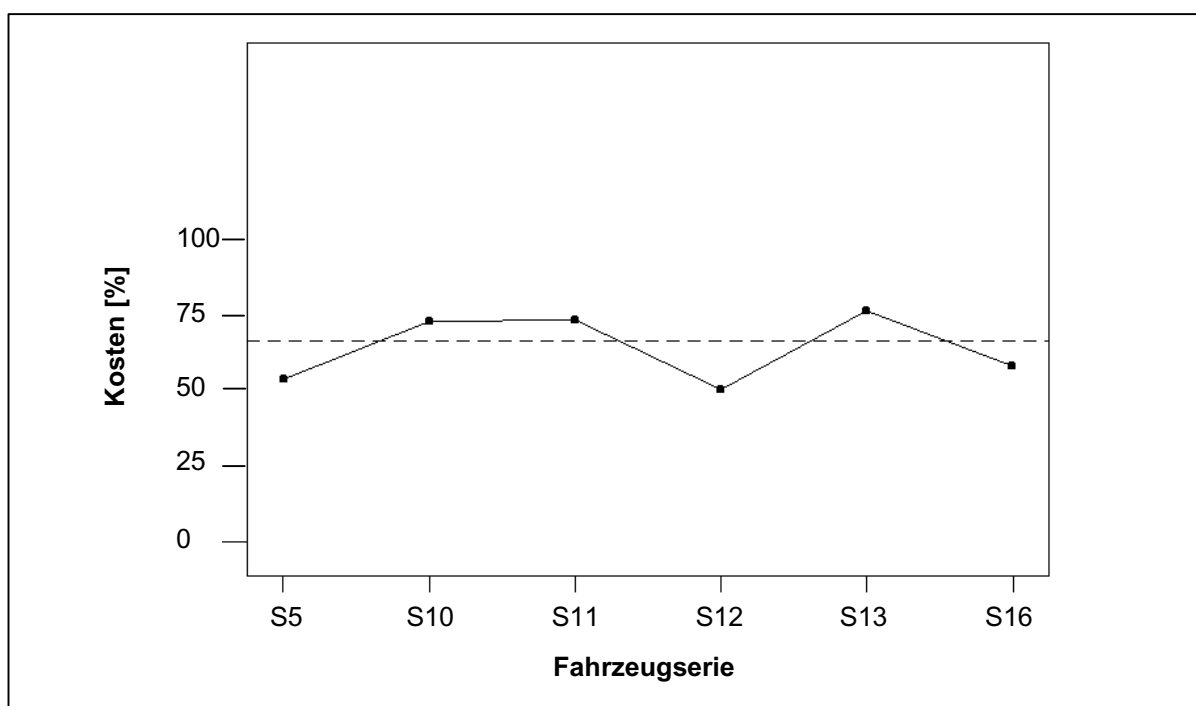


Abbildung 10-15: Durchschnittliche Kosten infolge gesetzlicher Inspektion & Wartung je Nutzwagen bezogen auf die Fahrzeugserie

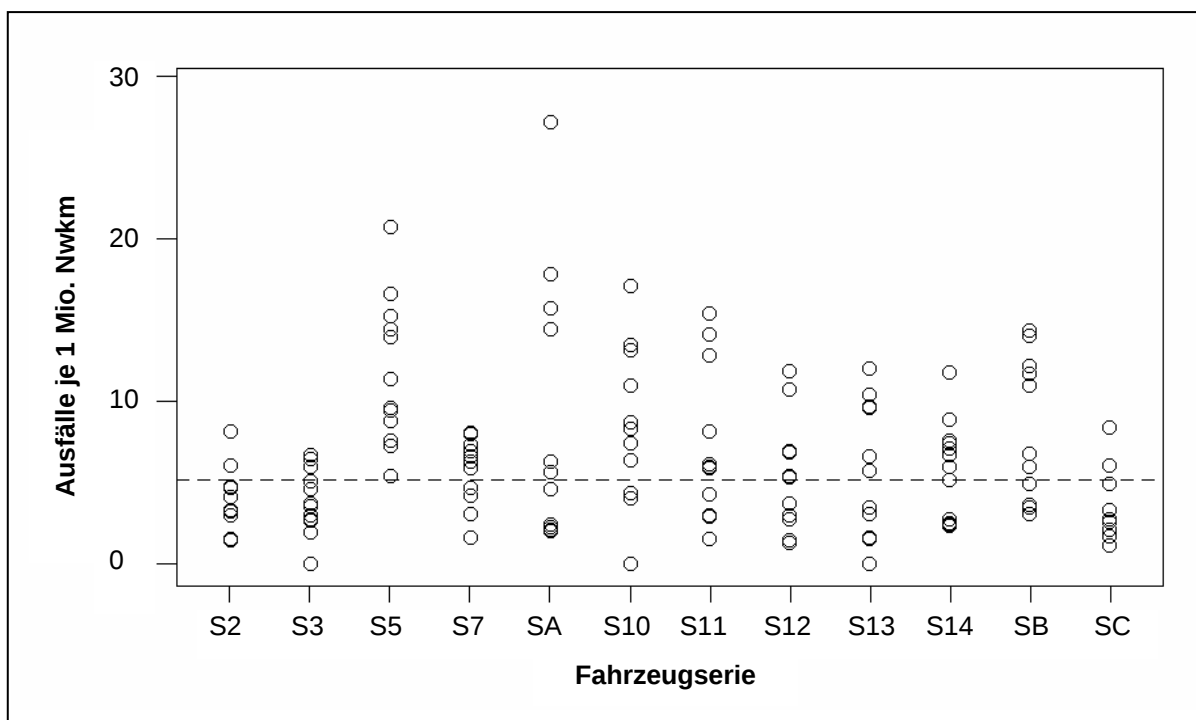


Abbildung 10-16: Monatliche fahrgastwirksame Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm in Abhängigkeit von der Fahrzeugserie

Abbildung 10-17: Monatliche Werte für die fahrgastwirksamen Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm je U-Bahn Linie

Linie	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert
U1	4,4	8,9	1,3
U2	6,9	9,6	5,3
U5	3,9	9,2	1,2
U6	6,0	10,8	2,3
U7	7,8	15,0	3,9
U8	5,5	8,7	1,1
U9	5,7	8,8	1,0

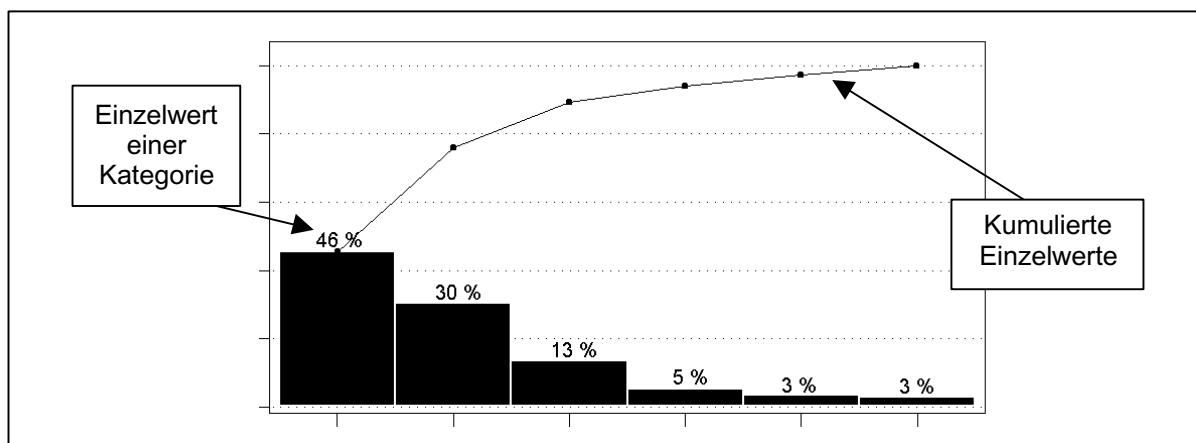
Abbildung 10-18: Monatliche Werte für die fahrgastwirksamen Ausfälle pro 1 Mio. Nwkm je Fahrzeugserie

Fahrzeugserie	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert
S2	4,1	8,2	1,4
S3	3,9	6,7	0,0
S6	4,2	16,0	0,0
S7	5,8	8,1	1,6
SA	9,7	27,3	2,0
S10	7,9	27,3	0,0
S11	6,8	15,4	1,5
S12	5,1	11,9	1,3
S13	5,6	12,0	0,0
S14	5,9	11,8	2,4
SB	8,6	14,4	3,1
SC	3,4	8,4	1,1

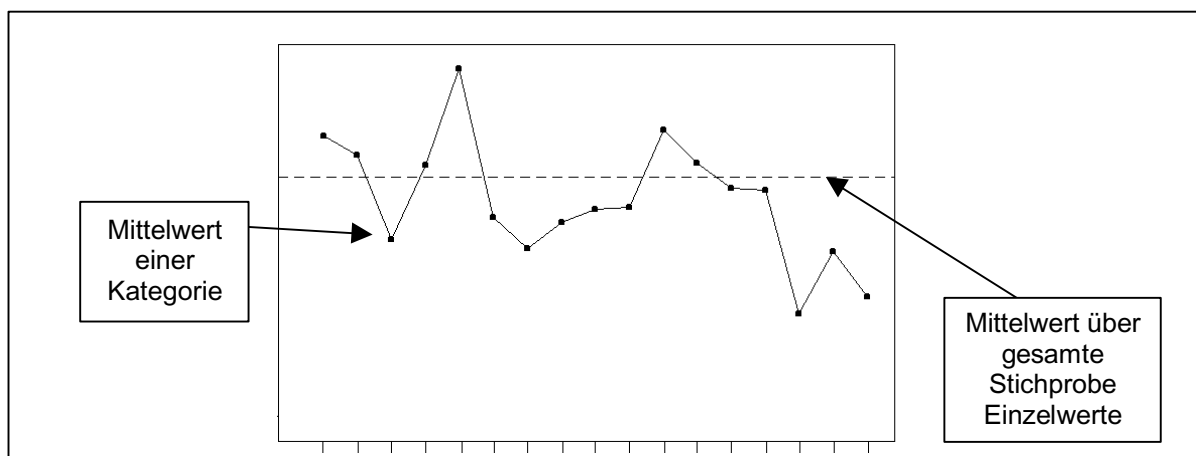
Anmerkung: Bildet man das arithmetische Mittel jeweils von den oben angegebenen Mittelwerten der U-Bahn-Linien oder der Fahrzeugserien, ergibt sich ein von dem im Text angegebenen Istwert der Gesamtbetrachtung (6,1 fahrgastwirksame Ausfälle je 1 Mio. Nwkm) abweichender Wert. Der Grund liegt darin, dass hier nicht alle Fahrzeugserien und U-Bahn-Linien aufgetragen sind, da deren Datenmenge nicht für repräsentative Ergebnisse ausreichte. Allerdings wurden ihre Ausfälle und die Kilometerleistung in die Gesamtbetrachtung einbezogen. Weiterhin wird der hier angegebene Mittelwert aus den monatlichen Durchschnittswerten je U-Bahn-Linie bzw. Fahrzeugserie bestimmt. Dadurch können weitere Abweichungen zwischen dem im Text angegebenen Istwert und möglichen Berechnungen über die oben angegebenen Mittelwerte aufgrund verschiedener Betrachtungsweisen und damit Berechnungsweisen entstehen.

Erläuterungen zu ausgewählten grafischen Darstellungen

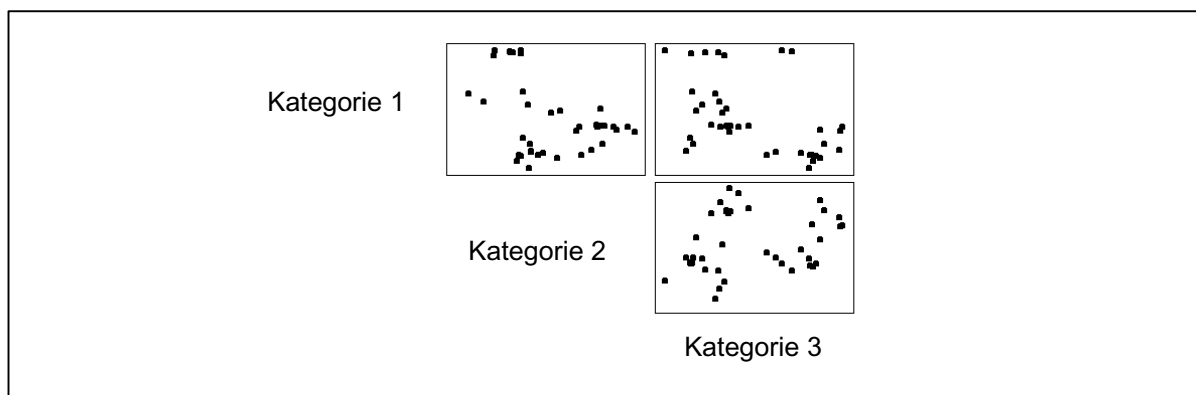
Pareto Diagramm



Haupteffekt Diagramm



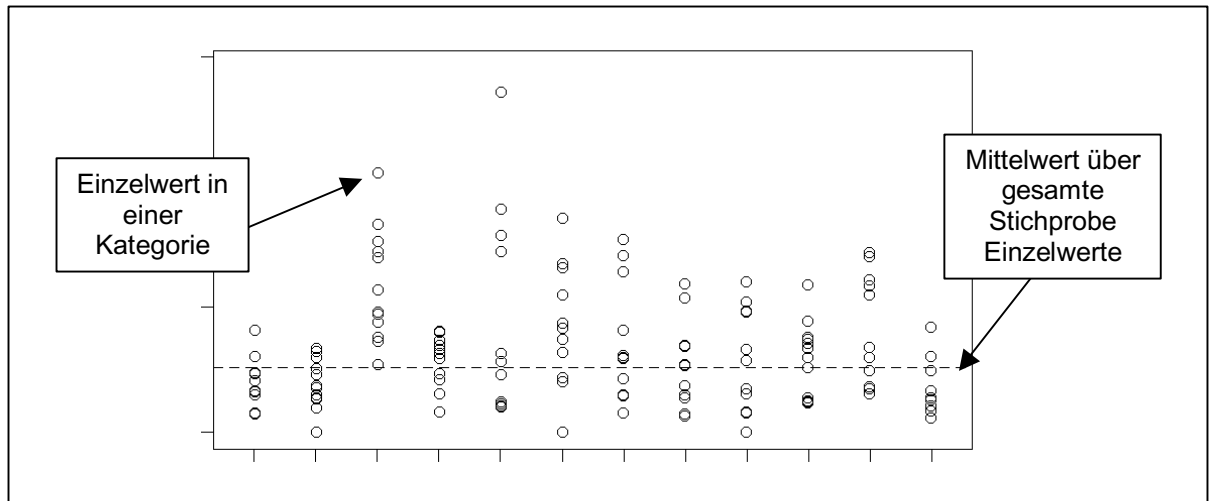
Matrix Darstellung



Die Matrix Darstellung dient der Verbildlichung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Kategorien. Dabei ist Kategorie 1 der Ordinate der beiden oberen Diagramme, Kategorie 2 der Abszisse des Diagramms oben links und der Ordinate unten rechts sowie Kategorie 3 den Abszissen der beiden linken Darstellungen zuge-

ordnet. Jeder Punkt symbolisiert einen gemeinsamen Datenwert von jeweils zwei Kategorien.

Punkt Diagramm



Das Punkt Diagramm zeigt die Verteilung von Einzelwerten innerhalb verschiedener Kategorien.