

## Bericht Nr. 16/2018

### Roadmap zur Digitalisierung der Wagentechnischen Untersuchung

Studie im Rahmen des „Technischen Innovationskreis Schienengüterverkehr“



Bearbeitet von

Prof. Dr. Markus Hecht

Mirko Leiste M.Sc.

Daniel Jobstfinke M.Sc.

Ulrich Deghela M.Sc.

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Theorie .....</b>	<b>12</b>
2.1 Abgrenzung der wagentechnischen Untersuchung.....	12
2.2 Wagentechnische Untersuchung.....	13
2.2.1 Regelwerke für die wagentechnische Untersuchung in Deutschland und der Schweiz .....	14
2.2.2 Umfang der wagentechnischen Untersuchung .....	16
2.2.3 Werkzeuge zur Durchführung der wagentechnischen Untersuchung .....	17
2.3 Bremsprobe .....	17
2.4 Ablauf der wagentechnischen Untersuchung und Bremsprobe .....	17
<b>3. Vor-Ort-Besuche .....</b>	<b>19</b>
3.1 Vor-Ort-Besuche bei den Auftragsgebern .....	19
3.1.1 Vor-Ort-Besuch bei der SBB-Cargo .....	19
3.1.2 Vor-Ort-Besuch bei der DB-Cargo.....	21
3.1.3 Vor-Ort-Besuch bei BASF.....	23
3.2 Entdeckungswahrscheinlichkeit von Schäden .....	24
3.3 Zeitbedarf.....	26
3.4 Erkenntnisse .....	27
<b>4. Schadensanalyse.....</b>	<b>28</b>
4.1 Schadkategorien gemäß AVV .....	28
4.1.1 Schadensentwicklung .....	29
4.2 Schaddatenauswertung .....	29
4.2.1 Häufigkeitsverteilung .....	30
4.2.1.1 Laufwerk .....	31
4.2.1.2 Bremse .....	32
4.2.1.3 Wagenkasten.....	32
4.2.2 Relevanz .....	33

4.2.2.1	Vorgehen .....	33
4.2.2.2	Auswertung.....	35
<b>5.</b>	<b>Instandhaltung in der Luftfahrt .....</b>	<b>37</b>
5.1	Motivation .....	37
5.2	Arten der Instandhaltung bei der Luftfahrt und Bezug zur WU .....	39
5.3	Zeitliche Entwicklung der Instandhaltung bei der Luftfahrt.....	40
5.4	Aktuell genutzte MSG-3-Logik.....	42
5.5	Zusammenfassung und Transferansätze zur Bahn .....	45
<b>6.</b>	<b>Schutzziele .....</b>	<b>47</b>
6.1	Schutzzieldefinition.....	47
6.2	Rückschluss auf Komponentenzustand .....	48
6.3	Kategorisierung .....	49
6.4	Physikalische Größen.....	53
<b>7.</b>	<b>Technologiefindung.....</b>	<b>57</b>
7.1	Möglichkeiten zur Technologie- und Strategiefindung .....	57
7.2	Relevanz der physikalischen Größen.....	60
7.2.1	Anwendbarkeit der physikalischen Größen .....	61
7.2.2	Filterung der physikalischen Größen .....	63
7.3	Technologierecherche .....	64
<b>8.</b>	<b>Technologiemigration in die WU .....</b>	<b>66</b>
8.1	Prüfungen vor der Fahrt .....	68
8.1.1	Transportsicherung.....	68
8.1.2	Technische Kontrollen .....	70
8.1.3	Einstellung der Betriebsparameter .....	70
8.2	Prüfungen während der Fahrt.....	70
8.3	Rolle der Instandhaltung.....	71
<b>9.</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>73</b>
9.1	Vision.....	73
9.2	Schlüsseltechnologien.....	77
9.3	Technologische Unsicherheiten .....	78
9.4	Interessenkonflikte.....	79
9.5	Handlungsempfehlungen.....	80
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>82</b>

---

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>84</b>
<b>Anhang A – Verfügbare Technologien .....</b>	<b>86</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf der WU mit voller BP bei Einsatz von einem Wagenmeister nach Ril 936:1999 (ohne Vorbereitungsang).....	18
Abbildung 2: Einsatzort der technischen Kontrolleure und Arten der Zuguntersuchungen bei SBB Cargo (Quelle: SBB).....	20
Abbildung 3: Begleitung eines Wagenmeisters am Bahnhof Gisikon-Root, 08.02.2018 .....	20
Abbildung 4: App zur Schadenerfassung und -Meldung bei SBB-Cargo [14].....	21
Abbildung 5: HMI-Endgerät für Wagenmeister bei der DB [15] .....	22
Abbildung 6: Gleisanlage der BASF und Einsatzort der Wagenmeister in Ludwigshafen .....	23
Abbildung 7: Prüfen der Einhaltung der Verladerichtlinie, Emmenbrücke 08.02.2018 .....	25
Abbildung 8: Fehlerhäufigkeit der 3 EVUs sortiert nach Hauptgruppen des AVV Fehlerkataloges.....	30
Abbildung 9: Fehlerhäufigkeit der drei EVU sortiert nach den zehn häufigsten Fehlercodes des AVV Fehlerkataloges .....	31
Abbildung 10: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Laufwerk (EVU1+EVU2) .....	31
Abbildung 11: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Bremse (EVU1+EVU2) .....	32
Abbildung 12: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Wagenkasten (EVU1+EVU2).....	33
Abbildung 13: Ableitung der Lauffähigkeit von Güterwagen auf der Basis von Schäden gefunden im Rahmen Wagentechnischen Untersuchung .....	35
Abbildung 14: Systemvergleich Eisenbahn und Luftfahrt. Quelle [16] (gekürzt) .....	38
Abbildung 15: MSG-1-Logik [20] .....	41
Abbildung 16: MSG-2-Logik. Quelle: [20].....	41
Abbildung 17: Strukturen und Prozesse im MSG-3-Prozess. Veränderte Darstellung von [21] .....	43
Abbildung 18: Historische Entwicklung der Instandhaltung (IH) der Luftfahrt und Vergleich mit der WU.....	45
Abbildung 19: Mögliche Transfers von Vorgehensweisen und Konzepten der Instandhaltung zwischen Luftfahrt und Eisenbahn .....	46
Abbildung 20: Haupt- und Unterschutzziele der Wagentechnischen Untersuchung und der Bremsprobe .....	47
Abbildung 21: Rückschlussmöglichkeiten ausgehend von den Schutzzielen auf den Zustand von Einzelkomponenten eines Güterwagens.....	49
Abbildung 22: Zusammenspiel von Sicherheit und Zuverlässigkeit angelehnt an DIN EN 50126 für RAMS im Bahnwesen .....	50
Abbildung 23: Überblick über die Kategorien für den Umgang mit den Schutzzielen bei Nichterfüllung.....	51
Abbildung 24: Einflussgrößen bei der Technologie- und Strategiefindung .....	58

---

Abbildung 25: Mögliche Wege bei der Technologie- und Strategiefindung .....	58
Abbildung 26: Gruppierung der physikalischen Größen ausgewählter Schutzziele .....	61
Abbildung 27: Filterung der physikalischen Größen ausgewählter Schutzziele sowie Einordnung nach strecken- und wagenseitigen Diagnose.....	64
Abbildung 28: Checkpoint-System der ÖBB-Infra [22] .....	65
Abbildung 29: Vereinfachte Übersicht der Bestandteile der Zugvorbereitung .....	66
Abbildung 30: Fälligkeit der Schutzzielprüfungen .....	67
Abbildung 31: Hohe Gefahr der Überbeladung bei der Verwendung von E-Wagen für den Stahltransport .....	69
Abbildung 32: Exemplarische WU am Wagen 4711 im Status quo .....	73
Abbildung 33: Exemplarische WU am Wagen 4711 mit Digitaler Wagenidentität (DWI) .....	75
Abbildung 34: Exemplarische Darstellung des abgeleiteten Inspektionsbedarfes am Wagen 4711 .....	76
Abbildung 35: Stufenweise Entwicklung zur digitalen WU .....	76

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Tätigkeiten eines Wagenmeisters sowie Fokusuntersuchung der Studie .....	13
Tabelle 2: Vergleich der VDV-Schrift 758 und FDV R300.5.....	14
Tabelle 3: Vergleich der Regelwerke der DB und SBB zur Durchführung der WU.....	15
Tabelle 4: AVV Fehlerklassen, Definition sowie Fehlerwert.....	29
Tabelle 5: Lauffähigkeitsklassen nach Richtlinie 936 der DB .....	34
Tabelle 6: Bezettelungsschema Lauffähigkeit.....	34
Tabelle 7: Fehlerbeispiele für Bewertungsschema .....	35
Tabelle 8: Überblick der kategorisierten Schutzziele .....	52
Tabelle 9: Schutzzielgruppen 1 bis 3, deren direkte und indirekte physikalische Größen sowie exemplarische Schadensbeispiele .....	55
Tabelle 10: Schutzzielgruppen 4 und 5, deren direkte und indirekte physikalische Größen sowie exemplarische Schadensbeispiele .....	56
Tabelle 11: Exemplarische Zusammenstellung der Vielfalt an Kontrollaufgaben in Abhängigkeit der Wagengattung/Ladeeinheit im Rahmen der Wagentechnischen Untersuchung gemäß AVV .....	68

---

## Abkürzungsverzeichnis

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
ASK	Annahme und Sichtkontrolle
AVV	Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen
BASF	Badische Anilin- und Sodafabrik
BP	Bremsprobe
CM	Condition Monitoring
EBO	Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EMSG	European Maintenance System Guide
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FDL	Fahrdienstleiter
GCU	General Contract of Use for Wagons
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway
HMI	Human Maschine Interface
HOA	Heißläuferortungsanlage
HT	Hard -Time-Limit
ISC	Industry Steering Committee
KV	Kombinierter Verkehr
Lf	Lauffähigkeit
MSG-1	Maintenance Steering Group 1st Task Force
MRB	Maintenance Review Board
MWS	Mobiler Werkstatt Service
OC	On-Condition
PVG	(DB) Produktionsverfahren Güterverkehr
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
Ril	(DB) Richtlinie
RIZ	(SBB) Risikoorientierte Inspektion des Zuges
SGV	Schienengüterverkehr
TKC	Technische Kontrolle Cargo
WU	Wagentechnische Untersuchung

## Kurzfassung

Es wurden Wagenmeister vor Ort in der Schweiz und in Deutschland begleitet. Die zentralen Erkenntnisse für die Entwicklung einer digitalen WU daraus sind:

- die sehr ausgeprägte Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen, welche nur aufwendig durch Technologien zu ersetzen ist
- die Erkenntnis, dass eine Teilentlastung und somit ein Entfallen einzelner Prüfpunkte der Wagentechnischen Untersuchung (WU) keine Zeitersparnis mit sich bringt. Erst ab einem gewissen weitreichenden Digitalisierungsgrad werden Vorteile generiert.
- dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern in Abhängigkeit des Güterwagens wegen der Einsehbarkeit von Komponenten stark schwankt.
- dass Räder, Achslager und Radlaufflächen kaum untersucht werden können.

Eine Schaddatenanalyse für fast 245.000 Schadmeldungen innerhalb eines Jahres ergab, dass quantitativ das Laufwerk, das Bremssystem und der Wagenkasten bei den schadhafte Baugruppen dominieren. Circa 10 % all dieser schadhafte Wagen muss ausgesetzt werden. Bezogen auf Güterzüge bedeutet dies, dass in 14,6 % aller Güterzüge mindestens ein beschädigter Wagen eingereicht ist. Der Anteil der Wagenzüge an denen Aussetzungen vorgenommen werden müssen, beträgt in diesem Fall circa 1,8 %.<sup>1</sup>

Abseits des Bahngeschehens wird die Instandhaltung der Luftfahrt vorgestellt und mit der der Güterbahnen verglichen. Es gibt in der Luftfahrt keinen der WU vergleichbaren Vorgang. Vielmehr sind alle Untersuchungen, auch Sichtkontrollen, fest im Instandhaltungsprozess verankert und dokumentiert.

Schutzziele für eine digitale WU, die die sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevanten Funktionen eines Güterwagens wiederspiegeln, konnten identifiziert werden:

- Führung des Fahrzeuges im Gleis,
- Verzögerungsverhalten,
- Zugbildung ermöglichen
- Verfügbarkeit des Transportgefäßes
- Bedienbarkeit der Bahnbetriebshilfsmittel

Diese Schutzziele muss ein Güterwagen erfüllen, um voll einsatzbereit zu sein. Bezüglich der einzusetzenden Technologien hat sich ein Interessenskonflikt zwischen den Wagenhaltern, den EIU und den

---

<sup>1</sup> Basierend auf der Annahme, dass 50.000 Güterwagen täglich in Deutschland und der Schweiz einer Wagentechnischen Untersuchung unterzogen werden und ein durchschnittlicher Güterzug aus 30 Wagen besteht.

EVU herauskristallisiert. Je nachdem, wer in Zukunft die Daten erheben wird, hat dieser die Kontrolle über die Daten und die anderen Akteure im Bahnwesen geraten folglich in dessen Abhängigkeit.

Quantitativ erfordert es wenige Technologien, damit die Digitalisierung der WU entscheidend vorange-  
trieben werden kann. Diese sind im Wesentlichen die:

- automatisierte Bremsprobe
- digitale Wagenidentität/ Wagenanschriften
- Beschleunigungen im Fahrwerk/Wagenkasten
- Tracking & Tracing
- Kamerabasierte Systeme mit Merkmalerkennung

Die meisten Technologien sind allerdings noch nicht auf dem Markt verfügbar und insbesondere bei den On-Board Diagnosesystemen gibt es einen erheblich geringeren Reifegrad im Vergleich zu streckenseitigen Systemen.

Neben der optimierten Zugvorbereitung generiert die Digitalisierung der WU weitere Vorteile. Sie ermöglicht einen Akteur übergreifenden Lernprozess. Wie bei der Luftfahrt können Fehlerursachen systematisch abgestellt werden. Durch die erweiterten Zustandsinformationen, die durch die genannten Technologien über den Güterwagen verfügbar sind, könnte die Instandhaltung neugeordnet werden. Die großen Instandhaltungen sowie die festen Intervalle gemäß VPI könnten dann im Rahmen einer zustandsorientierten Instandhaltung optimiert werden. Die Digitalisierung wird nicht nur die WU, resp. die sie ersetzenden Maßnahmen beschleunigen und verbessern, sondern auch die Handhabung des Güterwagens durch alle Akteure.

---

## 1. Einleitung

Die vorliegende Studie wurde durch die TIS-Arbeitsgruppe „Automatisierte Betriebsabläufe“ beauftragt. Im Rahmen der Studie soll der Weg zur Digitalisierung der Zugvorbereitung aufgezeigt werden. Die heutige Form der Zugvorbereitung ist sehr personal- und zeitintensiv. Zudem ist der Zeitpunkt der Durchführung – in der Regel direkt vor der Abfahrt – im Schadfal denkbar ungünstig. Mit den heutigen Methoden ist der Schienengüterverkehr nicht mehr konkurrenzfähig gegenüber anderen Verkehrsträgern. Eine Digitalisierung der Prozesse bietet hier die Chance, die Effizienz und die Qualität des Schienengüterverkehrs nachhaltig zu steigern.

Für die Studie werden zunächst die heutigen Prozesse auf der Basis von Vorortbesuchen auf Rangierbahnhöfen und Ladestraßen in Deutschland und der Schweiz untersucht. Im Gegensatz zum heutigen Vorgehen werden explizite Schutzziele anstatt Bauteilprüfungen für die WU herausgearbeitet, welche durch Technologien abzudecken sind. Entsprechende Technologien, eine Auswahl an potentiell vielversprechenden Lösungen sowie Ansätze für Migration dieser in eine digitalisierte Wagentechnische Untersuchung bilden neben Handlungsempfehlungen den Abschluss der Studie.

## 2. Theorie

Zur Beherrschung technischer Risiken, die im Schienengüterverkehr (SGV) durch beschädigte Komponenten, fehlerhaftes Zusammenwirken von Bauteilen, falsch eingestellte Parameter und nicht eingehaltenen Verladerichtlinien an Einzelfahrzeugen, Wagengruppen oder Zügen entstehen können, werden idealerweise vor jeder Zugfahrt und bei Änderung der Beladung eine wagentechnische Untersuchung (WU) und eine Bremsprobe (BP) durchgeführt. Das allgemeine Eisenbahngesetz (4§ AEG) [1] und die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (2§ EBO) [2] in Deutschland sowie das Eisenbahngesetz (Art.17 EBG) [3] in der Schweiz und die transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung (12§ TEIV) [4] fordern u.a., dass Eisenbahnverkehrsunternehmen und Halter von Eisenbahnfahrzeugen für den sicheren Betrieb der Fahrzeuge Sorge tragen. Die Umsetzung der WU und BP ist im SGV unverzichtbar. Zum Erhalt einer Sicherheitsbescheinigung, die die Teilnahme am öffentlichen Eisenbahnverkehr ermöglicht, muss beispielsweise das Verkehrsunternehmen nachweisen, dass das einzusetzende Personal fachlich befähigt ist, die WU und BP korrekt durchzuführen.

In der Schweiz als technische Kontrolle bezeichnet, stellt die WU alle Prüftätigkeiten und Maßnahmen dar, die zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und Verkehrstauglichkeit sowie zur Überwachung des Instandhaltungszustandes dienen. Die WU sind die Haupttätigkeiten eines Wagenmeisters in Deutschland eines technischen Kontrolleurs (bis ca. 2010 „Visiteur“) in der Schweiz [5]. Zur Vereinfachung werden nachfolgend meist nur die Begriffe WU und Wagenmeister genannt. Die Funktion und der Zustand des Bremssystems werden im Stillstand durch die BP geprüft. Die BP wird von einem Bremsproberechtigten durchgeführt, der als Lokführer, Rangierer oder Wagenmeister zusätzlich qualifiziert sein kann.

### 2.1 Abgrenzung der wagentechnischen Untersuchung

Ganz selten kommt es vor, dass ein Wagenmeister ausschließlich die WU am Zug durchführt. Je nach Einsatzort, Verkehren und zugehörigem Unternehmen können Wagenmeister/-prüfer zusätzlich zu bzw. während der WU verschiedene Aufgaben in der Zugvorbereitung/Bereitstellung, in der Kommunikation und Dokumentation sowie in der Abfertigung und Kundenbetreuung übernehmen.

Tabelle 1: Mögliche Tätigkeiten eines Wagenmeisters sowie Fokusuntersuchung der Studie

Tätigkeiten	Nr.	Prozessschritte
<b>Zugvorbereitung und Zugbereitstellung</b>	1	Rangier- und Kuppelarbeiten
	2	Wagen sichern/ entsichern
	3	Bremsparameter einstellen
	4	Wiegen
	5	Kranen, aufladen
	6	Reihungsaufnahme
	7	Bremszylinder leeren
	8	Luft füllen
	9	Bremsprobe durchführen
	10	Zugschluss anbringen/ entfernen
<b>Kommunikation und Dokumentation</b>	11	Meldung von Unregelmäßigkeiten
	12	Kennzeichen von Schäden und Mängeln
	13	Kommunikation mit Lokführer, Weichenwärter und Betriebsleiter
	14	Ausfüllung der Zettel
	15	Anbringen und Austausch von Zetteln
	16	Dokumentation der Entscheidungen
<b>Wagentechnische Untersuchung</b>	17	Zustand der Wagen begutachten
	18	Mängel und Instandhaltungszustand feststellen
	19	Kontrolle von Ladungen und Papieren
	20	Prüfung der Einhaltung der Verlagerichtlinien
	21	Kontrolle der Wagenbeschriftungen
	22	Sicherstellung der vorschriftsmäßigen Formierungen, Bremsstellungen und Kupplungen
<b>Erstellung von Transportpapieren</b>	23	Erstellung von Bremszetteln
	24	Erstellung von Wagenlisten
<b>Aufhebung von kleinen Schäden</b>	25	Durchführung von kleinen Reparaturen
	26	Austausch von Komponenten
<b>Kundenbetreuung</b>	27	Kunden beraten und informieren

Der Wagenmeister kann auch kleine Schäden durch Reparaturen oder Austausch der Teile beheben. Eine scharfe Trennung der Tätigkeiten im Feld kann manchmal schwer erkennbar sein. Die Tabelle 1 fasst die möglichen Tätigkeiten und Prozessschritte eines Wagenmeisters zusammen. In dieser Studie stehen ausschließlich Prüftätigkeiten, die im Rahmen einer BP und WU (Prozessschritte 9, 17 bis 22 aus der Tabelle 1) von einem Wagenmeister durchgeführt werden im Vordergrund. Die aufgelisteten Tätigkeiten in der Tabelle 1 sollen auch zeigen, dass im Falle einer vollen Automatisierung der BP und WU Tätigkeiten übrig bleiben, die einen Personaleinsatz benötigen.

## 2.2 Wagentechnische Untersuchung

Auf internationaler bzw. europäischer Ebene gibt es keine Vorschrift, die die Fälligkeit und den Ablauf der WU oder das benötigte Qualifikationsprofil regeln. Die internen Vorschriften zur Durchführung der WU der ehemaligen Staatsbahnen sind nach der Liberalisierung zunehmend nach gewissen Anpassungen zu nationalen Vorschriften geworden. Beteiligt an der Erstellung und Ausgabe der nationalen Vorschriften sind meistens eine Arbeitsgruppe der Vertreter der nationalen Eisenbahnverkehrsunternehm-

men und/oder das Verkehrsministerium. Die nationalen Vorschriften dienen als Grundlage und Orientierung zur Erstellung unternehmensinterner Regelungen zur Realisierung der WU. Das Eisenbahnverkehrsunternehmen ist für die Durchführung und Koordinierung der WU im Rahmen des Sicherheitsmanagements zuständig.

### 2.2.1 Regelwerke für die wagentechnische Untersuchung in Deutschland und der Schweiz

Die VDV-Schrift 758 „Prüfen von Güterwagen im Eisenbahnbetrieb“ [6] vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen legt u.a. die Rahmenbedingungen zur Umsetzung der WU in Deutschland fest. Nach der VDV-Schrift 758 entspricht die WU den Prüfungen von Güterwagen im Betrieb nach den Stufen 3 und 4. Zu jeder dieser Stufen werden in der VDV-Schrift 758 das Schutzziel, die Fälligkeit, die Bedingungen, der Arbeitsumfang und die Verzichtsvoraussetzungen beschrieben.

Die vom Bundesamt für Verkehr herausgegebene schweizerische Fahrdienstvorschrift FDV R300.5 [7] mit dem Titel „Zugvorbereitung“ bezeichnet und behandelt die WU in seinem Unterkapitel 4.2 als technische und betriebliche Zuguntersuchung. Der Mitarbeiter, der die Zuguntersuchung erledigt, wird hier Zugvorbereiter genannt. Die Fälligkeit der WU sowie die Tätigkeiten des Zugvorbereiters werden in der FDV R300.5 beschrieben. Die Tabelle 2 zeigt einen inhaltlichen Vergleich der VDV-Schrift 758 und FDV R300.5 in Bezug auf die Benennung, Fälligkeit, Prüfkriterien und Durchführung der WU.

**Tabelle 2: Vergleich der VDV-Schrift 758 und FDV R300.5**

Regelwerke	Schweiz (FDV R300.5)	Deutschland (VDV- 758)
<b>Bezeichnung der WU</b>	Technische und betriebliche Zuguntersuchung	Prüfung von Güterwagen nach Stufe 3 und 4
<b>Fälligkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mindestens einmal pro Tag</li> <li>- Bei Änderung der Beladung</li> <li>- bei jedem neu gebildeten Zug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vor der Zugfahrt</li> <li>- Am neugebildeten Zug</li> <li>- Nach der Be- oder Entladung (auch ohne Neubildung)</li> <li>- Bei Übernahme eines Zuges von einem anderen EVU</li> </ul>
<b>Prüfkriterien</b>	Exemplarische Auflistung von Prüfkriterien (Bsp.: Seitentüren, Verschlüsse, Bremsen)	Prüfkriterien nach AVV Prüfkatalog, Anlage 9, Anhang 1 und 5
<b>Regeln in Betriebsvorschriften die Durchführung und Koordinierung der WU</b>	Verantwortung der Eisenbahnverkehrsunternehmen	Verantwortung der Eisenbahnverkehrsunternehmen
<b>Verzicht auf die WU</b>	Keine Angabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei Zügen aus Wagengruppen,</li> <li>- die bereits eine Prüfung der Stufe 3 und 4 erhalten haben und</li> <li>- die nicht im Abstoß- oder Ablaufbetrieb gebildet wurden und</li> <li>- bei denen die Ergebnisse der Qualitätssicherung sowie die betriebliche Erfahrung dies zulassen</li> </ul>

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, müssen Eisenbahnverkehrsunternehmen in den Betriebsvorschriften die Durchführung und Koordinierung der WU regeln. Nur große Verkehrsunternehmen wie die Deutsche

Bahn (DB) oder die schweizerische Bundesbahn (SBB) haben die erforderlichen Ressourcen, um solche Regelungen selber zu erstellen. Privatbahnen haben in ihrer vergleichsweise jungen Geschichte häufig die Regelungen der ehemaligen Staatsbahnen übernommen. Für die WU bei BASF gilt beispielsweise die Richtlinie 936 [8] der DB.

Die Richtlinie 936 (Ril 936) der DB mit dem Titel „Technische Wagenbehandlung im Betrieb“ umfasst alle organisatorischen und technischen Maßnahmen sowie Prüfkriterien und Regelungen zur Risikominimierung und Sicherstellung der Betriebssicherheit. Der Begriff *wagentechnische Untersuchung* ist eine DB interne Bezeichnung, die aus der Ril 936 hervorgeht.

Ähnlich wie bei der DB gibt es bei der SBB die Weisungen mit den Titeln „Handbuch für den technischen Wagendienst“ (Dok. Nr.: G-32550) [9] und Zugbildung bei Cargo (Dok. Nr.: G-32728) [10], die die Regeln und Anforderungen zur Umsetzung der WU festlegen. Ein Vergleich der Regelwerke der DB und SBB zur Durchführung der WU wird in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Vergleich der Regelwerke der DB und SBB zur Durchführung der WU**

	<b>DB</b>	<b>SBB</b>
<b>Regelwerke</b>	Ril 936	Handbuch für den technischen Wagendienst/ Zugbildung bei Cargo
<b>Fälligkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mindestens einmal pro Tag</li> <li>- Bei Änderung der Beladung</li> <li>- bei jedem neu gebildeten Zug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vor der Zugfahrt</li> <li>- Am neugebildeten Zug</li> <li>- Nach der Be- oder Entladung (auch ohne Neubildung)</li> <li>- Bei Übernahme eines Zuges von einem anderen EVU</li> </ul>
<b>Benennung der WU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wagentechnische Untersuchung</li> <li>- Wagentechnische Sonderuntersuchung</li> <li>- Technische Wagenbehandlung</li> <li>- Ladung im Betrieb technisch behandeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technische Zuguntersuchung</li> <li>- wagentechnische Untersuchung</li> <li>- beladungstechnische Untersuchung</li> <li>- technischer Wagendienst</li> </ul>
<b>Fälligkeit</b>	<p>nach VDV 758 (siehe Tabelle 2)</p> <p>Die WU ist vorgeschrieben:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- in Rangier- und Umschlagbahnhöfen an allen Zügen</li> <li>- in Grenzbahnhöfen an übernommenen Zügen</li> </ul> <p>An Güterzügen, die nach einer WU länger als 14 Tage abgestellt waren und abgefahren werden sollen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-in Satelliten und Knotenpunktbahnhöfen sowie Übernahmebahnhöfe unter besonderen Bedingungen (wenn z.B. in diesen Zügen Wagen eingestellt sind, die bis zu ihrem Ziel keine WU erhalten haben)</li> </ul>	<p>nach FDV R300.5 (siehe Tabelle 2)</p>

	DB	SBB
<b>Prüfkriterien, Fehlercodierung und Maßnahme</b>	Prüfkatalog AVV, Anlage 9, Anhang1 und 5 Zusätzlich DB Interne betriebliche Regelungen Nach DB-Richtlinie 408	Prüfkatalog AVV, Anlage 9, Anhang1 und 5 Zusätzlich SBB Interne betriebliche Regelungen Nach FDV 300
<b>Verzicht auf WU</b>	- Nach der Bereitstellung von max. zwei voruntersuchten Zugteilen/Zügen auf einen bereits untersuchten Zugteil (max. 2 Kuppelstellen) - nach einer Zugbildung aus max. drei voruntersuchten Zügen/Zugteilen (max. 2 Kuppelstellen) - nach dem Ausstellen vom max. zwei Zugteilen aus dem Zugverband (max. 2 Kuppelstellen) wobei das bloße Abhängen von Zugteilen an der Zugspitze und am Zugschluss nicht mitgezählt wird - nach VDV 758	Keine Angabe

### 2.2.2 Umfang der wagentechnischen Untersuchung

Die WU wird bei stillstehenden Fahrzeugen durchgeführt. Neben der Prüfung der Fristen für die Revisionen und Fahrzeuganschriften wird in der WU hauptsächlich die Veränderung der Außengeometrie und Lage sowie Schadenshinweise von Komponenten und Verbindungen durch augenscheinliche Soll-Vergleiche festgestellt. Nach der Ril 936 sollen Wagenmeister bei der WU auf Folgendes achten:

- die Fristen für Revisionen und Fristarbeiten,
- den ordnungsgemäßen Zustand, insbesondere auf
  - das Laufwerk,
  - die einwandfreie Führung der Lagergehäuse,
  - bereifte Räder wegen loser Radreifen (diese müssen bei gelöster Bremse abgeklopft werden),
  - das Untergestell,
  - die Zug- und Stoßeinrichtung,
  - den Wagenkasten,
  - die Tür-, Dach- und Klappenverschlüsse mit ihren Sicherungen,
- äußerlich erkennbare Verlademängel,
- die gleichmäßige und richtige Belastung nach den Verladerrichtlinien,
- die vorgeschriebene Verladung von außergewöhnlichen Sendungen,
- die Vollzähligkeit der losen Wagenbestandteile oder der Zubehörstücke,

- die Kupplungen der Zugsammelschiene bzw. der Dampfheizungen, bei Wagen die damit ausgerüstet sind,
- die Übergangsfähigkeit der Güterwagen, die im grenzüberschreitenden Verkehr einer anderen Bahn übergeben werden sollen.

Die Kodierung der Fehler, die Untersuchungskriterien und die einzuleitenden Maßnahmen nach Fehlerentdeckung erfolgen standardmäßig nach den Regelungen des allgemeinen Vertrages für die Verwendung von Güterwagen (AVV) [11].

### **2.2.3 Werkzeuge zur Durchführung der wagentechnischen Untersuchung**

Außer einem Klanghammer (langstielig, nicht genormt), einer Radsatzlehre, einer Taschenlampe und einem Messwerkzeug für den Radreifenabstand steht dem Wagenmeister oder dem technischen Kontrolleur nichts weiter zur Verfügung, um seine Prüftätigkeiten durchzuführen. Viel wichtiger ist die Anwendung seiner Sinnesorgane (insbesondere der Augen) und seines visuellen Gedächtnisses zur Detektion von Fehlern. Nach dem AVV-Prüfkatalog können quasi alle Fehler allein durch „Nachsehen“ detektiert werden. Gutes Hörvermögen wird für die akustische Kontrolle benötigt (beispielsweise bei Klangproben oder beim Hören von Flachstellen bei der Vorbeifahrt eines Zuges). Geruchskontrollen durch die Nase werden ebenso durchgeführt, um beispielsweise verbranntes Gummi oder Gefahrgutaustritt zu erkennen. Diese Prüftätigkeiten müssen bei allen Sichtverhältnissen und Witterungen erfolgreich durchgeführt werden können.

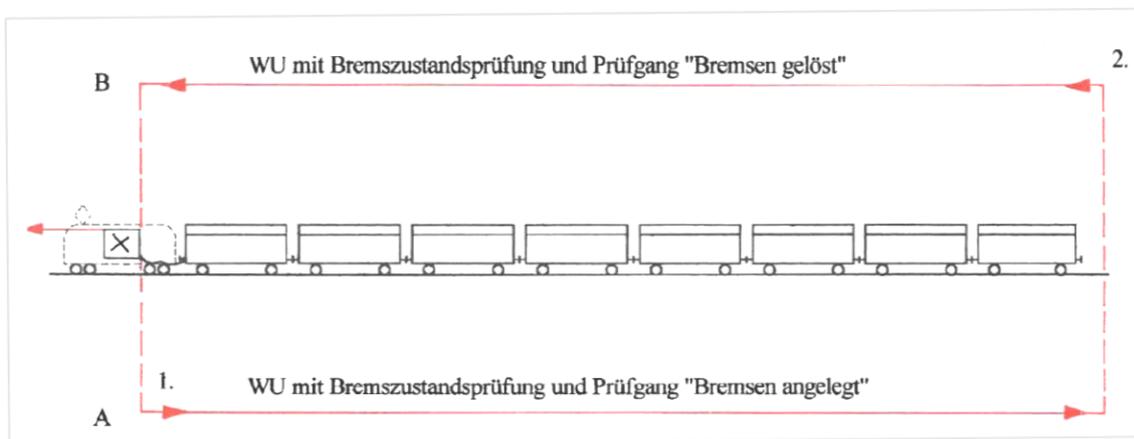
## **2.3 Bremsprobe**

Durch die BP werden die Funktionalität und der Zustand der Bremsen aller Fahrzeuge im Zug geprüft. Ähnlich wie bei der WU existieren nationale Vorschriften, die die BP vorschreiben. Die VDV-Schrift 757 [12] des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen und die Richtlinie 915 (Ril 915) [13] der deutschen Bahn regeln die BP in Deutschland. In der Schweiz wird die BP durch die Fahrdienstvorschrift 300.5 (FDV R300.5) reguliert. Als Grundsatz gilt, dass vor jeder Zugfahrt die Durchgängigkeit der Hauptluftleitung, die Dichtheit, der Zustand, der Bremszustand und der Lösezustand aller Bremsen kontrolliert werden müssen. Dies wird als volle BP bezeichnet. Zur Aufwandsreduzierung können je nach Anwendungsfall der Ablauf und die Fälligkeit der BP geändert werden. Umfang und Einsatzbedingungen der Varianten der BP sind in der VDV-Schrift 757, Ril 915 und für die Schweiz in der Fahrdienstvorschrift FDV R300.5 beschrieben.

## **2.4 Ablauf der wagentechnischen Untersuchung und Bremsprobe**

Die WU kann getrennt von einem Bremsproberechtigten oder zusammen mit der WU von einem oder zwei Wagenmeistern erledigt werden. Die Abbildung 1 zeigt einen möglichen Ablauf der WU mit voller BP bei Einsatz von einem Wagenmeister (BP ohne Vorbereitungsgang) nach Ril 936. Dafür wird der

Zug gekuppelt, mit Druckluft gefüllt und hörbar dicht bereitgestellt. Wenn die örtliche Bremsprobeeinrichtung nicht fernbedienbar ist, so ist der Wagenmeister auf einen Bremsbediener angewiesen. Im ersten Gang (A) an einer Seite des Zuges vom ersten bis zu dem letzten Wagen wird nach Einleitung einer Bremsung an allen Wagen die WU nach Unterkapitel 2.2.2 durchgeführt und bei allen Bremsen der Zustand geprüft. Dabei wird besonders geprüft, ob alle Bremsen fest anliegen. Am Zugschluss löst der Wagenmeister mit Hilfe einer Fernbedienung die Bremsen oder lässt nach Aufforderung die Bremsen vom Bremsbediener lösen. Im zweiten Gang (B) an der anderen Seite des Zuges (vom letzten zum ersten Wagen) erfolgt die WU und die Bremszustandsprüfung ebenfalls wie im ersten Gang. In diesem Gang wird das Lösen der Bremsklötze durch Bewegen oder Sichtprüfung (sichtbares Abheben) festgestellt.



**Abbildung 1: Ablauf der WU mit voller BP bei Einsatz von einem Wagenmeister nach Ril 936:1999 (ohne Vorbereitungsgang)**

Der Ablauf der WU mit BP nach Abbildung 1 entspricht dem Ablauf, der am meisten bei den Vor-Ort-Besuchen (siehe Kapitel 3) in Deutschland und in der Schweiz von den Wagenmeistern praktiziert wurde.

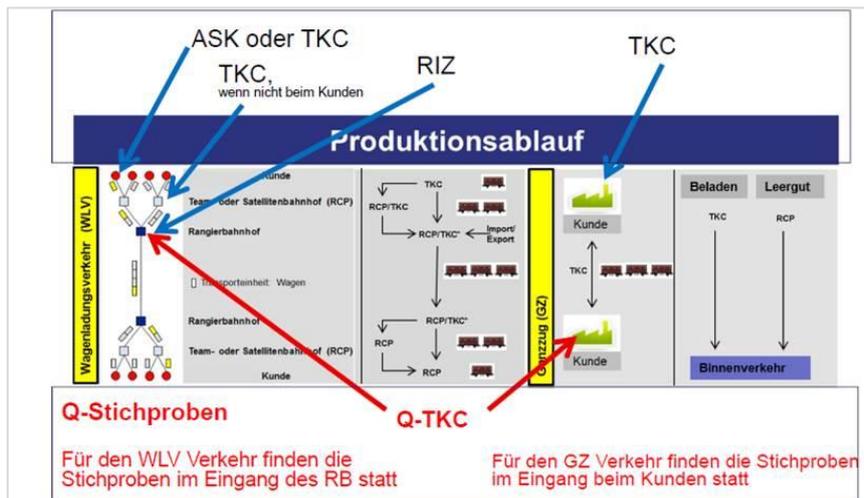
### 3. Vor-Ort-Besuche

Nach theoretischer Analyse der Vorschriften und Arbeitsanweisungen, die den Rahmen für die Tätigkeiten von Wagenmeistern bilden, sind Betriebsstellen von drei Eisenbahnverkehrsunternehmen (DB, SBB und BASF) besichtigt worden. Durch Begleitung der Wagenmeister während ihrer Einsätze im Feld sowie intensive Gesprächsführung mit Wagenmeistern und operativen Wagenmeisterverantwortlichen konnten wertvolle Einblicke nicht nur in den Alltag von Wagenmeistern, sondern auch in die Einzelheiten der WU und BP gewonnen werden. Diese Besuche waren außerdem notwendig, um den Vergleich bezüglich des Ablauf der WU und BP in den drei Betriebsstellen gegenüberzustellen sowie um das Schutzziel der einzelnen Tätigkeit und die Technologiefindung zur gleichwertigen Schutzzieleerreichung zu ermitteln.

#### 3.1 Vor-Ort-Besuche bei den Auftragsgebern

##### 3.1.1 Vor-Ort-Besuch bei der SBB-Cargo

Ein Team der TU-Berlin bestehend aus drei wissenschaftlichen Mitarbeitern war vom 08. bis zum 09.02.2018 in Luzern und Umgebung. Nach Ankunft in Luzern wurde im Bürogebäude der SBB in der Güterstraße 3 das aktuelle Produktionskonzept bzw. Einsatzmodell sowie die Tätigkeitsbeschreibung der technischen Kontrolleure von einem SBB Mitarbeiter vorgestellt. Die Abbildung 2 zeigt wie die technischen Kontrolleure im Wagenladungs- und Ganzzugverkehr bei SBB-Cargo eingesetzt und welche Arten der Zuguntersuchung praktiziert werden. Die technischen Kontrolleure werden bei den Kunden, Team-, Satelliten- und Rangierbahnhöfen eingesetzt. Im Ganzzugverkehr findet immer eine sogenannte „Technische Kontrolle Cargo“ (TKC) vor Zugabfahrt bei dem Kunden statt. Im Wagenladungsverkehr muss eine TKC entweder im Teambahnhof oder beim Kunden durchgeführt werden. Wenn die TKC erst im Teambahnhof stattfindet, ist vor Zugabfahrt eine zusätzliche „Annahme und Sichtkontrolle“ (ASK) beim Kunden fällig. Die ASK der SBB entspricht etwa der „Sichtprüfung“ nach Ril 936 der DB. Der Ablauf und Umfang einer ASK sind ähnlich denen der TKC, aber hier wird ein spezielles Augenmerk auf das Bremssystem und die Beladung gerichtet. Die ASK wird von einem geschulten Mitarbeiter mit geringerer Qualifikation als ein technischer Kontrolleur durchgeführt. Die ASK wird ausschließlich beim Kunden durchgeführt.



**Abbildung 2: Einsatzort der technischen Kontrolleure und Arten der Zuguntersuchungen bei SBB Cargo (Quelle: SBB)**

Da alle Wagen, die im Rangierbahnhof ankommen, bereits eine TKC bzw. WU von einem technischen Kontrolleur bekommen haben, findet im Rangierbahnhof nur eine Risikoorientierte Inspektion des Zuges (RIZ) statt. Die TKC bzw. WU wird nicht mehr an allen Zügen durchgeführt, sondern nur an Zügen, die als gefährlich eingestuft sind. Diese Einstufung erfolgt durch Auswertung von Q-Stichproben bei der TKC im Eingang des Rangierbahnhofes oder beim Kunden. Die RIZ ist eine vereinfachte TKC, die während der BP durchgeführt wird. Dabei wird der Zug speziell auf Fehler begutachtet, die während der Zugbildung (zum Beispiel Pufferverformungen durch zu hohe Rangierstöße) entstehen können.



**Abbildung 3: Begleitung eines Wagenmeisters am Bahnhof Gisikon-Root, 08.02.2018**

Nach intensivem Austausch mit dem SBB-Mitarbeiter, der die technischen Kontrolleure betreut, fand eine Begleitung eines technischen Kontrolleurs am Bahnhof Gisikon-Root (Abbildung 3) und bei dem

Kunden Swiss Steel AG in Hochdorf sowie am zweiten Tag im Teambahnhof Rotkreuz statt. Der Teambahnhof Rotkreuz ist ein zentraler Ort für die technischen Kontrolleure. In Rotkreuz haben technische Kontrolleure Büroarbeitsplätze für Dokumentation- und Meldungszwecke sowie Warteräume. Die Hilfsmittel und Arbeitsausrüstungen werden ebenfalls dort bereitgestellt. Um zu den Einsatzorten bzw. Gleisanschlüssen von Kunden zu gelangen, müssen technische Kontrolleure während der Arbeitszeit lange Autofahrwege zurücklegen. Das papierlose Arbeiten während der Durchführung der TKC sowie die Digitalisierung sind bei der SBB Realität. Die technischen Kontrolleure erhalten ihre Aufträge und geben Rückmeldungen über ein Smartphone, das ebenfalls benutzt wird, um Auffälligkeiten zu dokumentieren oder zu melden. Je nach Anwendungszwecke unterstützen speziell dafür entwickelte Apps den Wagenmeister. Die Abbildung 4 zeigt beispielweise die Oberfläche der App „MobWK“ zur Erfassung von Schäden bei SBB-Cargo.

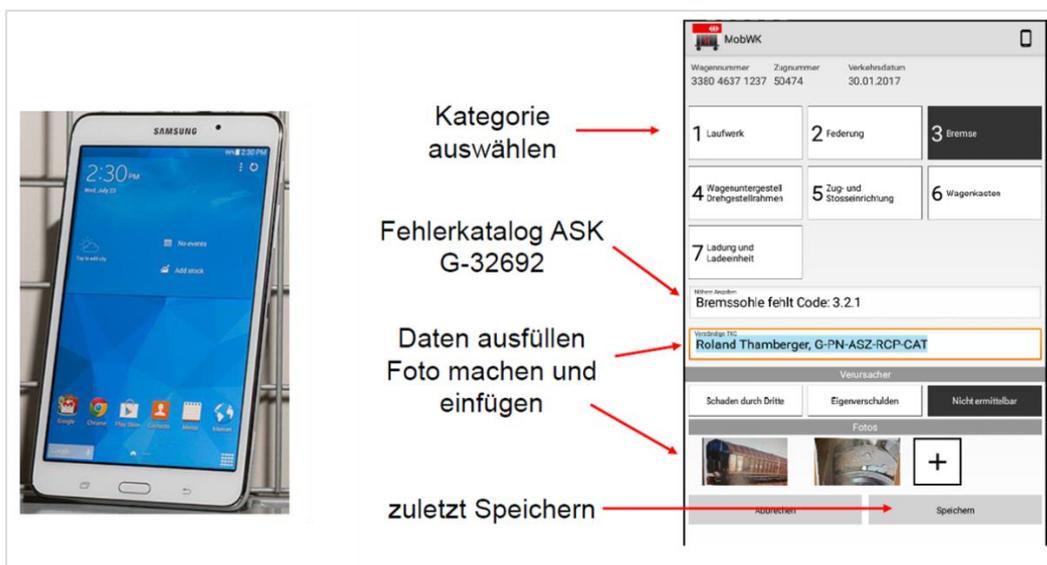


Abbildung 4: App zur Schadenerfassung und -Meldung bei SBB-Cargo [14]

### 3.1.2 Vor-Ort-Besuch bei der DB-Cargo

Mit drei wissenschaftlichen Mitarbeitern und einer studentischen Hilfskraft fand am 15. und 16.02.2018 der Besuch bei DB Cargo in Mainz und Mannheim statt. Am ersten Tag in Mainz bei frostigen Temperaturen ist ein Praxiskurs über die WU und die BP von einem Ausbilder für Wagenmeister der DB gehalten worden. Die Prüfblicke und -kriterien der Wagenmeister sowie die Schwierigkeiten bzw. Hindernisse bei der Durchführung seiner Tätigkeiten sind bei einer exemplarischen WU gezeigt und diskutiert worden.

Die Funktionsweise sowie der Umgang mit dem pneumatischen Bremssystem aus der Sicht des Wagenmeisters konnten an einem dafür gebauten Bremsprüfstand erklärt und demonstriert werden.



**Abbildung 5: HMI-Endgerät für Wagenmeister bei der DB [15]**

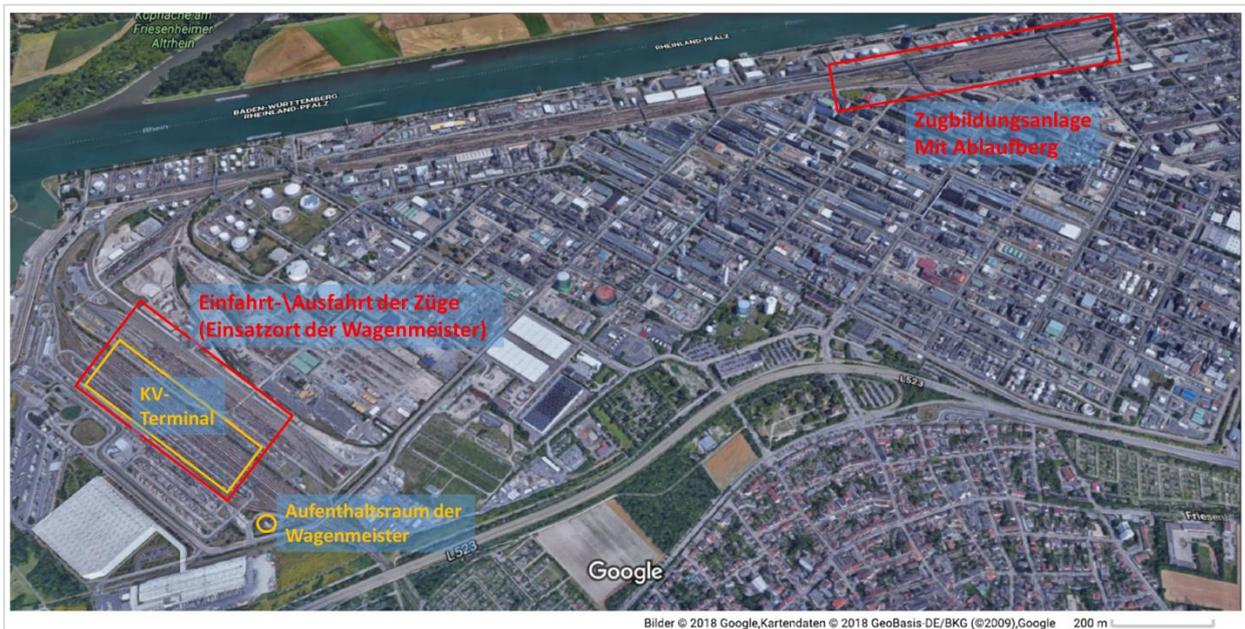
In der Nachtschicht (von 23 bis 06 Uhr) fand am zweiten Tag bei winterlichen Temperaturen die Begleitung der Wagenmeister im Rangierbahnhof Mannheim statt. Vor der Begleitung fand ein Austauschgespräch mit dem lokalen Verantwortlichen der Wagenmeister statt. Auf die örtlichen Besonderheiten bei der WU und BP ist eingegangen worden.

Als zweitgrößter Rangierbahnhof von Deutschland mit einem Wagendurchsatz von 3000 bis 3500 Güterwagen pro Tag ist der Ressourcenaufwand zur Durchführung der BP und WU im Rangierbahnhof Mannheim sehr hoch. Die WU und BP werden von einem oder zwei Wagenmeistern an einem bereits gekuppelten und mit Druckluft gefüllten Zug in der Ausfahr- und teilweise auch in der Richtungsgruppe durchgeführt. Die BP wird mit einer fernbedienten stationären BP-Anlage unterstützt. Der Zeitaufwand zur Durchführung der WU hängt von der Wagengattung und der Achsenanzahl ab. Pro Achse wird etwa eine Minute benötigt. Aufgrund der Flächengröße des Rangierbahnhofes und der nötigen Wachsamkeit beim Überqueren der Gleise werden jeweils bis zu fünfzehn Minuten für Hin- und Rückweg zwischen dem Aufenthaltsraum und dem Einsatzgleis benötigt. Im Wagenmeistergebäude des Rangierbahnhofes Mannheim sind Büroarbeitsplätze und Pausenecken für Wagenmeister vorhanden. Deren Arbeitsausrüstungen (Hammer, Taschenlampe, Schutzhelm, Handschuhe, Sicherheitsschuhe- und Kleidung, Meldezettel, GSM-R Telefon und HMI-Endgeräte) sind ebenfalls im Gebäude vorhanden. Wie bei der SBB erfolgen bei der DB die Erfassung und Meldung der Fehler sowie die Auftragsmeldung digital über ein **Human-Machine-Interface** Endgerät (siehe Abbildung 5).

Vor Beginn der WU meldet sich der Wagenmeister via GSM-R Telefon bei dem örtlichen Fahrdienstleiter (FDL) auf dem Zug an. Der FDL sperrt das Einsatzgleis und der Wagenmeister stellt zusätzlich eine Sh2-Scheibe („Schutzhalt“) auf. Mit Hilfe des HMI-Endgerätes kann er auf die Software/Datenbank „Produktionsverfahren Güterverkehr“ (PVG ist die zentrale Datenbank der DB Cargo) zugreifen und sich mit der Zugnummer für die WU anmelden. Die WU, BP und Wagenreinigungskontrolle werden gleichzeitig durchgeführt und im HMI erfasst. Bei der BP erfolgt die Dichtheitsprüfung vollautomatisch und die Ergebnisse werden direkt ins PVG eingetragen. Die Befehle zum Lösen oder Anlegen der Bremsen erfolgen via HMI.

### 3.1.3 Vor-Ort-Besuch bei BASF

Vom 28.02. bis 01.03.2018 haben zwei wissenschaftliche Mitarbeiter und ein studentischer Mitarbeiter der TU Berlin die Wagenmeistertätigkeiten bei der BASF in Ludwigshafen erörtert und beobachtet. Wie in der Abbildung 6 zu sehen, verteilt sich die Gleisanlage der BASF in Ludwigshafen auf ein sehr großes Areal. Die Gleisanlage besteht aus einer Zugbildungsanlage mit Ablaufberg, einem KV-Terminal, einer Ein- und Ausfahrgruppe und vielen Lade- und Werkstraßen. Das KV-Terminal wird von der Firma Kombi-Terminal Ludwigshafen betrieben. Das KV-Terminal ist auch für Züge bzw. Wagen, die nicht für BASF verkehren, zugänglich. Die Ein- und Ausfahrgruppe sind nicht wie Rangierbahnhöfen getrennt vor und hinter der Zugbildungsanlage anzutreffen. Sie befinden sich am gleichen Ort.



**Abbildung 6: Gleisanlage der BASF und Einsatzort der Wagenmeister in Ludwigshafen**

Der KV-Terminal ist Teil der Ein- und Ausfahrgruppe. In Ludwigshafen wird zwischen konventionellem Güterwagenbetrieb und kombiniertem Verkehr unterschieden. Eine Besonderheit der WU bei der BASF ist die Tatsache, dass die WU ausnahmslos auch bei der Einfahrt durchgeführt wird. Durch die WU in der Einfahrgruppe wird sichergestellt, dass nur ordnungsgemäße, betriebs- und verkehrssichere Güterwagen auf das Gelände kommen und dass potentielle Schadenverursacher vor Geländeeintritt festgestellt werden. Im kombinierten Verkehr (KV) wird die BP zusätzlich zu der WU im Einfahrgleis gemacht. Die Durchführung der WU und der BP in der Einfahrgruppe ermöglicht die Vermeidung der Ausfälle und Verspätungen beim Ausgang im KV. Im konventionellen Güterwagenbetrieb sowie im KV ermöglicht die Ausführung der WU am Eingang die Feststellung des sicheren/funktionstüchtigen Zustandes der Wagen vor der Beladung. Aufgrund des hohen Anteils an Gefahrgut, ca. jeder 2. Wagen, sind die Prüfanforderungen im Vergleich zu Mannheim und Luzern höher. Die Kontrolle der Wagenbeschriftungen, -inhalte und -reihungen sowie Frachtpapiere und Mängel an der Wagenstruktur hat einen hohen Stellenwert. Mit einem Durchsatz von ca. 800 Wagen pro Tag ist der Ressourcenaufwand zur Durchführung der WU

und BP mit den besonderen Prüfanforderungen in der Ein- und Ausfahrgruppe sehr groß. Im KV bleibt ein Zug etwa vier Stunden im Terminal. Sechzig Minuten nach Zugbildung bzw. Beladung verlässt der Zug das Terminal.

In Ludwigshafen arbeiten die Wagenmeister rund um die Uhr in einem Zweischichtsystem (5:30 - 17:30 Uhr; 17:30 - 5:30 Uhr). Pro Schicht werden ca. 10 Wagenmeister eingesetzt. Die BASF hat ihre eigenen Wagenmeister, die die Züge der BASF oder nach Vereinbarung die Züge externer Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) prüfen. Die bei BASF verkehrenden EVU können Wagenmeisterleistungen von Dritten in Anspruch nehmen. Die DB Cargo hat beispielsweise ihre eigenen Wagenmeister vor Ort. Im Aufenthaltsgebäude der Wagenmeister in Ludwigshafen gibt es Räumlichkeiten für BASF, DB Cargo und Wagenmeister anderer externer Firmen. In der Einfahrt des BASF-Geländes ist eine Anlage zur Flachstellendetektion vorhanden, sodass Wagenmeister Prüfaufträge mit Hinweisen auf Flachstellen bekommen. Die Wagenmeister der BASF arbeiten mit zwei verschiedenen Datenbanken. Die Daten der Züge der DB Cargo, die von Wagenmeistern der BASF geprüft werden, werden wie in Mannheim in das PVG eingetragen. Die Daten der Züge welche für BASF verkehren, werden in eine speziell für BASF entwickelte Datenbank eingepflegt.

### **3.2 Entdeckungswahrscheinlichkeit von Schäden**

Durch die Vor-Ort-Besuche ist die Notwendigkeit der WU und BP im SGV bestätigt worden. Wie im Kapitel 4 nachvollzogen werden kann, werden bei der WU und BP viele sicherheitsrelevante Fehler von den Wagenmeistern gefunden und teilweise beseitigt. Der Wagenmeister kennt die Wagen und deren Fehlererscheinungen sowie spezifische Schadensanfälligkeiten. Er kann sekundenschnell Anomalitäten erkennen. Sein visuelles Gedächtnis ist sehr ausgeprägt und entwickelt bzw. verfeinert sich im Laufe der Jahre. Naturbedingt ist die Prüffähigkeit aller Wagenmeister (WM) nicht gleich. Der Fokus und die Prüffähigkeit von Wagenmeistern während der WU hängen von der individuellen Erfahrung, Ausbildung, von selbst oder anderweitig erkannten Vorfällen oder von erhaltenen Hinweisen ab. So werden beispielsweise bestimmte Komponenten gesondert geprüft, wenn der WM bei diesen Komponenten bereits einmal einen Schaden gefunden hat oder auch, wenn er einmal einen Fehler übersah und später darauf aufmerksam gemacht wurde. Außerdem war häufig zu sehen, dass WM von ihren Vorgesetzten auf bestimmte Komponentenschäden, die besonders zu beachten sind, hingewiesen werden.

Trotz der hohen Prüffähigkeit der Wagenmeister existieren viele Schäden, die aus den folgenden Gründen nicht von allen WM detektiert werden können:

- Schlechte Einsehbarkeit der Komponenten bzw. Fehler aufgrund der konstruktiven Gestaltung des Wagens (Bsp.: beschädigte Drehpfanne, Rissbildung bei der inneren Lastfeder Y25, Beschädigung der Lauffläche am Rad-Schiene-Kontakt)
- Schlechte Einsehbarkeit der Komponenten bzw. Fehler aufgrund der schlechten Sichtbarkeit bei Dunkelheit und Verunreinigung
- Ungünstige Witterungseinflüsse (Frostperioden, Regen, Wind)
- Schlechte körperliche und psychische Verfassung bzw. Belastbarkeit (Viele Prüftätigkeiten können nur in gebeugter Haltung verrichtet werden. Bei einem offenen Güterwagen wie in Abbildung 7 kann ein Hochklettern notwendig sein, um die Einhaltung der Verladerichtlinie zu beurteilen. Lange Laufwege müssen zurückgelegt werden. Die Lärmbelastung ist sehr hoch)
- Unbeherrschbarkeit der hohen Anzahl und Varietäten der Prüfblicke und -kriterien durch die unterschiedlichen Wagengattungen und die verschiedenen Ladegüter
- Fehlende gesicherte Laufwege im Gleisbereiche und gleichzeitiger Betrieb auf den Nachbargleisen
- Fehler an Wagen, die gerade von der Revision oder Instandhaltung kommen
- Unbekanntheit der Schadenhistorie oder Vorfällen
- Zusätzliche Anforderungen/Gefahren bei Gefahrgut-Wagen



**Abbildung 7: Prüfen der Einhaltung der Verladerichtlinie, Emmenbrücke 08.02.2018**

Jedes Mal, wenn ein WM einen Fehler findet, wird dadurch ein Prozess ausgelöst. Der ausgelöste Prozess kann je nach Fehlerklasse oder -art von einer einfachen Kennzeichnung und Meldung der Fehler ohne Fahrhindernis bis zu einer Aussetzung des Wagens oder speziell bei einigen Gefahrgütern zu einer kompletten Stilllegung des Betriebs führen. Die getroffenen Entscheidungen nach der Fehlerdetektion sind bei Wagenmeistern unterschiedlich. So wurde etwa in einem Fall ein nicht mehr gangbarer Bremsumstellhebel ohne weitere Maßnahmen toleriert, während in einem anderen (exemplarischen)

Fall ein fehlender Farbanstrich am Bremsstellungswechsel zu einer Bezettelung geführt hätte. Diese individuellen Vorgehensweisen können zum Teil dadurch begründet werden, dass das Durchsetzungsvermögen von Wagenmeistern beeinflussbar ist, teilweise übergeordnete Motivationen vorliegen („*der Zug soll fahren und Geld verdienen*“) und nicht zuletzt der Güterwagen auch einige Fehler ohne weitere Auswirkungen toleriert.

### 3.3 Zeitbedarf

Die Prüfzeit, die am Zug entlang für eine WU und BP nach den Prozessen 9, 17 bis 22 der Tabelle 1 benötigt wird, um Fehler und Unregelmäßigkeiten zu detektieren oder festzustellen, ist bei ähnlicher Wagenkombination bei allen Wagenmeistern unabhängig von Einsatzort und drei zugehörigen Unternehmen nahezu gleich. Allein die Dauer der anfallenden und systembedingt notwendigen Nebentätigkeiten variieren von Wagenmeister zu Wagenmeister je nach Einsatzort und Unternehmen. Durch die Art und Weise mit der die WU und BP im Moment durchgeführt sind, treten die folgenden zeitraubenden Nebentätigkeiten auf:

- Hin- und Rückfahrt zum Einsatzort (wenn der Arbeitsplatz sich nicht am Einsatzort befindet)
- Hin und Rückweg zum Einsatzgleis
- Dokumentation und Kommunikation (Kennzeichnung, Eintragung und Meldung von Fehlern)
- Beseitigung von Fehlern (Bsp.: ordnungsgemäßes Kuppeln, Bremsparameter richtig einstellen)
- Einleitung von Maßnahmen nach Fehlerfindung (Bsp.: Bremse ausschalten, Wagen aussetzen)
- Warten (auf Auftragserteilung, auf den Zug, auf Sperrung des Gleises, auf Rangierlok)
- Pausieren (notwendig wegen der hohen körperlichen Belastung durch die langen Laufwege und Witterungseinflüsse)

Der Auslastungsgrad eines Wagenmeisters hängt im Wesentlichen von der zugehörigen Organisation und deren Leistungsfähigkeit ab. Um sein Know-How einzusetzen, ist der Wagenmeister auf andere Personen angewiesen. Er muss u.a. seinen Einsatzort, sein Einsatzgleis und die Ankunftszeit des Zuges kennen. Weiterhin muss ihm die Wagenliste vor dem Einsatz vorliegen. Das Gleis muss für ihn gesperrt und gesichert werden. Die notwendigen Arbeits- und Betriebsmittel müssen vorhanden sein und gut funktionieren. Die Arbeitsmittel (Smartphone oder HMI-Endgerät) zur Dokumentation oder Meldung der Fehler müssen unter den rauen Einsatzbedingungen leicht und problemlos bedienbar sein. Für ihn muss ein telefonischer Ansprechpartner bereitstehen.

### 3.4 Erkenntnisse

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es keine wesentlichen Unterschiede bei der Durchführung der WU zwischen den drei EVU gab. In allen Fällen waren die Prüfschritte gemäß Regelwerk nicht einzeln voneinander abgrenzbar. Die Prüfungen geschahen in allen Fällen im langsamen Vorbeigehen am Zug sowie mit vereinzelt Stehenbleiben, sofern erforderlich. Die WM erfassen dabei immer den ganzen Wagen, bzw. große Teile davon mit wenigen Blicken. Es handelt sich nicht um ein Schritt-für-Schritt-Abarbeiten einzelner Komponenten. Das Entfallen einzelner Prüfschritte würde daher nicht zu einer Verkürzung der benötigten Zeit führen. Auch ist es nicht möglich zu bewerten, welche Prüfungen am aufwändigsten sind bzw. am meisten Zeit in Anspruch nehmen.

Außerdem ist festzuhalten, dass nur das geprüft wird, was mit vertretbarem Aufwand auch prüfbar ist. Ein regelmäßiges Bücken oder gar auf den Boden legen findet nicht statt. Das gilt auch, wenn die Bauform des Wagens dies eigentlich erfordern würde (z.B. wegen weit nach unten reichendem Langträger vor dem Drehgestell). Derartig körperlich aufwändige Handlungen wie etwa Bücken finden vielmehr stark vereinzelt statt, z.B. wenn es Erfahrungen oder eine besondere Prüfanweisung gibt.

Aus dem reichhaltigen Erfahrungsschatz der WM („*diese Wagen haben ganz oft den Fehler xyz*“) kann geschlussfolgert werden, dass es keinen Lernprozess zur Abstellung der Fehlerursachen gibt. Derartige Erfahrungswerte zu regelmäßig auftretenden Fehlern gibt es sowohl im Bereich der Wagentechnik (z.B. regelmäßig lose Schrauben bei einem Wagentyp) als auch im Bereich der Ladungssicherung (z.B. regelmäßig abgerissene Schutzfolie bei Neuwagen).

Mehrere WM berichteten davon, dass ein Wagen, der gerade aus einer Revision kommt, besonders gründlich zu prüfen sei, weil oftmals fehlende Komponenten nach einer Revision vorlägen.

In zwei Fällen konnte beobachtet werden, dass bei Wagen, deren Stammdaten nicht in der Datenbank des EVU vorlagen („Fremdwagen“) ein großer Zeitbedarf zur manuellen Eingabe dieser Daten entstand.

## 4. Schadensanalyse

Im „Allgemeinen Vertrag für die Verwendung vom Güterwagen“ (AVV) beziehungsweise in der Anlage 9 zum AVV sind die „Technischen Bedingungen für den Austausch von Güterwagen zwischen Eisenbahnunternehmen“ erläutert. Darin ist ein umfassender Fehlerkatalog für nahezu alle möglichen Fehlzustände von Güterwagen enthalten. Zudem sind die Fehler nach der Fehlerschwere klassifiziert, so dass der Umgang mit den Fehlern\Schäden, zum Beispiel „Wagen aussetzen“, einheitlich und transparent für alle Beteiligte erfolgen kann.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die Schadkategorien und die Fehlerklassen eingegangen. Im Anschluss daran werden real aufgetretene Fehler, die durch Wagenmeister entdeckt wurden, gemäß dem AVV Fehlerkatalog, ausgewertet.

### 4.1 Schadkategorien gemäß AVV

Die AVV listet gängige Fehler an Güterwagen auf, gruppiert diese und weist den Fehlern einen eindeutigen Code sowie eine Fehlerklasse zu. Im AVV sind folgende Hauptgruppen definiert:

1. Laufwerk
2. Federung
3. Bremse
4. Wagenuntergestell und Drehgestellrahmen
5. Zug- und Stoßeinrichtungen
6. Wagenkasten
7. Ladung und intermodale Ladeeinheiten
8. Besondere Ereignisse

Die Nummer der jeweiligen Hauptgruppe ist zugleich die erste Zahl im Schadcode. Jede Hauptgruppe besitzt mehrere Untergruppen, sodass ein Code von einer Länge von bis zu 4 Zahlen entstehen kann (Beispiel: 3.3.5.1 -> Luftabsperrrahn defekt). Jedem dieser Codes ist zur Gewichtung des Fehlers eine Fehlerklasse zugeordnet. Es gibt insgesamt fünf Fehlerklassen, wobei die Schwere der Fehler von 1 beginnend immer stärker zunimmt. Während der Fehlerklasse 1 geringe Schäden ohne direkte Folge zugeordnet werden und umfasst die Fehlerklasse 5 sicherheitsgefährdende Mängel. Die Beschreibung der Fehlerklassen ist Tabelle 4 zu entnehmen. Für die Anwendung des AVV Fehlerkataloges sind nur die Fehlerklasse 3 bis 5 relevant, da nur diese verwendet werden.

**Tabelle 4: AVV Fehlerklassen, Definition sowie Fehlerwert**

Fehler-klasse	Definition	Fehlerwert
1	Belanglose Fehler ohne Auswirkung auf die Verkehrstauglichkeit und Betriebssicherheit; Finden im QMS - System keine Berücksichtigung	0,002
2	Fehler mit geringen Auswirkungen auf die Verkehrstauglichkeit; Finden im QMS – System keine Berücksichtigung	0,05
3	Nebenfehler: Fehler mit erheblichen Auswirkungen auf die Verkehrstauglichkeit sowie Fehler mit Auswirkungen auf die Betriebsabwicklung (fehlende oder fehlerhafte Bezeichnung)	0,125
4	Hauptfehler: Fehler bei denen die Verkehrstauglichkeit nicht gewahrt ist oder die zur Betriebsgefährdung führen können sowie Fehler, die zu Personenschäden führen können (Bedienungspersonal Güterwagen)	0,4
5	Kritische Fehler: Fehler mit erheblichen Auswirkungen auf die Betriebssicherheit und Fehler, die eine akute Transportgefährdung zur Folge haben können.	1

#### 4.1.1 Schadensentwicklung

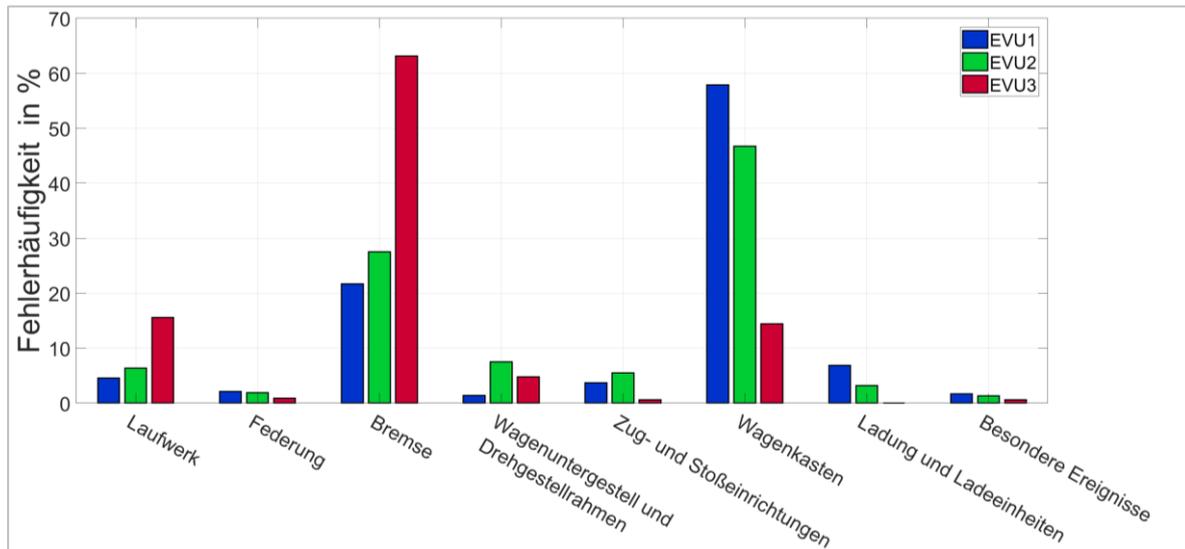
Neben der Fehlerschwere ist eine Unterscheidung in der Entstehung der Fehler für eine zukünftige digitalisierte Wagentechnische Untersuchung von Bedeutung. Für eine Detektion ist es unter Umständen wichtig, ob die Schäden spontan oder kontinuierlich entstehen. Kontinuierliche Fehler entstehen in der Regel durch Verschleiß oder natürliche Alterung. Solch ein Fehler (Beispiel: verschlissene Bremssohle) kann bereits vor dem eigentlichen Auftreten in zeitnaher Zukunft erkannt/prognostiziert werden und folglich ohne große Auswirkungen auf den Betriebsablauf korrigiert werden (Beispiel: Wagen muss nach dem Abladen der Ladung der Werkstatt zugeführt werden). Ein spontaner Fehler (Beispiel: gebrochenes Federblatt) hingegen ist erst erkennbar, wenn dieser tatsächlich vorliegt. Spontane Fehler können so abhängig von der Fehlerklasse zum Aussetzen eines Wagens und damit zu einer Störung im Betriebsablauf führen.

#### 4.2 Schaddatenauswertung

Zur Schaddatenauswertung standen die Schadprotokolle von drei Eisenbahnverkehrsunternehmen (BASF, DB Cargo und SBB Cargo) zur Verfügung. Insgesamt wurden von diesen drei Unternehmen ca. 95.500 Schadwagen innerhalb eines Jahres registriert und ca. 244.500 Fehler bzw. Schäden von Wagenmeistern im Feld entdeckt. Daraus folgt, dass durchschnittlich jeder Schadwagen dreimal in der Schaddatenbank verzeichnet ist. Anzumerken ist jedoch, dass die Gesamtzahl der geprüften Wagen über den Betrachtungszeitraum unbekannt ist. Bei dem Vergleich der Datensätze stellte sich zudem heraus, dass zwar die Fehlerkataloge der einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen auf dem AVV basieren, diese jedoch um Fehlercodes erweitert wurden, welche nicht einheitlich sind. Da dies jedoch nur einen geringen Anteil der Fehler betrifft, wurden zur Vereinheitlichung nur Fehler ausgewertet, die dem AVV zugeordnet werden können. Die Auswertung der Schadcodes erfolgt anonymisiert und daher werden die EVU im folgenden nur EVU1, EVU2 und EVU3 genannt. Die Abweichungen, die sich bei EVU3 von den beiden anderen EVU im Folgenden aufzeigen, sind in der abweichenden Schadcodierung und in der unabhängig von der Studie vorab getätigten Aufarbeitung der Fehler begründet.

#### 4.2.1 Häufigkeitsverteilung

Der Abbildung 8 ist zu entnehmen, dass der Wagenkasten ausgehend von den acht Hauptgruppen die Gruppe mit den meisten Fehlern ist (EVU1, EVU2 circa 50%).



**Abbildung 8: Fehlerhäufigkeit der 3 EVUs sortiert nach Hauptgruppen des AVV Fehlerkataloges**

Etwas seltener mit circa 20 – 30 % folgt die Bremse hinsichtlich der Fehlerquote. Bei EVU3 ist die Bremse mit nahezu 60 % sogar dominierend, wobei die Zahl aus den genannten Gründen schwer zu vergleichen ist.

In der Einzelbetrachtung der Fehler wird nochmals deutlich, dass sich die Gesamtheit der Fehler auf wenige Fehlerarten beschränkt. Die zehn häufigsten Fehlercodes der drei EVU decken circa 50 % der detektierten Fehler ab. In der Abbildung 9 ist dies grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ausschließlich Fehler am Wagenkasten und an der Bremse unter den häufigsten zehn Fehlern vorkommen.

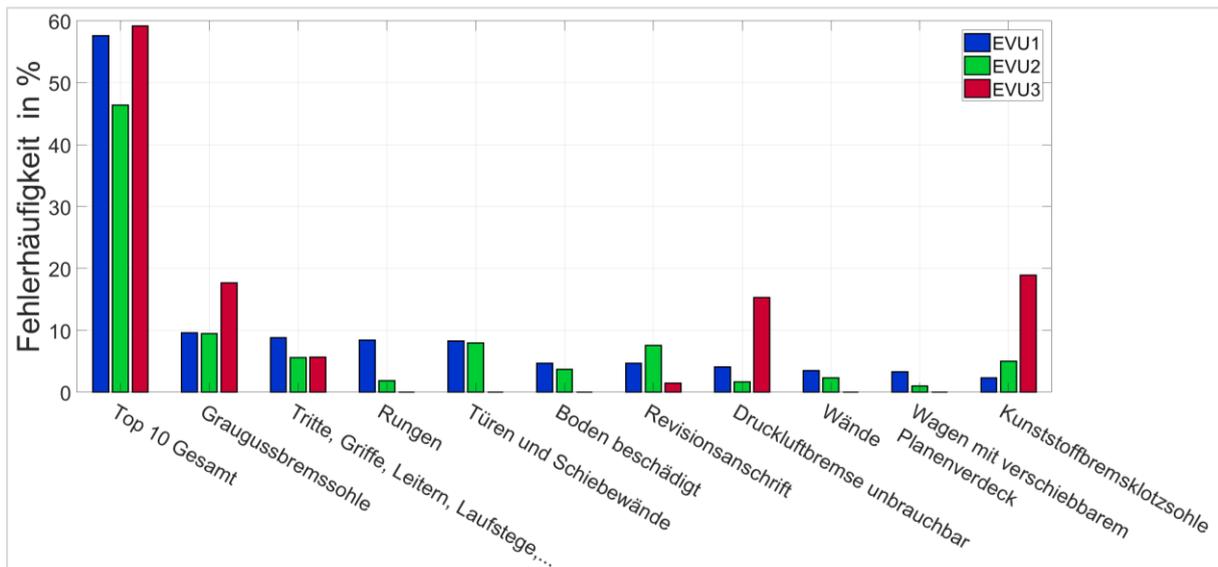


Abbildung 9: Fehlerhäufigkeit der drei EVU sortiert nach den zehn häufigsten Fehlercodes des AVV Fehlerkataloges

#### 4.2.1.1 Laufwerk

Abbildung 10 zeigt die Gesamtanzahl der Fehler der Hauptgruppe Laufwerk von EVU1 und EVU2. Zudem sind die fünf häufigsten Fehler dieser Hauptgruppe aufgeführt, welche deutlich mehr als die Hälfte der Fehler dieser Hauptgruppe ausmachen. Zu beachten ist, dass Flachstellen, Materialauftragungen und thermische Überbeanspruchungen meist durch einen Fehler im Bremssystem hervorgerufen werden. Aus diesem Grund könnte man diese Fehler auch der Bremse zuordnen, wenn man die Ursache und nicht den Ort des Auftretens betrachtet.

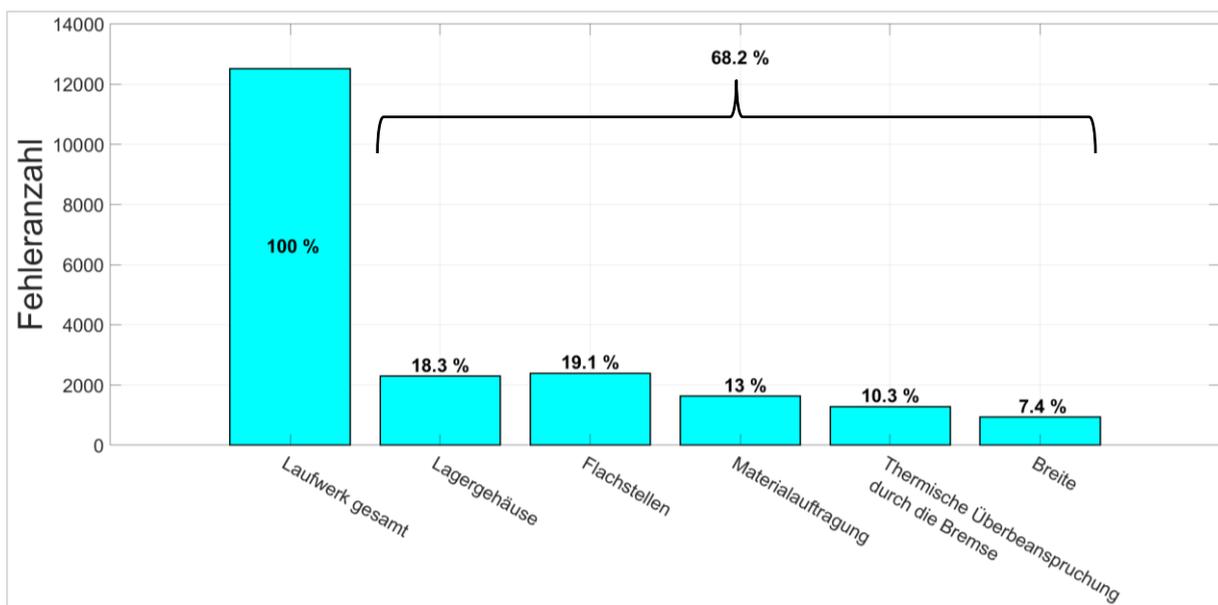
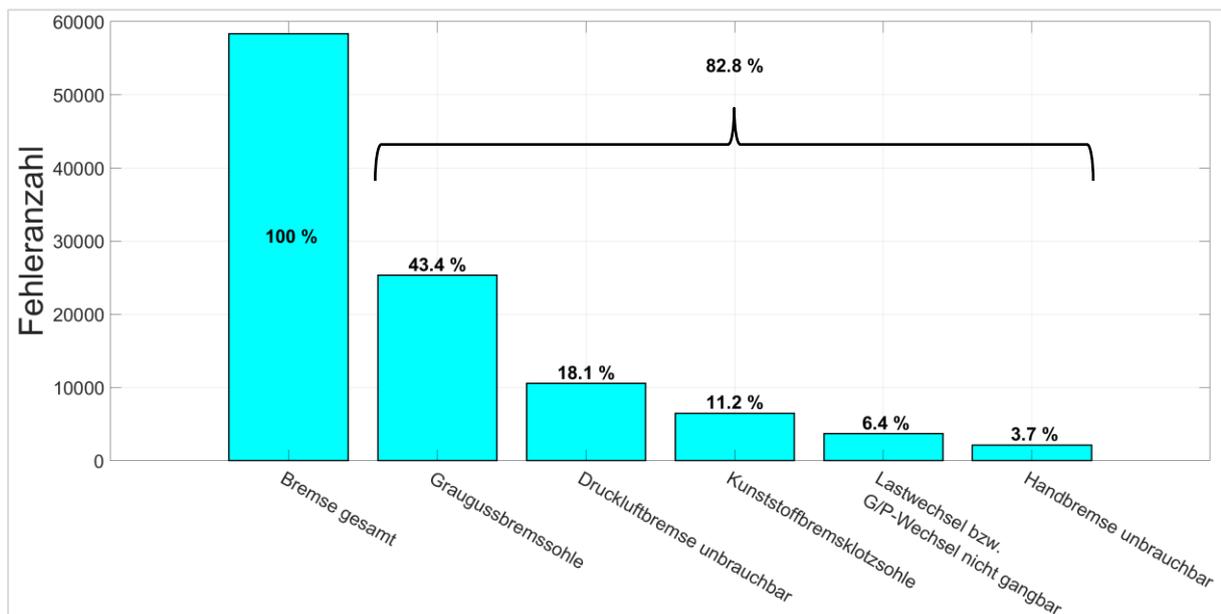


Abbildung 10: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Laufwerk (EVU1+EVU2)

#### 4.2.1.2 Bremse

Abbildung 11 zeigt analog zu Abbildung 10 die Hauptgruppe Bremse mit den fünf häufigsten Fehlern. Auffällig ist bei dieser Hauptgruppe, dass 54,6 % der Fehler auf defekte Bremssohlen (Grauguss und Kunststoff zusammen) zurückzuführen sind. Bei defekten Bremssohlen handelt es sich jedoch zumeist um verschlissene Bremssohlen. Es ist somit ein Schadbild, welches im Verschleißfall, einer kontinuierlichen Entwicklung unterliegt. Der zweithäufigste Fehler „Druckluftbremse unbrauchbar“ ist sehr allgemein gehalten und bietet dadurch keine genauen Einschränkungsmöglichkeiten auf ein genaues Bauteil.

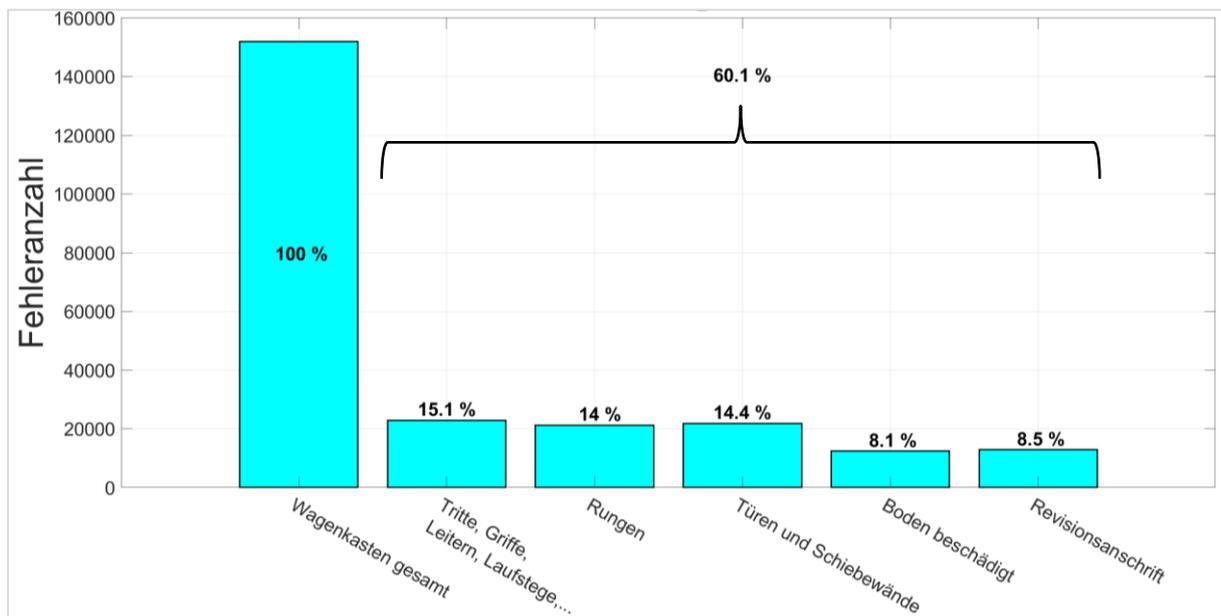


**Abbildung 11: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Bremse (EVU1+EVU2)**

#### 4.2.1.3 Wagenkasten

Entsprechend der letzten beiden Abbildungen wird in Abbildung 12 die Hauptgruppe Wagenkasten betrachtet. Es fällt im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen auf, dass die prozentualen Fehlerhäufigkeiten der fünf häufigsten Fehler dieser Hauptgruppe sehr nah beieinanderliegen. Die geringe prozentuale Häufigkeit der einzelnen Schadcodes lässt sich durch die große Anzahl an „Codes“ für diese Fehlergruppe begründen. Hinter der Anzahl der Codes verbirgt sich die Vielfalt der Wagentypen wie „Flachwagen“, „offene Wagen“, „Kesselwagen“, etc. Im Gegensatz zur beispielhaften Baugruppe Bremse wird hier eine starke Differenzierung der Fehler bis in Detail vorgenommen.

Ein großer Anteil, darunter auch die vier häufigsten Fehler dieser Gruppe, sind auf Schäden, die durch eine unzulässige massive Krafteinwirkung beim Beladen bzw. Entladen der Wagen auftraten, zurückführbar.



**Abbildung 12: Übersicht über die am häufigsten entdeckten Fehler bei der Wagentechnische Untersuchung für die Hauptgruppe Wagenkasten (EVU1+EVU2)**

Die Betrachtung der zehn häufigsten Fehler und der drei vorgestellten Hauptgruppen zeigt, dass es sich bei der überwiegenden Anzahl von Fehlern um spontane Fehler handelt.

#### 4.2.2 Relevanz

Neben der Häufigkeit sind vor allem die Fehlerfolgen von Bedeutung, welche in diesem Abschnitt bewertet werden. Die Schwierigkeit der Bewertung liegt vor allem in den zum Großteil unbekanntem Konsequenzen eines Schadens. Es ist dadurch beispielsweise unbekannt, ob ein Wagen einer Werkstatt tatsächlich zugeführt wurde und auch die damit verbundenen Kosten sind ebenso gänzlich unbekannt. Als geeignetes Kriterium für die Relevanz des Schadens stellt sich somit der Fall sofortiges Aussetzen (fehlende Lauffähigkeit) dar, denn dieser hat durch das notwendige Ausrangieren unmittelbare Folgen.

##### 4.2.2.1 Vorgehen

Die Schwere der Folgen lässt sich durch die Lauffähigkeit und die Bezeichnung, welche in der Richtlinie 936 der DB (RiL936) und AVV Anlage 9 beschrieben wird, bewerten. So sind die Folgen für einen Wagen, welcher nicht lauffähig ist und aus diesem Grund ausgesetzt werden muss, im Vergleich als schwerer zu bewerten, als ein Wagen, der noch begrenzt lauffähig oder sogar uneingeschränkt lauffähig ist. Um den Großteil der zur Verfügung stehenden vergleichbaren Daten (EVU1 und EVU2) für die Folgenbewertung verwenden zu können, wurde auf Grundlage der Lauffähigkeit und der Bezeichnung ein neues vereinfachtes Bewertungsschema im Rahmen dieser Studie verwendet. Dieses Bewertungsschema unterscheidet nur noch zwischen lauffähig, bedingt lauffähig und nicht lauffähig. In der RiL936 wird hingegen zwischen sieben Lauffähigkeiten unterschieden (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Lauffähigkeitsklassen nach Richtlinie 936 der DB

Lauffähigkeit	Maßnahme	Beschreibung
Nicht lauffähig Lf 1 zur Reparatur oder Lf 2 zur Zurechtladung	Wagen aussetzen	Diese Wagen sind mit Rotzettel zu bezetteln. Für die Zuführung zur Reparatur (Rep (Werk/ MWS)) bzw. Zurechtladung ist die Lf herzustellen und/ oder weitere betriebliche Bedingungen mit Muster Betriebliche Sonderbehandlung festzulegen.
Nicht lauffähig Lf 4	Wagen nicht bewegen	Diese Wagen sind mit Rotzettel und mit Muster Betriebliche Sonderbehandlung zu bezetteln. Hierbei müssen die notwendigen betrieblichen Bedingungen festgelegt werden.
Eingeschränkt lauffähig Lf 6	Wg. im nächsten Behandlungsbahnhof mit Werk/MWS zur Instandsetzung	Wagen bleibt bis zum nächsten Behandlungsbahnhof mit Werk im Zugverband, jedoch muss dieser vor Übergabe an einen Kunden oder andere Halter/ EVU der Rep (Werk/MWS) zugeführt werden. Diese Wagen sind mit Rotzettel zu bezetteln.
Begrenzt lauffähig Lf 3 MWS oder Lf 5 Werk	Nicht wieder zu beladen, nach Entladung zur Rep/MWS	Wagen führt im beladenen Zustand den Lastlauf zu Ende, im leeren Zustand einen anstehenden Lastlauf durch. Diese Wagen sind mit Muster K zu bezetteln. Für eine erneute Wiederbeladung sind diese Wagen vom Transport auszuschließen. Leere Wagen mit Halterkürzel (VKM) D-DB, D-ATG, D-BTSK, D-DBSNI, NL-DB, dürfen im Verkehr mit anderen EVU (AVV Verkehr) nicht verfügt werden. <i>Sind Codes mit (**) gekennzeichnet, muss anstatt der Lf 5 die Lf 3 vergeben werden.</i>
Uneingeschränkt lauffähig Lf 0	Zu untersuchen	Wagen mit Schäden und Mängeln, die einen Weiterlauf und eine Wiederbeladung nicht ausschließen, jedoch eine zielgerichtete Untersuchung durch die benutzenden EVU erfordern. Diese Wagen sind mit Schadzettel Muster M zu bezetteln.

Ausgehend von Tabelle 5 kann nun eine Zuordnung von Lauffähigkeiten zu der Bezettelung der Wagen erfolgen. Zudem wurde für Fehler, die nur einen Schadcode in den Datensätzen von EVU1 bzw. EVU2 besaßen, ein Abgleich mit der zu erfolgenden Bezettelung laut AVV vorgenommen. Sofern die Bezettelung für den jeweiligen Fehler nach AVV eindeutig war, wurde der Fehler mit in die Auswertung aufgenommen. Die Auswertung konnte so durch die Lauffähigkeit oder die Bezettelung mit Tabelle 6 erfolgen.

Tabelle 6: Bezettelungsschema Lauffähigkeit

Bezettelung	Lauffähigkeit	Bewertungsschema
Schadzettel Rotzettel (Aussetzen)	1,2,4	nicht lauffähig
Schadzettel Muster K	3,5,6	bedingt lauffähig
Schadzettel Muster M	0	lauffähig

Beispielfehler für die Fehlerschwere nach dem Bewertungsschema sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

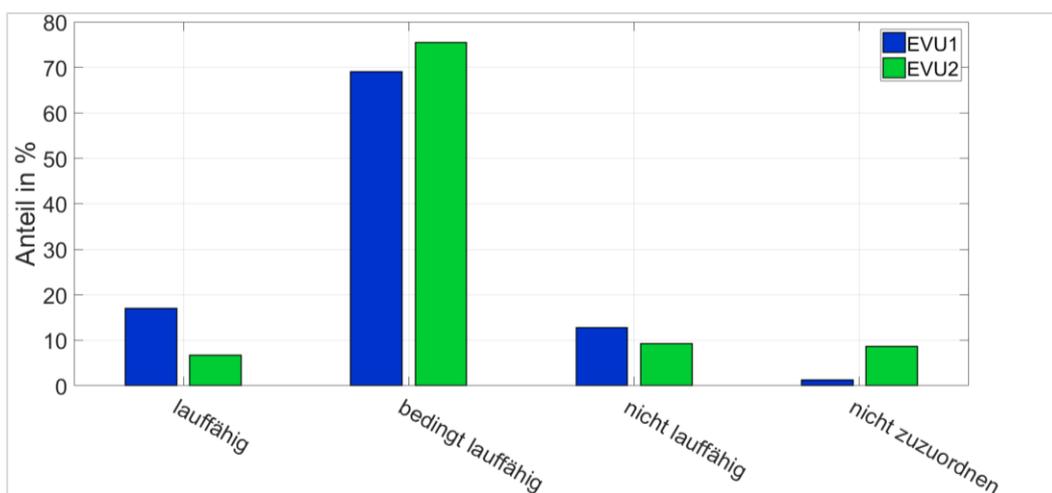
**Tabelle 7: Fehlerbeispiele für Bewertungsschema**

Bewertungsschema	Beispiele für Fehler
<b>nicht lauffähig</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagergehäuse undicht</li> <li>• Hauptluftleitung unbenutzbar</li> <li>• Plane - Risse, Löcher &gt; 30 mm</li> </ul>
<b>bedingt lauffähig</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermische Überbeanspruchung durch die Bremse bei eingehaltenen Toleranzen</li> <li>• Graugussbremssohle, fehlt, gebrochen, durchgerissen</li> <li>• Revisionsanschrift fehlt, unvollständig, unleserlich</li> </ul>
<b>lauffähig</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rad <math>\varnothing &gt; 840</math> mm und Materialauftragungen mit einer Länge von &gt; 10 mm</li> <li>• Bremskupplungshalter nicht benutzbar</li> <li>• Lose Wagenbestandteile fehlen, nicht vollständig</li> </ul>

#### 4.2.2.2 Auswertung

Mit dem gewählten Bewertungsschema konnten mehr als 90 % (EVU1 98,7 %, EVU2 91,4 %, EVU1+EVU2= 98,3 %) aller Fehler der beiden EVUs ausgewertet werden. 1,3 % der Fehler von EVU1 und 8,6 % der Fehler von EVU2 konnten nicht zugeordnet werden. Anzumerken ist, dass 4,7% der nicht zuordenbaren Fehler von EVU2 noch vor Ort durch einen (wohl meist) mobilen Wagenmeister behoben werden konnten. Typische Schadbilder, welche vor Ort instandgesetzt werden können, sind zum Beispiel fehlende Splinte, lose Abhebesicherungen oder verschlissene Bremssohlen.

Wie die Auswertung (Abbildung 13) zeigt, ist der Hauptanteil 69 % bzw. 75,5 % der fehlerhaften Wagen noch bedingt lauffähig und kann so mindestens zum nächsten Bahnhof mit Werkstatt mitgeführt werden. Dies hat einen deutlich geringeren Aufwand zur Folge. Dies äußert sich vor allem darin, dass Ausrangierungen aus bereits gebildeten Wagenzügen nicht notwendig sind. Der Anteil der noch lauffähigen Wagen ist bei EVU1 mit 17 % mehr als doppelt so groß wie bei EVU2 mit 6,7%.



**Abbildung 13: Ableitung der Lauffähigkeit von Güterwagen auf der Basis von Schäden gefunden im Rahmen Wagentechnischen Untersuchung**

Der ausschlaggebende Anteil der nicht lauffähigen Wagen beträgt bei EVU1 mit 12,8 % und ist ebenfalls höher als bei EVU2 mit 9,2 %. Um eine Aussage über den Anteil dieser nicht lauffähigen Wagen zu tätigen, wird im Folgenden eine Abschätzung über die Gesamtheit der täglichen wagentechnischen Untersuchungen in Deutschland und der Schweiz getätigt.

Es wird angenommen, dass pro Tag in Deutschland und der Schweiz 50.000<sup>2</sup> Güterwagen untersucht werden. Dies entspricht 18.250.000 Wagen pro Jahr. Nimmt man zudem einen Durchschnitt von 30 Wagen pro Zug an und rechnet mit den 95.500 schadhafte Wagen pro Jahr aus 4.2, so lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Güterzuges ohne schadhafte Wagen mit der Binomialverteilung wie folgt berechnen:

$$g(x) = \frac{n!}{x! \cdot (n-x)!} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{30!}{0! \cdot (30-0)!} \cdot \left( \frac{95.500}{18.250.000} \right)^0 \cdot \left( 1 - \frac{95.500}{18.250.000} \right)^{30-0} \quad (2)$$

$$g(x) = 1 \cdot 1 \cdot \left( 1 - \frac{95.500}{18.250.000} \right)^{30} \quad (3)$$

$$g(x) = 85,4 \% \quad (4)$$

Mit den getroffenen Abschätzungen ergibt sich, dass 85,4 % der Güterzüge keinen Schadhafte Wagen besitzen. Im Umkehrschluss ist in 14,6 % aller Güterzüge mindestens ein beschädigter Wagen vorhanden. Der Anteil der Wagenzüge, an denen Aussetzungen vorgenommen werden müssen, beträgt circa 1,8 %.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Verteilung gemäß Annahme: 5000 in der Schweiz, 45000 in Deutschland

<sup>3</sup> Annahme: 11 % (Mittelwert EVU1+EVU2) aller schadhafte Wagen müssen ausgesetzt werden.

## 5. Instandhaltung in der Luftfahrt

### 5.1 Motivation

Im Folgenden soll die Entwicklung der Instandhaltung in der Luftfahrt dargestellt werden. Ein Vergleich der Eisenbahn mit der Luftfahrt erscheint auf den ersten Blick vielleicht unangemessen, da es einige deutliche Unterschiede zwischen den beiden Verkehrsträgern gibt. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass die Luftfahrt von allen Verkehrsträgern am ehesten mit der Eisenbahn vergleichbar ist.

Sowohl bei der Eisenbahn als auch bei der Luftfahrt handelt es sich um ein Verkehrssystem, das jeweils komplexe technische Subsysteme nutzt, die in einem sicherheitskritischen und unter hohem Wettbewerbsdruck stehenden Umfeld betrieben werden.

In beiden Fällen ist für das Erbringen einer Verkehrsleistung eine Vielzahl von Akteuren auf häufig internationaler Ebene einzubinden. Dies sind beispielsweise Infrastruktur- und Terminalbetreiber, Eisenbahn- bzw. Luftfahrtunternehmen, Instandhalter und Betreiber von weiteren Serviceeinrichtungen. Das Merkmal des Verkehrssystems tritt hier jeweils deutlich hervor.

Beide Systeme weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit von passender Infrastruktur auf. Bei der Eisenbahn sind dies beispielsweise die Spurführung, Lichtraumprofile und die Leit- und Sicherungstechnik, bei der Luftfahrt sind es zum Beispiel die Ausführung von Start-, Lande- und Rollbahnen, die Leittechnik und Kommunikation sowie die Treibstoffversorgung. Durch den internationalen Charakter der Verkehrssysteme (der jedoch bei der Luftfahrt noch viel stärker ausgeprägt ist) ist ein hoher Grad der Standardisierung der Schnittstellen von Fahrzeugen und Infrastruktur erforderlich. Dies ist ein großer Gegensatz zum Lastkraftwagen, der natürlich auch eine Abhängigkeit von der Infrastruktur aufweist, aber deutlich weniger technische Schnittstellen hat.

Eisenbahn und Luftfahrt operieren beide mit einem aufwändig erarbeiteten hohen Sicherheitsstandard. Durch potenziell hohe (katastrophale) Schadenauswirkungen von Fehlern im Einzelfall stehen beide Systeme unter einer hohen öffentlichen Erwartung und Wahrnehmung. In diesem Zusammenhang sind in beiden Fällen Zulassungs- und Betriebsprozesse in hohem Maße hoheitlich reglementiert.

Weitere Parallelen zwischen den beiden Verkehrsträgern finden sich bei den Stückzahlen der Fahrzeuge. Insbesondere beim Vergleich der Anzahl von Triebfahrzeugen mit der von Flugzeugen werden die ähnlichen Dimensionen deutlich. Triebfahrzeuge werden typischer Weise in Stückzahlen von einigen Dutzend bis zu wenigen Hundert beschafft, Flugzeuge häufig im Bereich von einigen Hundert bis zu wenigen Tausend (Summe über mehrere Luftverkehrsunternehmen). Im Gegensatz dazu werden LKW (und PKW) in Stückzahlen von mehreren Hunderttausend hergestellt, Schiffe hingegen sind Einzelstücke.

Auch die typische lange Nutzungsdauer von etwa 30 Jahren ist den beiden Verkehrssystemen Eisenbahn und Luftfahrt gemein. Abbildung 14 fasst die Parallelen der Verkehrssysteme zusammen.

Bahnfahrzeuge		Luftfahrzeuge
<b>Systemeigenschaften und Zulassungsinstanzen von Bahn- und Luftfahrzeugen im Vergleich</b>		
Spurführung Lichtraumprofil, Gleisgeometrie Fahrstrassen Zugfunk Signalanlagen Zugsicherung Bahnstromversorgung	<b>Infrastrukturkopplung</b>	(Aerodynamik) Pisten- und Rollwegabmessungen Luftfahrstrassen Flugfunk Funkfeuer Kollisionswarnsysteme (Treibstoffversorgung)
<b>Sicherheit</b>		
Hohe öffentliche Erwartung Hoher erreichter Stand Formale Zulassungs- und Betriebsprozesse Qualifiziertes, geschultes Personal Technische Hilfsmittel		
<b>Internationalität</b>		
Entwicklung: bald international, dann lange sehr stark national Verkehr heute: mehrheitlich regional/national		Entwicklung: sehr bald vor allem international Verkehr heute: überwiegend international
<b>Stückzahlen, Beispiele</b>		
Re 6/6: 89 BR 185: mehr als 500 Flirt, diverse Varianten: mehr als 1200 (Schiffe sind Einzelstücke, Autos Millionen)		SA 315B: 338 PC 12, diverse Varianten: mehr als 1500 A318, 319, 320, 321: mehr als 7700
<b>Lebensdauer</b>		
zirka 30 Jahre		
<b>Wettbewerbsdruck</b>		
Zwischen den Herstellern Zwischen den Betreibern Mit anderen Verkehrsträgern		

Abbildung 14: Systemvergleich Eisenbahn und Luftfahrt. Quelle [16] (gekürzt)

Der größte Unterschied beim Systemvergleich ist jedoch die Tatsache, dass in der Luftfahrt ein Flugzeug alleine eine Transportleistung erbringen kann. Bei der Eisenbahn hingegen sind zur Zugbildung eine Vielzahl weiterer Fahrzeuge erforderlich.

Neben den oben genannten Parallelen zwischen diesen beiden Verkehrsträgern gibt es noch einen weiteren Grund, warum die Instandhaltung in der Luftfahrt an dieser Stelle vorgestellt werden soll: Die Luftfahrt hat ihre Instandhaltung ausgehend von einem Prozess, der dem aktuellen Prozess der Bahn sehr ähnlich ist, heute vollständig anders organisiert. Die Motivation dahinter war nicht nur die Erhöhung der Sicherheit, sondern auch der Wirtschaftlichkeit.

Ein kurzer geschichtlicher Abriss soll daher im übernächsten Abschnitt den Weg zum heutigen Instandhaltungsprozess in der Luftfahrt verdeutlichen. Vorher soll jedoch kurz eingeordnet werden, warum überhaupt die Instandhaltung der Luftfahrt als Vergleich herangezogen wird, obwohl doch die vorliegende Studie nicht die Instandhaltung bei der Eisenbahn zum Thema hat, sondern die Wagentechnische Untersuchung.

Für alle folgenden Abschnitte zur Luftfahrt dienen [17] [18] [19] [20] und [21] als Quellen. Diese seien hier ausdrücklich zum vertieften Studium empfohlen.

## 5.2 Arten der Instandhaltung bei der Luftfahrt und Bezug zur WU

Die Betriebsfähigkeit von Luftfahrzeugen wird als *Lufttüchtigkeit* bezeichnet. Analog zu den Vorgaben beim Bahnbetrieb ist bei der Luftfahrt sicherzustellen, dass sich ein Flugzeug während des Betriebszeitraumes dauerhaft in einem *lufttüchtigen* Zustand befindet. Zur Überprüfung und Aufrechterhaltung dieses lufttüchtigen Zustands unterscheidet die Luftfahrt heute zwei Arten der Instandhaltung.

Die erste Art der Instandhaltung wird als *Base Maintenance* bezeichnet. Hierbei handelt es sich um große Instandsetzungen oder Überholungen die eine Woche oder länger dauern. Analog zum Begriff der schweren Instandhaltung bei der Bahn gibt es hier auch den Begriff der Heavy Maintenance.

Die zweite Art der Instandhaltung wird als *Line Maintenance* bezeichnet. Hierunter werden insbesondere alle Maßnahmen zusammengefasst, die der Bewahrung des Sollzustands dienen. Die Line Maintenance erfolgt mit einfachen Mitteln und erfordert keinen hohen Zerlegegrad des Luftfahrzeugs, keinen tiefen Eingriff in die Flugzeugstruktur und im Verhältnis zur Base Maintenance auch keine umfangreichen Prüfmaßnahmen. Die Line Maintenance umfasst alle Instandhaltungsaktivitäten im laufenden Betrieb, auch die unmittelbar vor einem Flug. Damit ist die Analogie der Wagentechnischen Untersuchung der Eisenbahn bei der Luftfahrt in der Line Maintenance zu suchen. Konkret ist bei der Luftfahrt also jede Inspektion ein Teil der Instandhaltung.

Neben Inspektionsaufgaben dient die Line Maintenance auch zur Durchführung von ungeplanten Maßnahmen zur Sicherstellung der Lufttüchtigkeit bis zur nächsten geplanten Instandhaltungsaktivität. Ein wichtiges Mittel dabei ist das Zurückstellen von Beanstandungen, die zwar von Crew oder Sensorik gemeldet wurden, aber für die Lufttüchtigkeit beim nächsten Flug keine Relevanz haben. Zur Beurteilung solcher Situationen dient die sogenannte *Minimum Equipment List*, die auflistet, welche Systeme in welcher Anzahl und Ausprägung verfügbar sein müssen, um die Lufttüchtigkeit zu gewährleisten. Auch gegenseitige Abhängigkeiten und Betriebseinschränkungen sind hier aufgeführt.

Zur Durchführung der Line Maintenance werden (nächtliche) Betriebspausen genutzt, soweit dies möglich ist. Sie wird direkt am Terminal, auf dem Vorfeld oder in einer Halle durchgeführt. Fester Bestandteil ist die Sichtprüfung von Fahrwerken, Triebwerken, Hauptsteuerteilen und Rumpf nach jedem Flug.

Die Flugzeuge melden Diagnosedaten über Funkt bereits vor Ankunft eines Flugzeuges. Zusätzlich führt die Crew der Flugzeuge ein Logbuch. Die Koordination der Aktivitäten geschieht in einem *Line Maintenance Control Center*. Dieses stellt die technische Schnittstelle zum Betreiber des Flugzeuges dar.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass Tanken, Innen- und Außenreinigung, Wasserver- und -entsorgung sowie das Enteisen nicht der Instandhaltung zugeordnet werden.

Nachdem dieser Abschnitt nun erläutert hat, warum die die Analogie der Wagentechnischen Untersuchung der bei der Luftfahrt in der Line Maintenance zu suchen ist, also in einem Teil der Instandhaltung, soll der folgende Abschnitt die geschichtliche Entwicklung der Instandhaltung bei der Luftfahrt aufzeigen.

### 5.3 Zeitliche Entwicklung der Instandhaltung bei der Luftfahrt

Zu Beginn der Luftfahrt in den 1920er bis 1940er Jahren war die Instandhaltung der Flugzeuge hauptsächlich auf die Erfahrung von Mechanikern und Piloten gestützt. Einen ersten Paradigmenwechsel gab es mit Beginn des Jet-Zeitalters etwa Ende der 1950er Jahre. In diesem Zuge wurden die heutigen Luftaufsichtsbehörden gegründet und die Instandhaltung wurde ingenieursseitig bereits beim Hersteller der Flugzeuge geplant. Die zunächst verwendete Philosophie sah dabei den Austausch von Komponenten bzw. eine Instandhaltung derselben nach festgelegten Intervallen vor. Diese Intervalle wurden als *Hard-Time-Limits (HT)* bezeichnet. Die festgelegten Intervalle konnten je nach Komponente in Flugstunden, Flugzyklen, Kalendertagen etc. definiert werden. Dieser Philosophie lag die Annahme zugrunde, dass die Zuverlässigkeit einer Komponente durch Abnutzung abnehme. Demnach müsse die Instandhaltung umso wirkungsvoller sein, je häufiger sie gemacht wird. Diese Methodik fußt auf Augenmaß und Vermutungen, nicht aber einer strukturierten Analyse.

Ende der 1950er, Anfang der 1960er Jahre wurden dann in größerem Umfang Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Diese zeigten, dass es bei 89 % der Flugzeugbestandteile keine Korrelation zwischen Einsatzdauer und Zuverlässigkeit gibt. Dies führte zur Abkehr von der „Viel-hilft-viel“-Philosophie und weckte das Bedürfnis, die gewonnenen Erfahrungen strukturiert in die Instandhaltungsplanung neuer Flugzeuge zu integrieren.

Mit Beginn der Entwicklung der Boeing 747 ab 1968 wurde daher erstmalig eine Methodik zur Erstellung von Instandhaltungsplänen genutzt, die in ähnlicher Weise zuvor schon bei den Apollo-Weltraummissionen genutzt wurde. Dazu wurde die „*Maintenance Steering Group 1st Task Force*“ (*MSG-1*) mit Mitgliedern von Betreibern/Betreiberverband und Herstellern gegründet. So wurde erstmals ein systematischer und allgemeingültiger Instandhaltungsplan erstellt. Diesen bezeichnet man als *Minimum Scheduled Maintenance Requirements*.

Die MSG-1-Logik sieht als elementaren Schritt eine Zuverlässigkeitsanalyse aller wichtigen Bauteile, Systeme und Strukturen eines Flugzeugs vor. Dazu werden Fehler-, Ausfall- und Abnutzungsraten ermittelt. Die Analyse der Komponenten geschieht jedoch unabhängig voneinander ohne Berücksichtigung des Einflusses auf das Gesamtsystem. Damit handelt es sich folglich um einen Bottom-up Ansatz. Neben den bereits bekannten Hard-Time-Limits kam ein zweiter grundsätzlicher Instandhaltungsprozess hinzu. Dieser als *On-Condition (OC)* bezeichnete Prozess sieht die regelmäßige Kontrolle gegen (physikalische) Limits vor. Ein Beispiel sind etwa *brake wear indicator pins* mit denen das Vorhandensein eines ausreichenden Verschleißvorrats (on-condition) der Bremsbeläge überprüft werden kann. Abbildung 15 zeigt das Zusammenwirken der beiden Instandhaltungsprozesse.

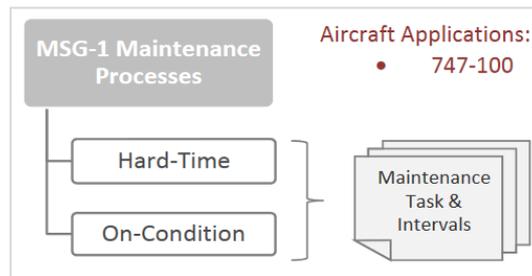


Abbildung 15: MSG-1-Logik [20]

Bereits 1970 erfolgte eine Überarbeitung der MSG-1-Logik, die noch stark auf die 747 zugeschnitten war, um eine einheitliche und universell anwendbare Methodik zu schaffen. Diese neue Logik wurde fortan als *MSG-2* bezeichnet. Die MSG-2-Logik wurde 1972 auch von Airbus aufgegriffen und später daraus der *European Maintenance System Guide (EMSG)* abgeleitet.

Sie sieht neben Hard-Time-Limits und On-Condition einen dritten grundsätzlichen Instandhaltungsprozess vor. Dieser wird als *Condition-Monitoring (CM)* bezeichnet. Das Condition-Monitoring umfasst keine geplanten Instandhaltungsmaßnahmen, sondern das Monitoring und die Analyse von Betriebsdaten (Vibrationen, Ölverbrauch, Abgastemperatur etc.). Mit Hilfe der Daten werden Trends gebildet und der „normale“ Betriebszustand definiert. Fehler dürfen beim Condition-Monitoring auftreten, solange ein Fehler keine direkten Sicherheitsauswirkungen hat. Abbildung 16 zeigt das Zusammenwirken der drei Instandhaltungsprozesse.

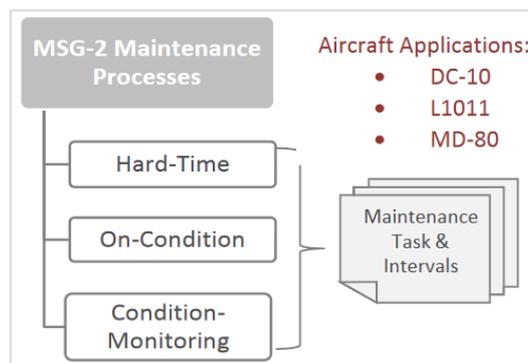


Abbildung 16: MSG-2-Logik. Quelle: [20]

1979 wurde seitens des amerikanischen Luftfahrtverbandes ersucht, die MSG-2-Logik weiterzuentwickeln. Hierfür gab es mehrere Gründe. So entschied die bestehende Logik beispielsweise nicht zwischen Instandhaltung aus Sicherheitsgründen und Instandhaltung aus wirtschaftlichen Gründen. Weiterhin wurde sie schwer handhabbar, weil viele Komponenten einzeln betrachtet werden mussten, und sie konnte nicht effektiv mit zunehmend komplexer werdende Flugzeugsystemen umgehen. Außerdem waren Anforderungen hinsichtlich Strukturfestigkeit, Ermüdungserscheinungen und Korrosion nicht abgedeckt. Im Zuge der Weiterentwicklung wurde der Kreis der Involvierten ausgedehnt. Beteiligt waren

fortan amerikanische und europäische Aufsichtsbehörden, Luftfahrtverbände, Flugzeug- und Triebwerkhersteller. Die bis heute gültige *MSG-3-Logik* wurde schließlich im Jahr 1980 definiert. Diese stellt erstmals nicht einen Fehler, sondern dessen Auswirkungen auf das System in den Mittelpunkt. Damit geschieht die Auswertung auf Systemebene und nicht auf Komponentenebene, womit es sich bei der MSG-3 um einen Top-Down Ansatz handelt. Gemäß der Motivation zur Weiterentwicklung der MSG-2 trägt die MSG-3 neben Sicherheitsaspekten auch verstärkt ökonomischen Notwendigkeiten Rechnung. Die MSG-3-Logik ist im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

#### **5.4 Aktuell genutzte MSG-3-Logik**

Das Ergebnis der MSG-3-Logik ist der *Maintenance Review Board Report (MRBR)*. Dies ist für alle Beteiligten ein zentrales und verbindliches Dokument für die Instandhaltung eines Flugzeugmusters. Die Steuerung und Überwachung des Prozesses zur Erstellung dieses Reports obliegt dem *Maintenance Review Board (MRB)*, bestehend aus Behördenvertretern, sowie dem *Industry Steering Committee (ISC)*, bestehend aus Herstellern, Zulieferern, Airlines und Instandhaltungsbetrieben. Der Prozess selbst findet in Arbeitsgruppen mit ausgewiesenen Experten der Hersteller, Zulieferer, Airlines und Instandhaltungsbetrieben von Luftfahrzeugen statt.

Sowohl MRB als auch ISC und die Arbeitsgruppen sind internationale Teams. Das MRB besteht aus Behördenvertretern verschiedener Nationen bzw. Einrichtungen. Durch die MSG-3-Logik hat sich auf internationaler Ebene eine Kultur der Zusammenarbeit etabliert. Abbildung 17 zeigt die Strukturen und Prozesse der MSG-3-Logik.

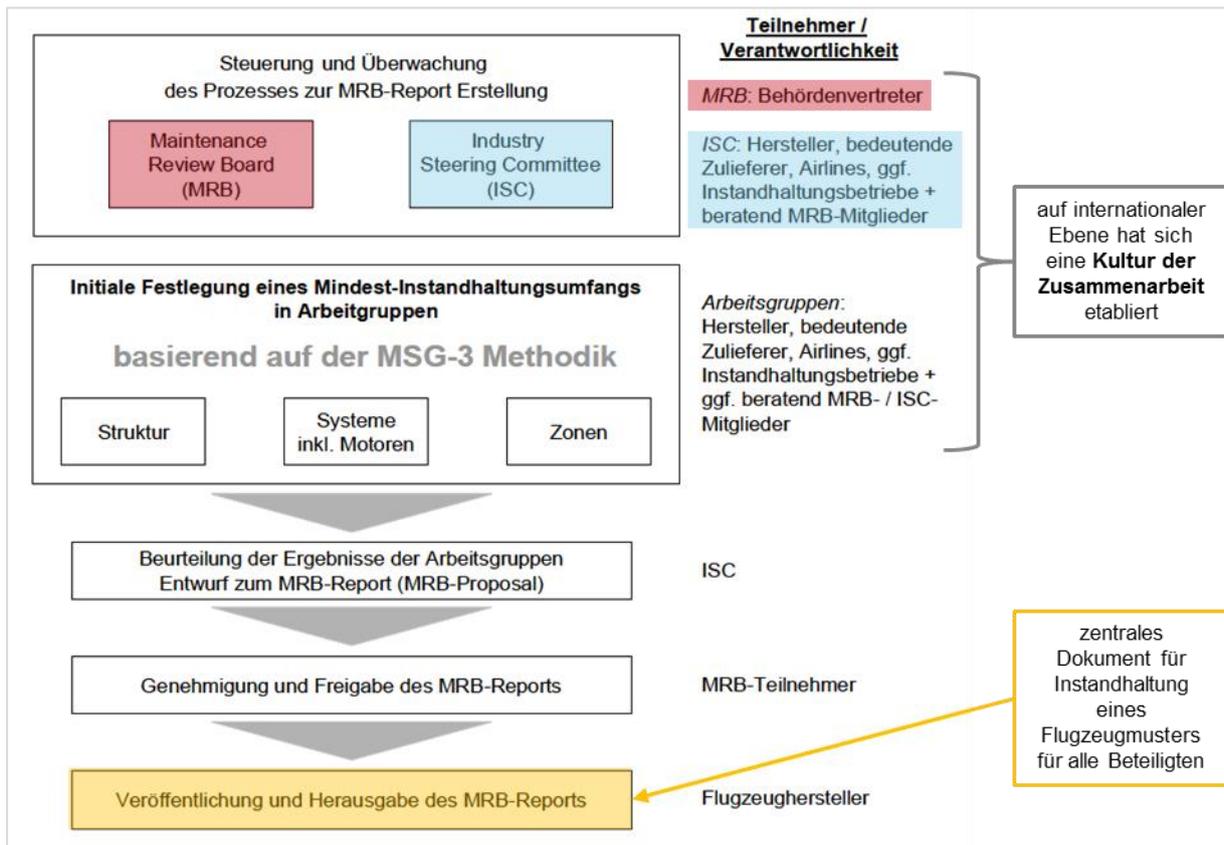


Abbildung 17: Strukturen und Prozesse im MSG-3-Prozess. Veränderte Darstellung von [21]

Basis der MSG-3-Logik ist eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Die Auswirkungen eines Fehlers auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit können somit bereits während der Entwicklung bestimmt werden. Das Vorgehen umfasst fünf wesentliche Schritte:

1. Benennung der wesentlichen Flugzeugbestandteile und deren Funktion; Definition des Normalzustands eines Untersuchungsgegenstands
2. Identifikation von funktionalen Fehlern
3. Ermittlung der Fehlerauswirkungen; Klassifizierung von Fehlern (sicherheitsrelevant, operationell relevant, ökonomisch relevant), Prüfung der Sichtbarkeit von Fehlern
4. Datenerhebung und Risikobewertung; theoretische oder tatsächliche Abnutzungsraten, (historische) Daten von ähnlichen Systemen im Betrieb, Testdaten, Simulationen, Erfahrungen und Schätzungen
5. Maßnahmen der Fehlervermeidung; Definition von Inspektionsintervallen, Inspektionsintensitäten, Tests, Wartungsmaßnahmen; Finden der wirtschaftlichsten Maßnahme, falls Risiko des Fehlers nicht gesenkt werden kann ist eine Entwicklungsänderung erforderlich

Für die Flugzeugstruktur wurde eine besondere Vorgehensweise definiert. Grund ist, dass hier Ermüdungserscheinungen, Korrosion und Unfallschäden relevanter sind als klassische Fehlfunktionen. Die Vorgehensweise sieht hier zunächst vor allem geplante Inspektionen (auch mit häufigeren Stichproben) vor. Die Instandhaltungsmaßnahmen werden dann in Umfang und Häufigkeit an die tatsächliche Schadensentwicklung auf Basis der gewonnenen Ergebnisse und Daten angepasst.

Ein besonderes Merkmal der MSG-3-Logik ist die *Aufgabenorientiertheit (task-orientation)*. Die drei bereits vorher genutzten Instandhaltungsprozesse Condition Monitoring, On-Condition und Hard-Time sind weiter enthalten. Zusätzlich werden für jeden Bestandteil aber konkrete IH-Aufgaben angewiesen. Diese Methodik gilt als „chirurgisch präzise“ und individueller als vorherige MSG-Methoden, gleichzeitig aber auch als flexibler und ist heute am weitesten verbreitet.

Früher war die gesamte Instandhaltung relativ statisch in Blöcke, sog. *Letter-Checks (A-Check, B-Check, C-Check, D-Check)* gegliedert, die vergleichbar mit den Instandhaltungs-Fristen von Güterwagen sind. Kennzeichen sind fest vorgeschriebene Bestandteile je Instandhaltungsstufe. Heute ist allerdings insbesondere für die *Line Maintenance* (alles unterhalb C-Checks) die aufgabenorientierte Instandhaltung relevanter, weil sie sich besser in Flugpläne integrieren lässt. Auf diese Weise lässt sich eine höhere Verfügbarkeit erzielen.

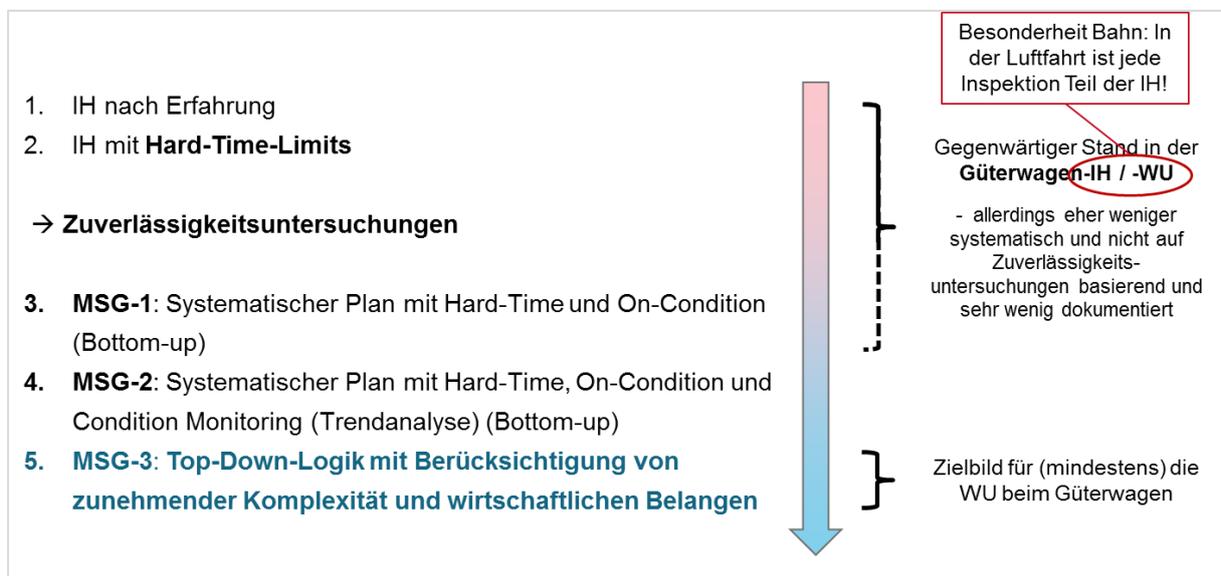
Die gesamte MSG-3-Logik ist nicht statisch, sondern wird stetig auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt. Auch der MRB-Report als zentrales Instandhaltungsdokument je Flugzeug wird kontinuierlich weiterentwickelt. Die Flugzeughersteller arbeiten mit Betreibern zusammen und sammeln Betriebs- und Instandhaltungsdaten, woraus Verbesserungspotenziale für die Instandhaltung abgeleitet werden. Der dafür erforderliche Datenaustausch ist prozessual fest vorgesehen. Durch die sehr hohe Standardisierung (ISO 9100ff) und Dokumentationspflicht bei der Luftfahrt ist das Sammeln von Daten jedoch auch einfacher als beispielsweise bei der Eisenbahn.

Alle zwölf bis 36 Monate findet ein Austausch über den aktuellen Stand und das Optimierungspotenzial bei der Instandhaltung eines Flugzeugmusters in Arbeitsgruppen mit Herstellern, Betreibern und Behörden statt. Im Rahmen dieses Austausches können Instandhaltungsaufgaben gelöscht, hinzugefügt oder in Intervall oder Intensität geändert werden. Damit wird die Instandhaltung im laufenden Betrieb sowohl sicherer als auch wirtschaftlicher. Die von vielen Airlines verfolgten *Reliability Programme* gehen sogar über das luftrechtlich notwendige Maß an Instandhaltung hinaus und zielen auf eine weitere ökonomische Optimierung ab.

Außerdem herrscht in der Luftfahrt eine ausgeprägte und strukturell vorgesehene Fehlerkultur. Betriebliches Wissen und sicherheitsrelevante Vorfälle werden so von unten nach oben (bottom-up) gemeldet. Erkenntnisse über das Zustandekommen eines Fehlers bzw. überhaupt dessen Existenz sind viel wichtiger als eine etwaige Sanktionierung.

## 5.5 Zusammenfassung und Transferansätze zur Bahn

Die historische Entwicklung der Instandhaltung bei der Luftfahrt, die in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben wurde, ist nochmals im linken Teil der Abbildung 18 wiedergegeben. Ausgehend von einer Instandhaltung nach Erfahrung wurde zunächst ein Instandhaltungskonzept mit festen Intervallen (Hard-Time-Limits) entwickelt. Anschließend durchgeführte Zuverlässigkeitsuntersuchungen zeigten jedoch, dass eine Korrelation zwischen Nutzungsdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit von 89 % der Flugzeugbestandteile nicht gegeben war. Daraufhin wurde die MSG-1-Logik als erster systematischer Plan mit Hard-Time und on-Condition Maintenance als Bottom-up-Prozess entwickelt. Die Weiterentwicklung zur MSG-2-Logik sah zusätzlich auch noch Trendanalysen in Form des Condition Monitorings vor. Bei der Weiterentwicklung zur heute noch genutzten MSG-3-Logik wurde der Bottom-up-Ansatz zugunsten eines Top-Down-Ansatzes verworfen. Die neue Logik berücksichtigt eine zunehmende Komplexität der Systeme sowie wirtschaftliche Belange.



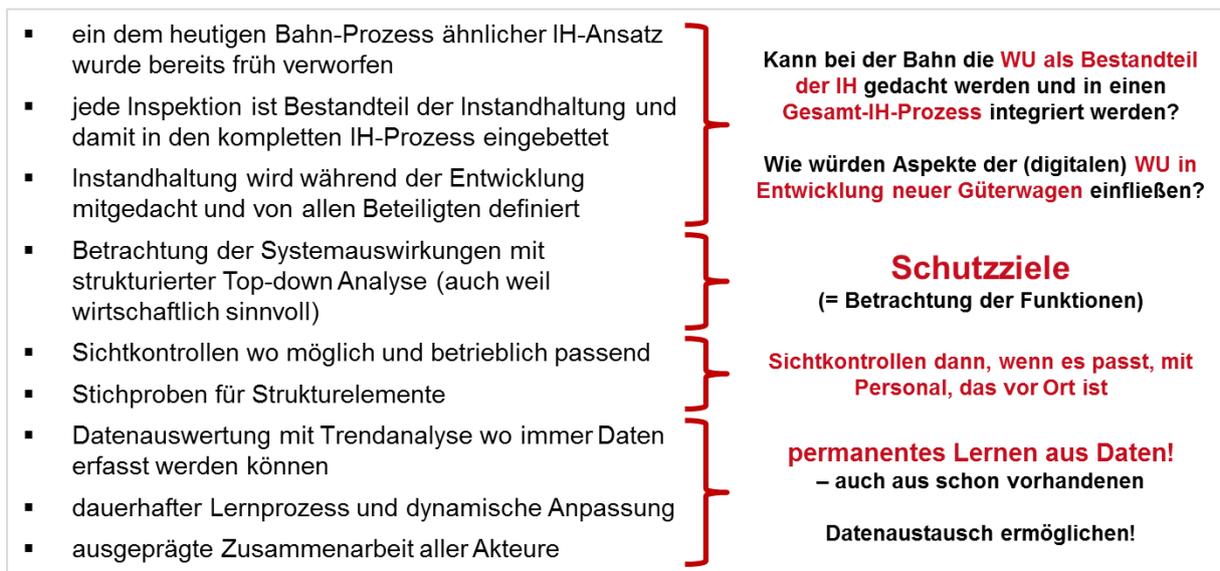
**Abbildung 18: Historische Entwicklung der Instandhaltung (IH) der Luftfahrt und Vergleich mit der WU**

Der rechte Teil der Abbildung 18 zeigt, wo die Güterwageninstandhaltung bzw. die Wagentechnische Untersuchung im Zeitstrahl einzuordnen sind. Zunächst ist auffällig, dass eine Unterscheidung zwischen der eigentlichen Instandhaltung und betrieblichen Inspektionen (WU) bei der Luftfahrt nicht vollzogen wird. In der Luftfahrt ist jede Inspektion Teil der Instandhaltung. Weiterhin fällt auf, dass die Güterwageninstandhaltung in ihrer heutigen Form stark der Flugzeuginstandhaltung mit Hard-Time-Limits ähnelt. Es finden sich bei der Güterbahn zwar auch Bereiche, wo On-Condition-Maintenance betrieben wird, es fehlen aber Zuverlässigkeitsuntersuchungen und bereits während der Fahrzeugentwicklung systematisch erstellte Instandhaltungspläne. Auch werden die heutigen Inspektionstätigkeiten wenig dokumentiert.

Die im Rahmen dieser Studie vorgestellten Schutzziele (vgl. 6.1) und die damit einhergehende Arbeitsrichtung von den Funktionen zu den Komponenten entsprechen in ihrer Logik eher dem Top-down-

Ansatz, der bei der MSG-3-Logik genutzt wird. Eine analoge Logik ist daher an dieser Stelle als mögliches Zielbild aufgeführt.

Ausgehend von der historischen Entwicklung bei der Luftfahrt, dem gegenwärtigen Stand bei der Eisenbahn und dem genannten Zielbild sind einige mögliche Transfers von Vorgehensweisen und Konzepten in Abbildung 19 wiedergegeben.



**Abbildung 19: Mögliche Transfers von Vorgehensweisen und Konzepten der Instandhaltung zwischen Luftfahrt und Eisenbahn**

Die Tatsache, dass die Luftfahrt ihre frühen Ansätze der Instandhaltung verworfen hat, heute bereits die Instandhaltung mit allen Beteiligten während der Entwicklung eines Flugzeuges definiert und später jede Inspektion als Teil der Instandhaltung betrachtet, führt zu zwei Fragen. Die erste ist, ob die betriebsnahen Inspektionen bei der Bahn in Form der Wagentechnischen Untersuchungen gesondert behandelt werden müssen, oder ob diese auch einem Gesamtinstandhaltungsprozess zugeordnet werden könnten. Die zweite Frage ist, wie Aspekte der (digitalen) WU in die Entwicklung neuer Güterwagen einfließen würden.

Die in der Luftfahrt genutzten Sichtkontrollen in Betriebspausen sowie insbesondere die Stichproben für Strukturelemente könnten in der Weise von der Bahn adaptiert werden, dass ohnehin anwesendes Personal bei gegebenen Gelegenheiten solche Kontrollen durchführt. Dies setzt allerdings eine deutlich umfangreichere Dokumentation der Inspektionen sowie einen entsprechenden Datenaustausch voraus. Dies ist aber ohnehin ein weiterer Transfer aus der Luftfahrt. Die Akteur übergreifende Datenauswertung mit Trendanalysen ermöglicht hier ein dauerhaftes Lernen mit ständiger Anpassung der Instandhaltungsvorgaben.

## 6. Schutzziele

In diesem Kapitel werden die Schutzziele, welche die Basis für die Technologiefindung darstellen, definiert, kategorisiert und letztlich festen physikalischen Größen zugeordnet. Zusätzlich wird basierend auf den Schutzziele ein Rückschluss auf Komponentenzustand, zur verbesserten Handhabung und Vollständigkeitskontrolle gegeben.

### 6.1 Schutzzieldefinition

Unter einem Schutzziel wird das angestrebte Ziel bzw. die zu erfüllende Funktion verstanden, die durch die Durchführung der WU und BP geprüft und sichergestellt wird. Für die Gewährleistung eines verkehrs- und betriebssicheren Zustandes der Fahrzeuge sind fahrzeugspezifische Vereinbarungen u.a. in der EBO getroffen worden. Vor der Erstinbetriebnahme eines Fahrzeuges wird durch die Aufsichtsbehörde bescheinigt, dass das Fahrzeug mit einem gesellschaftlich akzeptablen Risiko (in Funktion von Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß) verkehren kann.

Der AVV listet detailliert Wagenkomponenten und deren Prüfkriterien auf, die im Rahmen der WU und BP von einem WM begutachtet werden müssen.

Im Rahmen dieser Studie wurden die Schutzziele aus den elementaren Funktionen eines Güterwagens abgeleitet. Das Schutzziel gibt die Hauptfunktion an, die die wesentlichen Baugruppen und deren Anbauteile erfüllen müssen. Die Abbildung 20 fasst die Haupt- und Unterschutzziele der WU und BP zusammen.

Führung des Fahrzeuges im Gleis	Verzögerungsverhalten	Zugbildung ermöglichen	Verfügbarkeit des Transportgefäßes	Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte	Sicherstellung des Bremsweges	Medien verbinden	Be-Entladbarkeit	Bedienbarkeit während des Rangierens
Schwingungsverhalten	Halten der Geschwindigkeit	Schwingungsverhalten in Längsrichtung	Transportsicherung	Wagenidentifikation
	Schutz des Laufwerkes	Stoßverhalten in Längsrichtung	Profolfreiheit	Information zu Beladungsmöglichkeiten\Nutzungeinschränkungen
	Festlegen des Fahrzeuges		Schutz vor elektrischem Schlag	
	Indirekte Bremswirkung gewährleisten		Funkenschutz	

Abbildung 20: Haupt- und Unterschutzziele der Wagentechnischen Untersuchung und der Bremsprobe

Im SGV können die folgenden fünf Hauptschutzziele definiert werden:

#### 1. Führung des Fahrzeuges im Gleis

Die Güterwagen müssen sicher im Gleis geführt werden. Dafür müssen die Vertikal- und Querkräfte sicher übertragen werden und die Kenngrößen der dabei resultierenden Schwingungen müssen in

dem vereinbarten ertragbaren Bereich liegen. Das umfasst die Entgleisungssicherheit mit und damit auch Vertikalkraftunterschiede rechte/linke Fahrzeugseite.

## 2. Verzögerungsverhalten

Das Bremssystem muss so konzipiert und ausgelegt werden, dass der maximale Bremsweg sichergestellt wird, dass bei Talfahrten eine konstante Geschwindigkeit gehalten werden kann, dass der Schutz des Laufwerkes (Überhitzung, übermäßiger Verschleiß) und die indirekte Bremswirkung gewährleistet sind. Im Stillstand muss der Zug gegen Entlaufen gesichert werden können (letzteres nur Wagen mit Handbremse).

## 3. Zugbildung ermöglichen

Die Bildung der Güterwagen zu einem Zug muss möglich sein. Der Federapparat der Zug- und Stoßeinrichtung muss in der Lage sein, Kräfte und Stöße in Längsrichtung aufzunehmen und zu dämpfen. Zudem muss Kuppelbarkeit (mechanisch und pneumatisch, zukünftig vielleicht auch elektrisch) geometrisch möglich sein.

## 4. Verfügbarkeit des Transportgefäßes

Hinter diesem Schutzziel verbirgt sich im Wesentlichen der Zustand des Wagenkastens. Zum einen bezieht sich dies auf die Nutzbarkeit des Wagenkastens für den eigentlichen Transportzweck. Zum anderen verbirgt sich dahinter auch die Profilverfreiheit, der Funkenschutz und die Erdung. Ein ebenso wichtiger Aspekt des Schutzziels ist die Ladungssicherung.

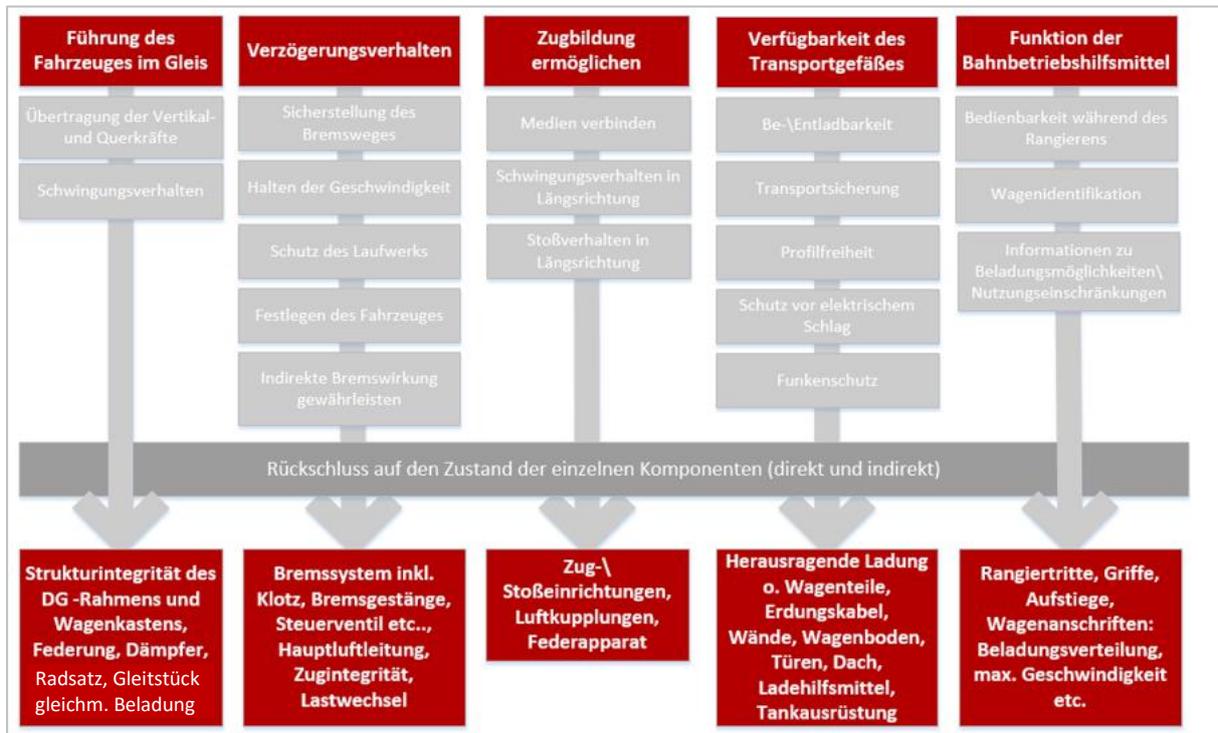
## 5. Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel

Für die Produktion und den Bahnbetrieb sind Hilfsmittel wie Tritte und Griffe sowie Wagenanschriften zur Identifikation, Beladungsmöglichkeiten etc. erforderlich.

## **6.2 Rückschluss auf Komponentenzustand**

Der in dieser Studie gewählte Ansatz, nämlich der Prüfung von Funktionen, steht im Kontrast zu den heutigen Verfahren der Zugvorbereitung. Heutzutage wird, abgesehen von der Bremse, fast ausschließlich eine Prüfung der Einzelkomponenten durchgeführt. Dabei werden der Radsatz, die Federung, der Wagenkasten etc. optisch begutachtet und im Gutfall auf den funktionsfähigen Zustand der Komponenten geschlossen. Dies ist ein „Bottom-up“ Ansatz. Die vorgestellten Schutzziele gehen dagegen mit einem „Top-down“ Ansatz einher und sichern die Funktionsfähigkeit eines Teilsystems ab, ohne die Komponenten einzeln zu überwachen. Dies bedeutet, dass sobald ein Schutzziel erfüllt ist, sich alle Komponenten, die sich hinter einem Schutzziel verbergen, in einem funktionierenden Zustand befinden. In der Abbildung 21 sind die Rückschlussmöglichkeiten von den Schutzzielen auf Komponentenebene zusammen gefasst. Während die ersten 3 Schutzzielkategorien (Führung des Fahrzeuges im Gleis,

Verzögerungsverhalten und Zugbildung ermöglichen) im Wesentlichen die Funktionen der Hauptbaugruppen (Laufwerk, Bremse, etc.) eines Güterwagens technisch widerspiegeln, zielen die verbliebenen Schutzziele auf die Beladung, die Wagenidentifikation und die Rangierbarkeit ab.



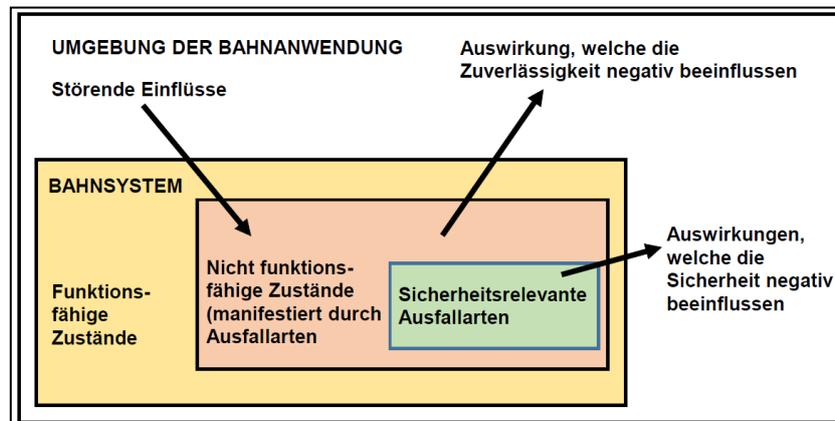
**Abbildung 21: Rückschlussmöglichkeiten ausgehend von den Schutzziele auf den Zustand von Einzelkomponenten eines Güterwagens**

Zu beachten ist an dieser Stelle, dass diese Aussage nicht umgekehrt gilt, da ein aus diversen Gründen nicht erfülltes Schutzziel nicht zwangsläufig direkt einem Defekt einer einzelnen Komponente zugeordnet werden kann. Dies ist aber vermutlich in vielen Fällen durch eine Identifikation von charakteristischen Fehlerausprägungen möglich. Datenhaltung und ein entsprechender Lerneffekt sind dafür die Voraussetzung.

### 6.3 Kategorisierung

In diesem Kapitel werden die Schutzziele kategorisiert. Damit kann in Analogie zum Fehlerkatalog des AVV eine einheitliche und transparente Beurteilung der Schutzziele bezüglich der Folgen bei Nichterfüllung erfolgen. Zudem hilft dies bei der Beurteilung der Fälligkeit der Schutzzielprüfungen (siehe Abschnitt 8). Die Beurteilung erfolgt in Anlehnung an die DIN 50126:2000 welche für RAMS im Bahnwesen gilt. Aus der Norm geht unter anderem hervor, dass die zentralen Ziele des Bahnwesen Zuverlässigkeit und Sicherheit sind. Zuverlässigkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, der Funktionserfüllung einer Einheit über einen bestimmten Zeitraum und Sicherheit das Nichtvorhandensein von unzulässigen Risiken, beides unter definierten Randbedingungen. Es gilt dabei grundsätzlich, dass es keine Zuverlässigkeit

ohne ausreichende Sicherheit geben kann, aber Sicherheit ohne Zuverlässigkeit möglich ist. In der folgenden Abbildung ist dies nochmals verdeutlicht.

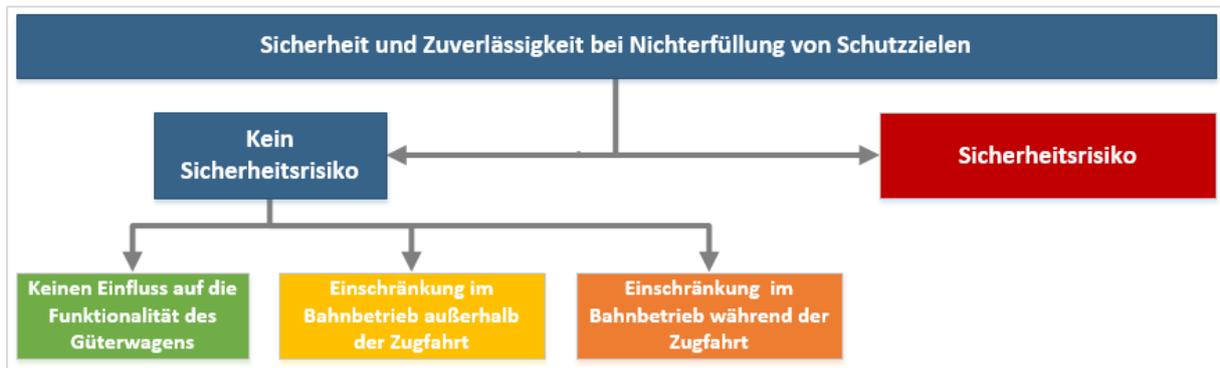


**Abbildung 22: Zusammenspiel von Sicherheit und Zuverlässigkeit angelehnt an DIN EN 50126 für RAMS im Bahnwesen**

Für die Bewertung der Schutzziele wurden die folgenden Kategorien gebildet:

- Sicherheitsrisiko
- Kein Sicherheitsrisiko:
  - Kein Einfluss auf die Funktionalität des Güterwagens
  - Einschränkung auf den Bahnbetrieb außerhalb der Zugfahrt
  - Einschränkung auf den Bahnbetrieb während der Zugfahrt

Für sicherheitsrelevante Schutzziele wurden keine Unterkategorien gebildet. Sobald ein Schutzziel als sicherheitsrelevant gilt und dieses nicht erfüllt ist, darf der Wagen\Wagenverband nicht verkehren. Nicht sicherheitsrelevante Schutzziele werden zusätzlich nach den Einschränkungen während oder außerhalb der Zugfahrt kategorisiert, damit ein Wagen\Wagenverband stufenweise bewertet werden kann und eine Weiterfahrt im Bedarfsfall trotzdem ermöglicht wird. In der folgenden Abbildung sind die genannten Kategorien zur „Sicherheit und Zuverlässigkeit bei Nichterfüllung der Schutzziele“ dargestellt. Beim Versuch der Zuordnung zeigte sich, dass alle Schutzziele bei Nichterfüllung auf nur zwei Kategorien entfallen. Das Schutzziel hat dann entweder einen „Einschränkung auf den Bahnbetrieb außerhalb der Zugfahrt“, wie zum Beispiel, wenn die Be-Entladbarkeit nicht gewährleistet ist oder es herrscht ein Sicherheitsrisiko, wenn zum Beispiel die Führung des Fahrzeuges im Gleis nicht mehr gewährleistet ist. Während die Einordnung für diese beiden genannten Schutzziele trivial ist, hängt es bei anderen Schutzziele von der Ausprägung des Fehlers ab. Viele Fehler können bei extremer Ausprägung zum Sicherheitsrisiko werden, deshalb ist eine feinere Abstufung notwendig. Ein Beispiel ist die Sicherstellung des Bremsweges, der auch noch gewährleistet ist, wenn einzelne Wagen nicht bremsen können, das bekannt ist und bei der Bremsberechnung entsprechend berücksichtigt wird. Unter Umständen muss die Höchstgeschwindigkeit des Zuges in einem solchen Fall reduziert werden.



**Abbildung 23: Überblick über die Kategorien für den Umgang mit den Schutzziele bei Nichterfüllung**

Im Folgenden wurde dann unterschieden, ob das Schutzziel eine wagenscharfe oder eine zugscharfe Betrachtung erfordert. Wagenscharf meint, dass sobald ein einzelner Wagen das Schutzziel nicht erfüllt, entstehen die jeweiligen Folgen der Einstufung.

Bei einer zugscharfen Betrachtung hingegen ist das Schutzziel wagenübergreifend auf den gesamten Zugverband bezogen. Die Nichterfüllung durch einen Wagen hat nicht zwangsläufig Folgen für den Bahnbetrieb. In der Tabelle 8 sind alle Schutzziele entsprechend der genannten Kategorien eigeordnet. Die wagenscharfe beziehungsweise zugscharfe Betrachtung ist durch ein **X** beziehungsweise durch **XX** gekennzeichnet. Anzumerken ist, dass das Schutzziel Gefahrguterkenntung, welches sich prinzipiell unter dem Schutzziel „Informationen zu Beladungs- und Nutzungsmöglichkeiten“ verbirgt, hinzugefügt wurde. Eine Einstufung als „Sicherheitsrisiko“ gilt immer auch als „Einschränkung auf den Bahnbetrieb während der Zugfahrt“, nicht aber grundsätzlich als „Einschränkung auf den Bahnbetrieb außerhalb der Zugfahrt“, da ein sicherheitsrelevantes Schutzziel für eine Zugfahrt immer erfüllt sein muss. Rangiert werden kann beispielsweise bei einer Nichterfüllung des Schutzzieles „Indirekte Bremswirkung gewährleisten“ in den meisten Fällen weiterhin.

Tabelle 8: Überblick der kategorisierten Schutzziele

Schutzziel\schützenswerte Funktion	Sicherheitsrisiko	Einschränkung im Bahnbetrieb während der Zugfahrt	Einschränkung im Bahnbetrieb außerhalb der Zugfahrt
<b>Führung des Fahrzeuges im Gleis</b>			
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte	X	X	X
Schwingungsverhalten	X	X	X
<b>Verzögerungsverhalten</b>			
Sicherstellung des Bremsweges	XX	XX	X*
Halten der Geschwindigkeit	XX	XX	X*
Schutz des Laufwerks	X	X	
Festlegen des Fahrzeuges			X
Indirekte Bremswirkung gewährleisten	X	X	X*
<b>Zugbildung ermöglichen</b>			
Medien verbinden		X	X*
Schwingungsverhalten in Längsrichtung	X	X	X
(Auflauf-) Stoßverhalten in Längsrichtung			X
<b>Verfügbarkeit des Transportgefäßes</b>			
Be-\Entladbarkeit			X
Transportsicherung	X	X	X
Profolfreiheit	X	X	X
Schutz vor elektrischem Schlag	X	X	X
Funkenschutz	X	X	
<b>Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel</b>			
Bedienbarkeit während des Rangierens			X
Wagenidentifikation		(X)	X
Information zu Beladungsmöglichkeiten\Nutzungseinschränkungen			X
Gefahrgutkennzeichnung	X	X	X

**Sensibilität wagenscharf X und zugscharf XX; X\* nur falls mit indirekter Bremse rangiert wird**

Aus der Tabelle 8 geht hervor, dass mit 16 von 19 Schutzzielen ein Großteil der Schutzziele wagenscharf zu bewerten ist. Eine zugscharfe Bewertung ist nur bei den Schutzzielen innerhalb der Gruppe Verzögerungsverhalten möglich. Dies gilt für die 3 Schutzziele Sicherstellung des Bremsweges, Halten der Geschwindigkeit und Festlegen des Fahrzeuges.

### **Sicherheitsrelevante Schutzziele**

Zudem sind 12 Schutzziele sicherheitsrelevant und müssen folglich immer erfüllt sein. Zu diesen gehören unter anderem alle Unterschutzziele von der „Führung des Fahrzeuges im Gleis“, denn diese gehen direkt mit der Entgleisungssicherheit des Fahrzeuges einher. Bezüglich der „Verfügbarkeit des Transportgefäßes“ sind bis auf die Be-\Entladbarkeit ebenso so alle sicherheitsrelevant. Transportsicherung, die Einhaltung des Fahrzeugumgrenzungsprofils (Profolfreiheit) sowie der Funkenschutz sind essentiell

für die Sicherheit. Letzteres meint nicht das generelle Vorhandensein von Funkenschutzblechen, sondern nur, dass diese bei Bremssystemen mit expliziter Funkenfluggefahr (Graugusssohlen) vorhanden sein müssen. Bei Kunststoffsohlen oder Scheibenbremsen gilt dieses Schutzziel, aufgrund der nicht vorhandenen Funkenneigung natürlich als erfüllt. Das Vorhandensein einer Gefahrgutkennzeichnung ist ebenso als sicherheitsrelevant eingestuft worden. Hintergrund ist hierbei, das Gefahrgutwagen betrieblich oder in Notfällen wie zum Beispiel bei Bränden, einer besondere Handhabung bedürfen.

### ***Einschränkungen während der Zugfahrt***

Die drei Schutzziele „Medien verbinden“, „Festlegen des Fahrzeuges“ und „Wagenidentifikation“ führen während der Zugfahrt zu Einschränkungen. Das Schutzziel „Medien verbinden“ wurde an dieser Stelle nicht als sicherheitsrelevant betrachtet, da es mehr auf die Verbindung sekundären Medien wie zum Beispiel Hilfsbehälterleitung oder Zugsammelschiene abzielt. Sobald die Bremskupplung nicht korrekt verbunden wäre, wäre das sicherheitsrelevante Schutzziel „Indirekte Bremswirkung gewährleisten“ nicht erfüllt. Das Schutzziel „Wagenidentifikation“ hat nur für die Rangierfahrt generell Folgen. Für Zugfahrt ist es für den letzten Wagen wichtig, zukünftig wohl auch für ortsfeste Diagnoseanlagen am Streckengleis. Der letzte Wagen ist bei der Erstellung des Bremszettels und einer eventuell betrieblich notwendigen Zugvollständigkeitskontrolle von Bedeutung.

### ***Einschränkungen außerhalb der Zugfahrt***

Die folgenden 4 Schutzziele sind nur außerhalb der Zugfahrt von Bedeutung

- Be-\Entladbarkeit
- (Auflauf-) Stoßverhalten in Längsrichtung
- Bedienbarkeit während des Rangierens
- Information zu Beladungsmöglichkeiten\Nutzungseinschränkungen

## **6.4 Physikalische Größen**

Für eine Bewertung der Erfüllung oder Nichterfüllung der Schutzziele sind physikalische Größen essentiell. Unter anderem auf der Basis dieser Größen können dann Grenzwerte sowie Technologien zur Diagnose ausgewählt werden. In den folgenden zwei Tabellen sind alle Schutzziele und die zugeordneten physikalischen Größen zusammengefasst. Neben den direkten physikalischen Größen, welche unmittelbar mit dem Schutzziel verknüpft sind, sind die Zuordnungen durch indirekte physikalische Größe ergänzt. Dies hat vor allem den Vorteil, dass durch die größere Vielfalt mehrere potentielle Technologien zur Verfügung stehen. Aus diversen Gründen<sup>4</sup> ist es zudem manchmal besser, über Umwege einen Zustand zu detektieren als die direkte physikalische Größe zu nutzen. Ein exemplarisches Beispiel ist die Lagerüberwachung. Heutzutage wird dies bereits indirekt getätigt, indem die Temperatur und nicht das Schwingungsverhalten des Lagers überwacht wird. Die physikalischen Größen für die

---

<sup>4</sup> Mehr Informationen siehe Abschnitt 7

---

weitestgehend beladungsunabhängigen Schutzziele, der „Führung des Fahrzeuges im Gleis“, „Verzögerungsverhalten“ sowie „Zugbildung ermöglichen“ (Schutzzielgruppen 1 – 3) sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

**Tabelle 9: Schutzzielgruppen 1 bis 3, deren direkte und indirekte physikalische Größen sowie exemplarische Schadensbeispiele**

Schutzziel\ schützenswerte Funktion	Beispiel	Physikalische Größe direkt	Physikalische Größe indirekt
<b>Führung des Fahrzeuges im Gleis</b>			
<b>Übertragung der Vertikal- und Querkräfte</b>	Unzureichende Aufstandskräfte wegen Primärfederbruch, Strukturintegrität, Flachstelle, Ladungsverschiebung	Vertikal- und Querkräfte am Rad oder am Gleis	Beschleunigungen im Laufwerk
	Lagerschaden	Beschleunigungen im Laufwerk	Temperatur, akustisch
<b>Schwingungsverhalten</b>	Instabiler Fahrzeuglauf durch schlechtes Radprofil	Beschleunigungen im Laufwerk oder Y und Q am Gleis	-
<b>Verzögerungsverhalten</b>			
<b>Sicherstellung des Bremsweges</b>	Keine Bremswirkung durch defektes Bremsgestänge	Verzögerung des einzelnen Fahrzeugs /wirkende Reibkraft	Bremszylinderdruck, Kraft im Gestänge
<b>Halten der Geschwindigkeit</b>	Keine Bremswirkung durch defektes Bremsgestänge	Verzögerung des einzelnen Fahrzeugs /wirkende Reibkraft	Bremszylinderdruck, Kraft im Gestänge
<b>Schutz des Laufwerks</b>	Thermische Überlastung des Rades durch Bremse	Temperatur der Radscheiben	-
	Fehlender\Verschlissener\Defekter Klotz	Dicke der Bremssohle	-
	Feste Bremse	wirkendes Reibmoment	Bremszylinderdruck, Kraft im Gestänge
<b>Festlegen des Fahrzeuges</b>	Feststellbremse defekt	Festhaltekraft	Kraft im Gestänge
<b>Indirekte Bremswirkung gewährleisten</b>	HLL geht nicht durch	Druckveränderung am letzten Fzg (Absenkung und Steigerung)	-
<b>Zugbildung ermöglichen</b>			
<b>Medien verbinden</b>	Luftkupplung oder E-kupplung nicht in Ordnung	Durchgang der Medien eingeschränkt (Druckabfall)	-
<b>Schwingungsverhalten in Längsrichtung</b>	Pufferstößel verklemmt	Beschleunigung des Wagenkastens	Pufferwege, Kräfte an der Struktur
	Kupplungsabriss\ungekuppelt	Beschleunigung des Wagenkastens	HLL Druck fällt ab
	Schraubenkupplung langgemacht	Beschleunigung des Wagenkastens	-
<b>Auflaufstoßverhalten in Längsrichtung</b>	Pufferteller deformiert	Pufferwege, Kräfte an der Struktur	Beschleunigung des Wagenkastens, ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung

In der Tabelle 10 sind die physikalischen Größen der restlichen Schutzziele, nämlich „Verfügbarkeit des Transportgefäßes“ und „Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel“ zusammengefasst.

**Tabelle 10: Schutzzielgruppen 4 und 5, deren direkte und indirekte physikalische Größen sowie exemplarische Schadensbeispiele**

Schutzziel\ schützenswerte Funktion	Beispiel	Physikalische Größe direkt	Physikalische Größe indirekt
<b>Verfügbarkeit des Transportgefäßes</b>			
<b>Be-Entladbarkeit</b>	Ladetür klemmt	ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung	-
<b>Transportsicherung</b>	Ladung ungleichmäßig	T-Druck, Q-Kraft, Lage-sensor	-
	Offene Luke	"Verschluss"-Sensor	-
<b>Profilfreiheit</b>	Ladung ragt ins Profil\Rungen verbogen	Abstandsmessung optisch, mechanisch	-
<b>Schutz vor elektrischem Schlag</b>	Erdungskabel abgerissen	Widerstand	ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung
<b>Funkenschutz</b>	Funkenbleche fehlen und es besteht Funkengefahr (Grauguss plus Holzbo-den)	-	-
<b>Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel</b>			
<b>Bedienbarkeit während des Rangierens</b>	Rangiertritt verbogen	ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung	-
<b>Wagenidentifikation</b>	Wagennummer nicht lesbar	RFID, NFC, QR Codes, optische Systeme	-
<b>Information zu Beladungsmöglichkeiten\Nutzungseinschränkungen</b>	Anschriften nicht lesbar	RFID, NFC, QR Codes, optische Systeme	-

---

## 7. Technologiefindung

### 7.1 Möglichkeiten zur Technologie- und Strategiefindung

Die für die Digitalisierung der WU genutzten Technologien sowie die sich anschließende Auswertestrategie dienen der Beantwortung der Frage: „Sind alle Schutzziele erfüllt?“ Für jedes einzelne Schutzziel kann diese Frage eindeutig mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden. Der zur Beantwortung dieser Frage zu beschreitende Weg ist jedoch nicht eindeutig festgelegt, sondern abhängig von der Wahl der auszuwertenden physikalischen Größen, Art und Umfang der verbleibenden manuellen Inspektion, dem Vorhandensein eines Sicherheitsmanagementsystems bei der Instandhaltung, den nutzbaren Technologien und nicht zuletzt durch Merkmale, Trends und Grenzwerte.

Die physikalischen Größen sind dabei die späteren Messgrößen, beispielsweise die Beschleunigungen im Radsatzlager. Die Technologien erfassen die Messwerte mit der erforderlichen Genauigkeit und in der erforderlichen Häufigkeit. Merkmale, Trends und Grenzwerte liefern schließlich die Entscheidung darüber, ob ein Schutzziel erreicht ist oder nicht. Es könnte sich dabei beispielsweise um ein bestimmtes Schwingungsmuster im Beschleunigungssignal handeln, um einen Zuwachs der Schwingungsamplituden um 10 % innerhalb von einer Woche oder um das einmalige Überschreiten einer Beschleunigung von 12,5 m/s<sup>2</sup>.

Das Sicherheitsmanagementsystem in der Instandhaltung meint einen Ansatz wie er heute beispielsweise bei Radsatzwellen angewendet wird. Radsatzwellen werden im laufenden Betrieb der Güterwagen nicht aufwändig untersucht, auch wenn dies zum Beispiel mit Ultraschallgeräten grundsätzlich möglich wäre. Stattdessen wird durch den Fertigungsprozess und umfangreiche Prüf- und Zulassungsverfahren inkl. Dokumentation und Rückverfolgbarkeit sichergestellt, dass die Radsatzwellen den Beanspruchungen durch den Betrieb über eine gewisse Zeit standhalten können. Nach Ablauf dieser Zeitspanne schließen sich wieder umfangreiche Prüfungen an. Bei positivem Ergebnis können die Radsatzwellen erneut für einen definierten Zeitraum ohne großen Instandhaltungsaufwand eingesetzt werden. Eine solche Vorgehensweise wäre durchaus auch für andere Komponenten des Güterwagens denkbar.

Viele der vorstehend genannten Einflussgrößen bedingen sich bei der Technologie- und Strategiefindung gegenseitig. Abbildung 24 zeigt die Interaktion der genannten Einflussgrößen.

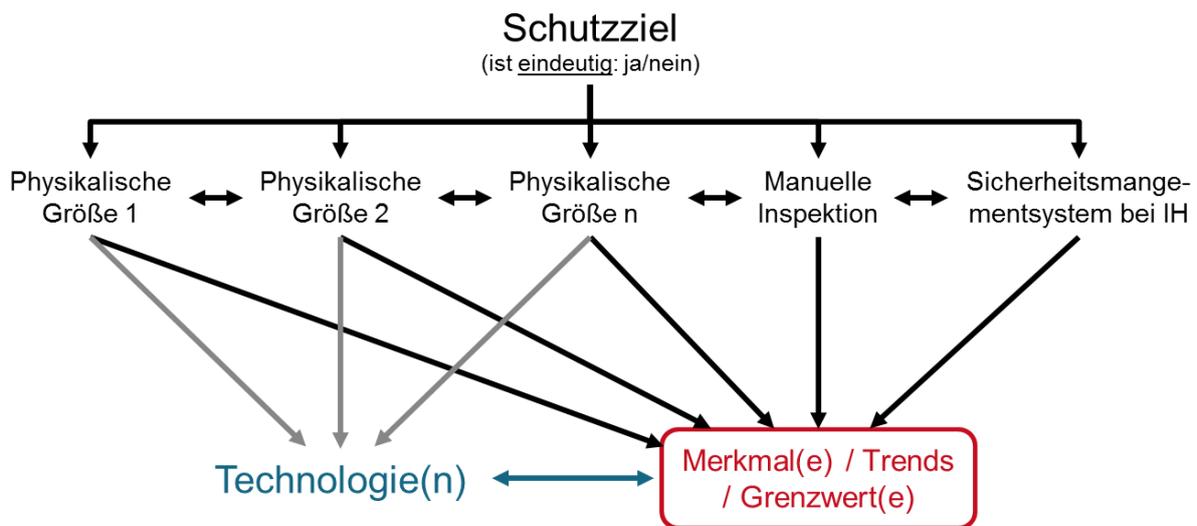


Abbildung 24: Einflussgrößen bei der Technologie- und Strategiefindung

Ein möglicher Weg zur Findung einer Technologie/Strategie wäre nun im ersten Schritt das Festlegen einer physikalischen Größe, die definitiv für die Auswertung herangezogen werden soll. Ausgehend von dieser Größe könnte eine Technologie ausgewählt werden, die diese Größe messen kann. Abschließend würden auf diese Größe und Technologie zugeschnittene Merkmale, Trends oder Grenzwerte definiert, die schließlich die über die Beantwortung der Frage „Ist das Schutzziel erfüllt“ entscheiden. Dieser Weg ist in Abbildung 25 gelb dargestellt.

Eine andere Möglichkeit wäre, zunächst wieder eine geeignete physikalische Größe zu identifizieren, anschließend Merkmale, Trends oder Grenzwerte zu definieren und davon ausgehend auf eine Technologie zu schließen. Dieser Fall ergibt sich beispielsweise, wenn bei der Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten festgestellt wird, dass die Messgröße kontinuierlich erfasst werden muss. Damit würde eine ortsfeste Messung als mögliche Technologie entfallen. Dieser Weg ist in Abbildung 25 in grün dargestellt.

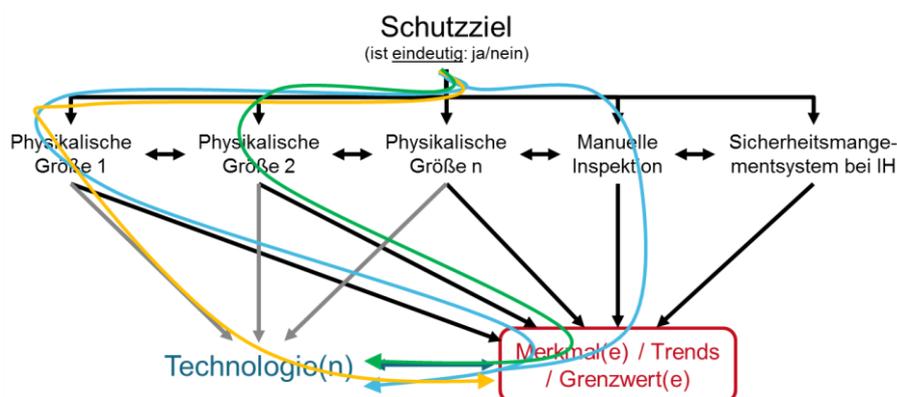


Abbildung 25: Mögliche Wege bei der Technologie- und Strategiefindung

Eine dritte Möglichkeit, die in Abbildung 25 in blau dargestellt ist, verbindet die Erfassung einer physikalischen Größe mit der manuellen Inspektion. Hier ist zum Beispiel der Fall denkbar, dass Art und Umfang der manuellen Inspektion über das erforderliche Maß an Messgrößenerfassung und -auswertung und damit auch über die zu verwendende Technologie/Strategie entscheiden.

In ähnlicher Weise sind noch zahlreiche weitere mögliche Kombinationen der Einflussgrößen bei der Technologie- und Strategiefindung denkbar. Auch Rückwirkungen sind möglich. So könnte zum Beispiel die zur Messung einer Größe erforderliche Technologie, bzw. das Verfahren zur Erzeugung von Merkmalen, Trends oder Grenzwerten für diese Größe so aufwändig sein, dass die physikalische Größe verworfen wird.

Wichtig festzuhalten ist jedoch, dass die Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten zur Beantwortung der Frage „Ist das Schutzziel erfüllt?“ essenziell für die Technologie- und Strategiefindung ist. Gleichzeitig ist hier aber gegenwärtig sehr wenig Wissen vorhanden.

Momentan ist das „normale“ Betriebsverhalten von Güterwagen während der Fahrt relativ unbekannt. Entsprechung schwer ist es, abnormales Verhalten von normalem Verhalten zu unterscheiden. Auch für eine Zuordnung einer potenziellen Ursache zu einem abnormalen Verhalten gibt es momentan eine nicht ausreichende Wissensgrundlage. Folglich ist es zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, Merkmale, Trends und Grenzwerte in der Weise festlegen zu können, dass darüber die Frage „Ist das Schutzziel erfüllt?“ beantwortet werden kann. Gemäß den obigen Ausführungen ist es somit ebenfalls noch nicht möglich, Technologien abschließend festzulegen, da es hier starke Wechselwirkungen geben kann.

Bei der Technologie- und Strategiefindung spielen außerdem wirtschaftliche Aspekte eine große Rolle. So ist etwa davon auszugehen, dass einige kontinuierliche Messungen auf Fahrzeugebene (On-Board) deutlich teurer sind, als entsprechende punktuelle Messungen am Gleis (Wayside). In einem solchen Fall kann es aber auch sein, dass eine physikalische Größe eine kontinuierliche Messung erfordert, somit also eine On-board-Messung vorgesehen werden muss, weil mit einer punktuellen Messung Merkmale, Trends oder Grenzwerte nicht sicher oder nicht schnell/häufig genug erfasst werden können. Dies zeigt einmal mehr, welchen Stellenwert die Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten hat. Auch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit lässt sich ohne diese Definition nicht abschließend beantworten.

Aus diesem Grund wird daher vorgeschlagen, bei der Technologie- und Strategiefindung zweigleisig zu verfahren. Zum einen sollten bereits im Vorfeld schon einige physikalische Größen identifiziert werden, die besonders vielversprechend erscheinen. Die dazu passenden Technologien können im gleichen Zuge identifiziert werden. Dies passiert insbesondere in den Abschnitten 7.2 bis 7.3.

Zusätzlich sollten aber Mess- bzw. Simulationskampagnen durchgeführt werden, um dem Ziel der Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten näher zu kommen. Neben der Messung des Spektrums des normalen Betriebsverhaltens können Simulationen und/oder Versuche gezielt einzelne Fehler abbilden, etwa den Bruch einer Primärfeder. Mit Hilfe der Simulations- bzw. Messdaten können dann

Veränderungen in beispielsweise dem Beschleunigungsverhalten erkannt werden. Wenn bekannt ist, wonach gesucht werden muss, kann auch die Technologie entsprechend ausgewählt werden.

## 7.2 Relevanz der physikalischen Größen

Die im Kapitel 6.4 erarbeiteten physikalischen Größen der Schutzziele (siehe Tabelle 9 und Tabelle 10) bilden die Grundlage für die Auswahl von Technologien zur Zustandsdetektion. Die physikalischen Größen lassen sich zur einfacheren Handhabung in die folgenden Gruppen einordnen:

- Beschleunigungen
- Drücke
- Temperaturen
- Kräfte\Momente
- Akustisch
- Optisch
- Sonstiges

Die Einordnung ist in der Abbildung 26 für ausgewählte Schutzziele dargestellt. Die Auswahl beschränkt sich bis auf die Schutzziele „Profilmfreiheit“, „Wagenidentifikation“ sowie „Informationen zu Beladungs-Nutzungseinschränkungen“ auf die Schutzzielgruppen 1 bis 3. Hintergrund ist, die bessere Handhabung dieser Schutzzielgruppen. Die Gruppen 4 und 5, welche im wesentlichen Transportsicherungsaspekte und die Rangierfähigkeit betrachten sind aufgrund der Vielfalt aufwendig. Beispielsweise seien hier die Sicherung von Klappen, Luken etc. oder das Vorhandensein von Tritten und Griffen genannt. Technologien für diese Themen einzeln herauszusuchen bringt weniger Mehrwert für die Studie im Vergleich zu den Schutzzielgruppen 1 bis 3, bei denen die Entgleisungssicherheit oder das Bremsvermögen sichergestellt werden.

Schutzziele	Physikalische Größen direkt		Physikalische Größen indirekt		
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte	Beschl. am Laufwerk	Y und Q am Rad oder am Gleis	Beschl. am Laufwerk	Akustisch	Temp. des Lagers
Schwingungsverhalten	Beschl. am Laufwerk	Y und Q am Rad oder am Gleis	optisch		
Sicherstellung des Bremsweges	Beschl. am Wagenkasten	Reibmoment	Bremszylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge	
Halten der Geschwindigkeit	Beschl. am Wagenkasten	Reibmoment	Bremszylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge	
Schutz des Laufwerks	Temp. der Radscheiben	Dicke der Bremssohle	Bremszylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge	
Festlegen des Fahrzeuges	Festhaltekraft		Kraft im Bremsgestänge	Stellung des Handrades	
Indirekte Bremswirkung gewährleisten	$\Delta P$ HLL am letzten Fzg				
Medien verbinden	Mediendurchgang eingeschränkt				
Schwingungsverhalten in Längsrichtung	Beschl. am Wagenkasten		$\Delta P$ HLL negativ	Kräfte an der Wagenstruktur	
Stoßverhalten in Längsrichtung	Pufferwege		Beschl. am Wagenkasten	Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung	
Profolfreiheit	Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung				
Wagenidentifikation	Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung	RFID, NFC, QR-Codes			
Informationen zu Beladungsmöglichkeiten	Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung	RFID, NFC, QR-Codes			

Abbildung 26: Gruppierung der physikalischen Größen ausgewählter Schutzziele

### 7.2.1 Anwendbarkeit der physikalischen Größen

In dieser Stelle werden die physikalischen Größen (aus Abbildung 26) hinsichtlich der Anwendbarkeit eingeschätzt. Für die Einschätzung wurden mehrere Kriterien ausgewählt. Ein Kriterium ist der zu erwartende Messaufwand. Hierbei ist vor allem die notwendige Sensorik beziehungsweise die Komplexität im Fokus. Ein weiteres Kriterium ist die Verwendbarkeit von streckenseitigen (stationären) oder wagenseitigen Sensoren. Auf den Kriterien aufbauend stellt sich letztlich auch die Frage, ob direkte oder indirekte Größen heranzuziehen sind. Wie zum Teil aus dem Namen hervorgeht, haben direkte physikalische Größen den Vorteil, dass sich mit ihnen die Schutzziele unmittelbar bewerten lassen. Für indirekte physikalische Größen gilt Gegenteiliges. In einigen Fällen eignen sich diese zum Beispiel aufgrund der dann verwendbaren Sensorik besser.

#### On-board Diagnose

Wagenseitige Diagnosesysteme haben schwierige Randbedingungen. Ein Problem ist die nicht vorhandene Energieversorgung. Jedes System muss autark funktionieren und durch einen Akku und/oder

durch einen Energyharvester versorgt werden. Es gibt neben der Stromversorgung auch keine permanente Datenverbindung oder Möglichkeit der Datenbündelung, sodass jeder Wagen für sich die Daten per Funk versenden muss. Eine weitere Herausforderung ist die immense Anzahl an Güterwagen, die es auszurüsten gilt.

All diese Aspekte werden im Folgenden bei der Bewertung der physikalischen Größen für den wagenseitigen Einsatz berücksichtigt. Im Grundsatz stellt dies keine vollständige Gegenüberstellung von Nutzen, Aufwand und Kosten etc., sondern im Sinne der Aufgabe eher eine pauschale erfahrungsgemäße Einschätzung dar.

Die physikalischen Größen Beschleunigung, Druck und Temperatur zeichnen sich durch eine vergleichsweise günstige Sensorik und einfache Messdatenerfassung aus. Während Drücke und Temperaturen vergleichsweise leicht Auszuwerten sind, zeigt sich bezüglich der Auswertung der Beschleunigungssignale, dass die Datenauswertung zum Teil Probleme unterbreitet. Einerseits gibt es viele Störsignale aufgrund der vielfältigen Schwingungsanregungen des Güterwagens, die die Auswertung erschweren. Andererseits liegen bisher auch keine langjährigen Erfahrungen im Umgang mit den Daten vor.

Die Messung von Kräften und Momenten erfordert eine vergleichsweise teure Sensorik. Je nach Ausführung sind diese wartungsintensiv und auch sehr aufwendig zu montieren. Dies gilt zum Beispiel, wenn Dehnmessstreifen appliziert werden müssen. Kraftaufnehmer wie Druckmessdosen oder Kraftmessbolzen sind in der Regel auch deutlich teurer als zum Beispiel Beschleunigungssensoren.

Wegmessungen sind vor allem bei kontinuierlicher Abtastung schwierig zu messen, insbesondere aufgrund der rauen Einsatzbedingungen. Endlagen, zum Beispiel (Handbremsstellung) können dagegen durch Schalter vergleichsweise einfach geprüft werden.

Akustische Messungen erfordern eine aufwändige Sensorik mit hohen Abtastraten und daher auch hohem Energiebedarf. Für die Anwendungen auf Güterwagen sind diese dadurch weniger geeignet, gleiches gilt für kamerabasierte Systeme.

### ***Streckenseitige Zugüberwachung (Wayside)***

Die Verwendung von stationären Monitoring Stationen entlang der Bahnstrecken bedeutet im Vergleich zur Ausrüstung aller Güterwagen eine signifikante Reduktion des Ausrüstungsaufwandes hinsichtlich der zu erwartenden Stückzahlen. Zudem ist der Nutzen sofort nach Inbetriebnahme der Anlagen für alle Wagen<sup>5</sup> vorhanden. Dies steht im Gegensatz zur On-Board Diagnose, wo Nutzen im Sinne dieser Studie erst entsteht, wenn alle Wagen im Zug entsprechende Systeme haben.

---

<sup>5</sup> Voraussetzung für den sofortigen Nutzen ist die wagenscharfe Zuordnung der erhobenen Daten. Diese muss dafür zunächst unabhängig vom Wagen durch Auslesen der Wagenanschriften erfolgen. Die bisher praktizierte Methode des Achszählens ist aufwändig und oft fehlerbehaftet, da sie das richtige Zusammenführen mit der Wagenliste des Zuges erfordert.

Ein weiterer Vorteil stationärer Anlagen ist die permanente Verfügbarkeit von Strom und Internet. Aus all diesen Gründen sind Kraftmessungen, akustische sowie kamerabasierte Messverfahren für die Verwendung an den Stationen einsetzbar. Streckenseitige Sensorik stellt somit eine Möglichkeit dar, die technische Aufrüstung der Güterwagen entscheidend aufs Nötigste zu begrenzen. Stationäre Anlagen haben aber auch den Nachteil, dass diese immer eine punktuelle Überwachung des Wagenzustandes darstellen und ein verdichtetes Netz erforderlich ist. Die Einbindung von streckenseitigen Monitoring Stationen in die Wagentechnische Untersuchung stellt daher zusätzliche Anforderungen an die Infrastruktur (-betreiber).

1. Es müssen seitens der Infrastrukturbetreiber (oder auch von externen Unternehmen) ausreichend Anlagen entlang der Strecke installiert sein. Während es in der Schweiz und in Österreich das Bestreben gibt, ein Netz aus vernetzten streckenseitigen Überwachungsanlagen aufzubauen, ist seitens Deutschland bisher nichts bekannt.
2. Die Daten müssen in ausreichendem Maße und rechtzeitig zur Verfügung stehen.
3. Die Kosten für die Datenerhebung müssen geklärt werden, da die Wagenhalter und\oder das EVU mit der Einbindung der Monitoring Stationen in die WU schnell in die Abhängigkeit der EIU gerät.

### **7.2.2 Filterung der physikalischen Größen**

Gemäß den in vorherigen Abschnitt genannten Kriterien sind die physikalischen Größen gefiltert und entsprechend der Eignung sind diese einer strecken- beziehungsweise wagenseitige Anwendung zugeordnet.

Schutzziele	Physikalische Größen direkt		Physikalische Größen indirekt	
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte	Bechl. am Laufwerk	Y und Q am Rad oder am Gleis	Bechl. am Laufwerk	Akustisch, Temp. des Lagers
Schwingungsverhalten	Bechl. am Laufwerk	Y und Q am Rad oder am Gleis	optisch	
Sicherstellung des Bremsweges	Bechl. am Wagenkasten		Bechl. am Zylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge
Halten der Geschwindigkeit	Bechl. am Wagenkasten		Bechl. am Zylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge
Schutz des Laufwerks	Temp. der Radscheiben	Dicke der Bremssohle	Bechl. am Zylinderdruck	Kraft im Bremsgestänge
Festlegen des Fahrzeuges	Festhaltekraft		Kraft im Bremsgestänge	Stellung des Vordrades
Indirekte Bremswirkung gewährleisten	Bechl. am Netzten Fzg			
Medien verbinden	Maximale Durchgang eingeschränkt			
Schwingungsverhalten in Längsrichtung	Bechl. am Wagenkasten		Bechl. HLL negativ	Kräfte an der Wagenstruktur
Stoßverhalten in Längsrichtung	Bechl. am Pufferwege		Bechl. am Wagenkasten	Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung
Profilfreiheit				Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung
Wagenidentifikation				Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung, RFID, NFC, QR-Codes
Informationen zu Beladungsmöglichkeiten				Optisch ggf. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung, RFID, NFC, QR-Codes

Abbildung 27: Filterung der physikalischen Größen ausgewählter Schutzziele sowie Einordnung nach strecken- und wagenseitigen Diagnose

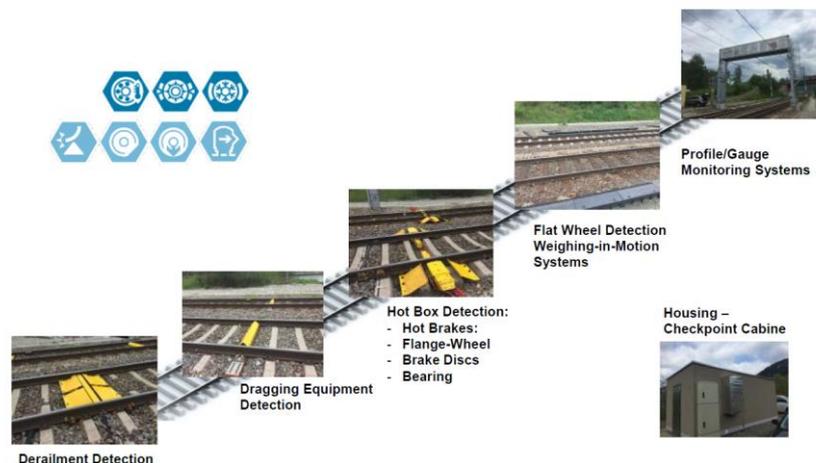
### 7.3 Technologierecherche

In diesem Kapitel werden für die genannten physikalischen Größen entsprechende Technologien aufgezeigt. Im Anschluss werden dann vielversprechende Technologien herausgenommen und deren Bedeutung bewertet. Die gefundenen Technologien mit Anbietern, die zur Überwachung der Schutzziele in Frage kommen können, sind im Anhang A nach den Schutzzielen gruppiert zu finden.

Im Rahmen der Recherche wurden die Portfolios von Anbietern von Telematik- und Messtechnikgeräten für die Bahnbranche überprüft. Die gefundenen Lösungen bzw. Technologien sind typischer Weise auf die einzelnen möglichen Fehler nach dem AVV-Fehlerkatalog zugeschnitten. Basierend auf dem Messverfahren wurden diese den physikalischen Größen zugeordnet. Es hat sich herausgestellt, dass fast ausschließlich streckenseitige Anwendungen existieren. Bezüglich der streckenseitigen Zugüberwachungssysteme hat sich zudem herausgestellt, dass diese wesentlich erprobter sind als On-Board Diagnosesysteme. Die bewährtesten Technologien, die zur Unterstützung der WU beitragen können, sind deshalb streckenseitigen Diagnosesysteme. Sie basieren auf die folgenden drei Prinzipien:

- Optischer Scan des Wagens von diversen Blickwinkeln und anschließend Bildverarbeitung zur Mustererkennung. Damit werden beispielsweise die Wagenbeschriftungen, die Abnutzung von Rädern und Bremssohlen sowie die Profalfreiheit detektiert. Alternativ sind hier auch Drohnenbasierte Kamerasysteme denkbar, welche in Ladegleisen die Güterwagen autonom oder ferngesteuert inspizieren.
- Infrarottemperaturmessung durch Wärmebildkamera. Damit lassen sich Heißläufer und Temperaturanomalien der Fahrzeugkomponenten feststellen.
- Statische und dynamische Radkraftmesseinrichtung. Eine Beurteilung der Radkraftunterschiede bei einem Wagen sowie der Drehwinkelabhängigkeit einer Radkraft können hiermit erfolgen. Durch Auswertung der gemessenen Kräfte und Beschleunigungen werden beispielweise Flachstellen und unrunde Räder identifiziert.

In der folgenden Grafik ist ein sogenannter „Checkpoint“ als konzentrierte Form der streckenseitigen Zugüberwachung aus Österreich dargestellt.



**Abbildung 28: Checkpoint-System der ÖBB-Infra [22]**

Dennoch ist das Potential von On-Board System sehr hoch, gerade bei der Auswertung von Beschleunigungen im Fahrwerk könnten viele Schutzziel ausgewertet werden. Daher wird dies auch im Kapitel 9.2 als Schlüsseltechnologie gehandhabt. Fast alle bisher verfügbaren On-Board-Lösungen für Güterwagen können heutzutage nicht direkt zur Unterstützung der WU eingesetzt werden. Sie sind vielmehr für die Belange des kommerziellen Betriebes geeignet. Dazu zählen Geräte zur Ortung und Lokalisierung der Wagen und zur Überwachung der Ladung (Temperatur-, Feuchtigkeit- und Druckmessung). Die einzig verfügbaren beziehungsweise kurzfristig verfügbaren On-board Lösungen sind die Stoßerkennung sowie die Bremsprobe.

## 8. Technologiemigration in die WU

In diesem Kapitel werden basierend auf den im Abschnitt 6.1 vorgestellten Schutzziele sowie den geeigneten Technologien aus Anhang A die Möglichkeiten einer Gestaltung einer zukünftigen digitalen WU erörtert.

Die vorgestellten Aufgaben bzw. Kontrollen der Wagenmeister während Zugvorbereitung<sup>6</sup> lassen sich auch vereinfacht darstellen. Die Wagentechnische Untersuchung besteht dann im Wesentlichen aus der technischen Kontrolle, der Kontrolle der Transportsicherung sowie der Einstellung der Betriebsparameter (G/P, etc.) (siehe Abbildung 29). Für die Digitalisierung der Zugvorbereitung werden alle drei Bestandteile auf das Reduktionspotential überprüft. Es werden ebenso die Fälligkeiten der Schutzzielprüfungen geklärt, sodass im Endeffekt exakt geklärt werden kann, was mit welcher Technologie oder verbleibender manueller Tätigkeit wann geprüft werden muss.



**Abbildung 29: Vereinfachte Übersicht der Bestandteile der Zugvorbereitung**

Eine essentielle Frage, welche sich für eine zukünftige digitale wagentechnische Untersuchung stellt, ist der Zeitpunkt der Prüfung der Schutzziele. Nicht alle Schutzziele können sinnvoll im Stand geprüft werden. Ein Beispiel ist die „Führung des Fahrzeuges im Gleis“, welche erst endgültig im Verlauf der Fahrt geprüft werden kann. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeiten, dass:

- vor der Fahrt
- während der Fahrt
- in regelmäßigen Abständen

geprüft wird. Vor allem Aspekte, die sich im Stillstand ändern (Beladung, Zugbildung etc.), sind im Stand vor Abfahrt zu kontrollieren. Die Bremsprobe sowie die Überprüfung der Betriebsparameter und Ladungssicherung etc. sind weiterhin essentielle Bestandteile der Zugvorbereitung.

<sup>6</sup> Siehe 2. Kapitel

Insgesamt gehören folgende Kontrollen zur Prüfung vor der Abfahrt:

- Beladung:
  - einseitige Beladung
  - Ladungssicherung
  - offene Luken\Türen
  - Überladung
- Profilveriheit
- Betriebsparameter (G\P, Leer\Beladen, Zugschluss tafeln)
- Bremsprobe

In der folgenden Grafik sind die Schutzziele farblich nach der Fälligkeit markiert. Grün steht dabei für die Prüfung vor der Abfahrt, blau für die Prüfung während der Fahrt. Grau bedeutet „Regelmäßiger Check“.

Führung des Fahrzeuges im Gleis	Verzögerungsverhalten	Zugbildung ermöglichen	Verfügbarkeit des Transportgefäßes	Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte	Sicherstellung des Bremsweges	Medien verbinden	Be-\Entladbarkeit	Bedienbarkeit während des Rangierens
Schwingsverhalten	Halten der Geschwindigkeit	Schwingsverhalten in Längsrichtung	Transportsicherung	Wagenidentifikation
	Schutz des Laufwerks	Stoßverhalten in Längsrichtung	Profilveriheit	Informationen zu Beladungsmöglichkeiten\ Nutzungseinschränkungen
	Festlegen des Fahrzeuges		Schutz vor elektrischem Schlag	
	Indirekte Bremswirkung gewährleisten		Funkenschutz	
				<b>Legende</b>
				Vor der Abfahrt
				Während der Fahrt
				Regelmäßiger Check

**Abbildung 30: Fälligkeit der Schutzzielprüfungen**

Auffällig ist, dass ein Großteil der Schutzziele weiterhin vor der Fahrt kontrolliert werden müssen. Dazu gehören die gesamte Schutzzielgruppe „Verzögerungsverhalten“, die Unterschutzziele „Medien verbinden“, „Transportsicherung“ und „Profilveriheit“. Der Umgang mit diesem Schutzziel wird im Kapitel 8.1 vorgestellt.

Die Schutzziele „Wagenidentifikation“ sowie „Informationen zu Beladungsmöglichkeiten\Nutzungseinschränkungen“ müssen sowohl vor der Abfahrt als auch während der Fahrt durch eine ständig verfügbare digitale Wagenidentität abrufbar sein. Dies wird im Rahmen dieser Studie als Schlüsseltechnologie gehandhabt und im Kapitel 9.2 vertieft.

Hinsichtlich der Entladbarkeit ist eine Kontrolle vor der Abfahrt von Vorteil, aber nicht zwingend notwendig. Es ist anzunehmen das regelmäßige Kontrollen der Lademechanismen ausreichen. Auch für die

Schutzziele „Schutz vor elektrischem Schlag“, „Funkenschutz“ sowie „Bedienbarkeit während des Rangierens“ wird davon ausgegangen, dass regelmäßige Checks ausreichend sind. Im Rahmen dieser Studie kann die Einbettung dieser Checks in den täglichen Betrieb beziehungsweise in die Instandhaltung nicht vollständig beantwortet werden. Im Abschnitt 8.3 werden daher nur verschiedene Optionen für eine Umgestaltung der Instandhaltung im Sinne der WU genannt, ohne im Detail darauf einzugehen.

## 8.1 Prüfungen vor der Fahrt

### 8.1.1 Transportsicherung

Die Überprüfung der ordnungsgemäßen Transportsicherung ist ein essentieller Bestandteil eines jedes Transportes und muss vor jeder Fahrt geprüft werden (siehe Abbildung 30). Die Kontrollen bestehen aus einer Vielzahl von Prüfaspekten und variieren in Abhängigkeit der Güterwagengattung und des Ladegutes. Ausgewählte Beispiele sind in der Tabelle 11 zu finden.

**Tabelle 11: Exemplarische Zusammenstellung der Vielfalt an Kontrollaufgaben in Abhängigkeit der Wagengattung\Ladeeinheit im Rahmen der Wagentechnischen Untersuchung gemäß AVV**

Gattung\Ladung	Kontrollkriterien		
	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3
<b>Kesselwagen</b>	Tank nicht scharfkantig verbaut	Tankverkleidung, Sonnendach, Isolierung unbeschädigt	Tank dicht, keine Leckstelle, kein Ladegutaustritt
<b>Autotransporter</b>	Abstützung und Befestigungen der Überfahrbleche von Mittenradsätzen nicht verformt, gebrochen, gerissen, keine fehlenden Teile	Radvorlegerstellung richtig	-
<b>Flachwagen</b>	Steckungen, Drehungen, Gleitungen, Rungentaschen, -halterungen, Unbeschädigt und profilfrei	Handrad für Stützbockverschiebung verriegelt, keine Gefahr der Lademaßüberschreitung	Aufsetzzapfen in Verwendung unbeschädigt, im Eingriff
<b>Ladungen und intermodale Ladeinheiten (ILE)</b>	Pakete, Ballen, Bunde, Stapel verzurrt/gebunden	Einzellasten auf Flachwagen nicht zu schwer für Auflageart, Unterlage nicht zu schmal	Risse in Plane > 30 mm

### **Vollautomatisierung**

Ein Ansatz wäre eine Vollautomatisierung der Transportsicherungskontrolle. Für eine 100 %ige Automatisierung sind eine Vielzahl an Sensoren notwendig um zum Beispiel Lukenschluss, Überladung, Verformungen am Aufbau, Fahrzeugbegrenzung und vieles mehr zu erkennen<sup>7</sup>. Dies erfordert neben der Ausrüstung der Güterwagen mit Sensorik auch eine Ausrüstung der Ladestellen. Die Ladestellen

<sup>7</sup> Mehr Informationen siehe Kapitel 7

müssen hierfür mindestens Technologien zur Lichtraumprofilüberwachungen bekommen. Kamerasysteme mit Merkmalerkennung an den Ein- und Ausfahrtgleisen können die Prüfung der Transportsicherung deutlich unterstützen. Dies ist vor allem eine Frage der Wirtschaftlichkeit und ist für größere Ladestellen eventuell eine Option. Für kleinere Ladestellen ist es schwierig zu bewerten, da die Kosten für solche Anlagen unbekannt sind. Denkbar sind auch drohnenbasierte Kamerasysteme entlang der Ladestellen zur Entlastung der Wagenmeister. An Ladegleisen feststationierte Drohnen, können durch eine automatisierte Aufnahme der Wagenzüge oder durch eine ferngesteuerte Bedienung, die zum Teil recht langen Anfahrwege der Wagenmeister vermeiden.

### **Verantwortungsverlagerung**

Ein anderer Ansatz wäre die Einbeziehung des Verladepersonals. Der Verloader ist ein Experte für die Be- und Entladung der Güterwagen und hat zudem auch ein Eigeninteresse daran, dass die Güterwagen ausfahren dürfen. Eine Verantwortungsverlagerung vom EVU zum Verloader wäre hier eine vergleichsweise einfache Methode, um den Aufwand der Transportsicherungskontrolle signifikant zu reduzieren.

Voraussetzung hierfür ist zum einen eine Schulung/Sensibilisierung des Verladepersonals. Zum anderen muss auf eine anwendungsgerechte Gestaltung/Nutzung der Güterwagen geachtet werden, um zum Beispiel Beschädigungen oder Überladungen zu vermeiden<sup>8</sup>. Ein Beispiel aus den Vor-Ort-Besuchen ist die Nutzung von E-Wagen für den Stahltransport. Das Nutzvolumen steht hierbei im schlechten Verhältnis zum vorhandenen Volumen (siehe Abbildung 31). Die Gefahr der Überladung ist folglich hoch. Der Wagenmeister musste deswegen bei jedem zweiten Wagen nach oben steigen, um die korrekte Beladung zu prüfen. Der Verloader belädt die Wagen an diesem Standort sogar von oben und hat somit die Übersicht und hätte keinen Mehraufwand. Stichprobenartige regelmäßige Kontrollen seitens der EVU könnten zur Qualitätskontrolle herangezogen werden. Ebenso muss es möglich sein, Beschädigungen schnell zu melden, damit eine eventuelle Reparatur schnell eingeleitet werden kann.



**Abbildung 31: Hohe Gefahr der Überbeladung bei der Verwendung von E-Wagen für den Stahltransport**

<sup>8</sup>Alternativ müssen Hilfsmittel bereitgestellt werden, um falsche Beladungen rechtzeitig zu erkennen.

### 8.1.2 Technische Kontrollen

Die Reduzierung der Technischen Kontrollen steht im Fokus der gesamten Studie. Wie eingangs im Kapitel erwähnt, ist vor Abfahrt bezüglich der technischen Kontrollen das Bremssystem sowie das Vorhandensein offensichtlicher Fehler\Beschädigungen zu prüfen. Die Kontrolle des Bremssystems geht mit der automatisierten Bremsprobe einher. Die Kontrolle auf offensichtliche Beschädigungen kann gemeinsam mit der Kontrolle der Transportsicherung erfolgen. Das heißt entweder manuell oder automatisiert mithilfe von kamerabasierten Auswertesystemen.

Detaillierte Kenntnis über den Zustand des Güterwagens ist die Grundvoraussetzung für die Automatisierung der Zugvorbereitung. Um die optische Kontrolle auf offensichtliche Schäden zu reduzieren, müssen bezüglich der Schutzziele, welche nicht vor der Fahrt beziehungsweise nur während der Fahrt zu bewertbar sind, Statusinformationen vorliegen. Das heißt der während der letzten Fahrt ermittelte „Gut“- oder „Schlechtzustand“ dieser Schutzziele muss vor der Abfahrt bekannt sein, damit eventuelle notwendige Schritte, wie Nachsehen, Reparaturen durch entsprechendes Fachpersonal oder eine Werkstattzuführung rechtzeitig eingeleitet werden können. Auf die Prüfungen während der Fahrt wird im Kapitel 8.2 eingegangen.

### 8.1.3 Einstellung der Betriebsparameter

In der Regel reduziert sich der Arbeitsschritt „Einstellung der Betriebsparameter“ auf die Kontrolle der Hebelstellungen. Dies kann jedoch von Standort zu Standort abweichen. In Rangierbahnhöfen kann dies ohne weiteres durch die Rangierer übernommen werden, auf kleineren Ladestellen steht evtl. kein separates Personal zur Verfügung. Die manuelle Kontrolle der korrekten Hebelstellungen kann vergleichsweise einfach durch eine Überwachung im Rahmen einer automatisierten Bremsprobe entfallen. Unabhängig davon ist die Einstellung der Hebelpositionen essentiell für die Zugvorbereitung\bildung, denn auch bei einer zunehmenden Digitalisierung\Automatisierung muss jemand die Einstellung vornehmen. Eine Automatisierung dieses Arbeitsschrittes ist heutzutage einzig durch den automatischen Lastwechsel möglich. Die Umstellung der Bremsstellungen G\P zu automatisieren macht wenig Sinn, Abhilfe schafft eine Mittelpufferkupplung oder der Einsatz einer EP-Bremse, da dieser Schritt dann obsolet wird. Die Zugschlussignale müssen ebenso weiterhin per Hand eingesteckt werden, solange es keine automatische Zugschlusserkennung und entsprechende Anzeigen gibt. Die Erstellung von Wagenlisten\Bremszetteln\Zollpapieren oder Gefahrgutlisten muss digitalisiert werden. Dies ist am Beispiel der SBB Cargo internen Verkehre (ohne Zoll) bereits geschehen.

## 8.2 Prüfungen während der Fahrt

Die Schutzziele „Führung des Fahrzeuges im Gleis“ sowie „Schwingungs- und Stoßverhalten in Längsrichtung“ sind während der Fahrt zu prüfen. Wie bereits aus Kapitel 7 bekannt ist, kann dies durch streckenseitige oder On-Board Diagnosesystemen geschehen. Zustände über die betreffenden Wagen können zum Großteil nur aus Zugkontrollleinrichtungen von der Strecke entnommen werden. Die Nut-

zung von On-Board Diagnosesystemen ist Status quo aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Technologien schwierig. Der Aufnahme von Beschleunigungen im Fahrwerk kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, welche in Zukunft in Betracht gezogen werden sollte (siehe Kapitel 9.2).

Unabhängig von diesen Schutzziele braucht es aber definitiv Technologien auf dem Güterwagen, um zum Beispiel die Bremsprobe automatisiert durchzuführen. Eventuell kann in diesen Systemen auch die Beschleunigungsüberwachung integriert werden.

### 8.3 Rolle der Instandhaltung

Es stellt sich grundsätzlich die Frage des Mehrwertes der täglichen nicht dokumentierten Kontrollen durch die Wagenmeister. Unabhängig vom Einsatz von Technologien gilt es, die Systematik der heutigen Kontrollen zu hinterfragen. Es ist neben der digitalen Aufrüstung empfehlenswert, die Wagentechnische Untersuchung vom Ladegleis des Kunden hin zu strategisch besser gelegenen Orten, an denen viele Güterwagen verkehren, zu verlagern. Dort können dann, als ein fester Bestandteil der Instandhaltung<sup>9</sup>, die Güterwagen systematisch geprüft werden. Dies kann entweder zielgerichtet durchgeführt werden, sodass nur bestimmte Baugruppen geprüft werden oder aber es können regelmäßige Tiefenprüfung erfolgen, analog zu den heutigen Kontrollen des Eisenbahnbundesamtes im Feld. Bei zielgerichteten Prüfungen kann die Ausrichtung der Maßnahmen lauleistungsabhängig und/oder aufgrund von Fehlermeldungen durch ein beliebiges Überwachungssystem erfolgen.

Die Prüfungsintervalle sowie die Orte sind geeignet zu wählen. Bezüglich der Standortwahl kommen in der Regel Rangierbahnhöfe in Frage oder auch die Ladegleise mit höherem Wagenaufkommen. Je nach Standort können dann mobile oder fest stationierte Serviceteams in zu wählenden Intervallen die Prüfungen durchführen. Nicht auszuschließen sind auch natürliche Lücken im Fahrplan die genutzt werden können. Bezüglich der Intervalle zwischen den Prüfungen ist durch die sorgfältigere und dokumentierte Prüfung eine deutliche Verlängerung im Vergleich zur täglichen WU anzustreben.

Für die Wagentechnische Untersuchung würde eine örtliche Verlagerung der technischen Kontrolle eine erhebliche Entlastung bedeuten. Bei Abfahrt vom Be-/Entlader wäre dann nur noch eine visuelle Kontrolle auf grobe Fehler nötig. Dies kann durch den Triebfahrzeugführer oder durch Technologien erfolgen zum Beispiel kamerabasierte Auswertesysteme in Analogie zur Prüfung der Transportsicherung<sup>10</sup>. Es müsste kein extra Personal zu den Ladegleisen disponiert werden und auch die Gefahr von Ausfällen durch technische Defekte ist durch die regelmäßigen Prüfungen geringer.

Die Schutzziele wie „Funkenschutz“, „Schutz vor elektrischem Schlag“, „Bedienbarkeit während des Rangierens“ können in diese regelmäßigen manuellen Checks mit abgedeckt werden. Diese sind zwar zum Teil gemäß der Kategorisierung (siehe Kapitel 6.3) sicherheitsrelevant, aber entweder redundant

---

<sup>9</sup> Änderung der Instandhaltung (Instandhaltungsintervalle) in Anlehnung an die Luftfahrt (siehe Kapitel 5.4)

<sup>10</sup> siehe Kapitel 8

---

am Güterwagen (zum Beispiel Erdungskabel) oder unterliegen keinen spontanen Versagensverhalten (Funkenschutzbleche). Die Bedienbarkeit während des Rangieren ist hingegen ohne Einfluss auf den Bahnbetrieb während der Zufahrt, sodass Rangiereinschränkungen im Zweifel in Kauf genommen werden müssen.

## 9. Ausblick

### 9.1 Vision

Im Folgenden soll die Vision einer zukünftig digitalisierten Wagenmeistertätigkeit vorgestellt werden. Diese Vision erhebt weder einen Anspruch auf die vollständige Abbildung technologischer Möglichkeiten, noch darauf, mittelfristig vollständig umsetzbar zu sein. Diese Vision soll vielmehr eine Richtung aufzeigen, in die sich die Wagentechnische Untersuchung grundsätzlich bewegen sollte. Nimmt man die wörtliche Bedeutung des Begriffs Roadmap (= Straßenkarte) als sprachliches Bild, so soll die im folgenden vorgestellte Vision den Kompass repräsentieren. Nachdem die richtige Richtung mit dem Kompass identifiziert wurde, können die zu nutzenden Straßen und Wege auf der Karte festgelegt werden.

Für die Entwicklung der Vision soll zunächst der Status quo betrachtet werden. Dazu dient ein imaginärer Wagen 4711, der zunächst in einem imaginären Zug 0815 von den Niederlanden durch Deutschland nach Österreich fährt und anschließend in einem ebenfalls imaginären Zug 2244 von Österreich über Italien und die Schweiz nach Frankreich. Abbildung 32 zeigt diese Zusammenhänge.

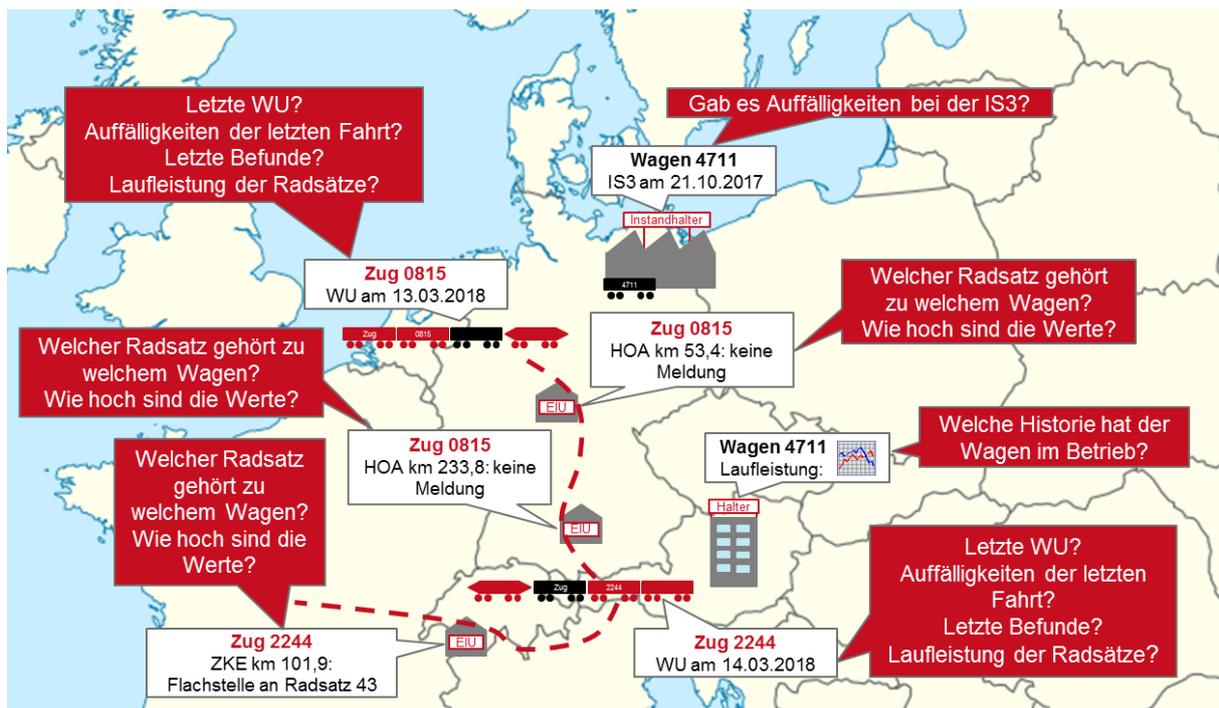


Abbildung 32: Exemplarische WU am Wagen 4711 im Status quo

Der Wagen 4711 gehöre einem österreichischen Halter. Dieser muss die Laufleistung des Wagens erfassen. Dazu bekommt er eventuell die Daten der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) oder der Wagen 4711 verfügt bereits über ein System zur Erfassung der Laufleistung. Informationen über Besonderheiten und Auffälligkeiten im Betrieb dieses Wagens liegen dem Halter aber im Allgemeinen nicht

vor. Derartige Besonderheiten könnten etwa häufige Stoßvorgänge beim Rangieren oder das regelmäßige Befahren sehr enger Bögen sein.

Weiterhin sei der Wagen 4711 vor etwa einem halben Jahr bei einem Instandhaltungsbetrieb in Deutschland einer Instandhaltung der Stufe 3 (IS3) unterzogen worden. Die Befunde der Untersuchung (z.B. Verschleißbild der Radsätze, auch weitere Auffälligkeiten) werden im Idealfall dem Halter mitgeteilt. In einem ungünstigen Fall wird der Wagen nur gemäß den Anforderungen instandgesetzt. Ein Bezug zur betrieblichen Randbedingungen des Wagens kann in der Werkstatt aber nicht hergestellt werden.

Vor der Abfahrt des Zuges 0815 findet in den Niederlanden nun eine Wagentechnische Untersuchung statt. Der durchführende Wagenmeister hat keine Informationen darüber, wann am Wagen 4711 letztmalig eine WU durchgeführt wurde, ob es bei der letzten Fahrt des Wagens Auffälligkeiten gab, ob bei einer vorherigen WU Auffälligkeiten festgestellt wurden und wie hoch die Laufleistung der Radsätze seit der letzten Reprofilierung ist.

Auf der Fahrt des Zuges 0815 passiert der Wagen 4711 zwei Heißläuferortungsanlagen (HOA) des Eisenbahninfrastrukturunternehmens (EIU). Beide Anlagen erkennen keine unzulässig hohen Werte. Eine Zuordnung von Messwerten zu einzelnen Fahrzeugen im Zug ist nicht möglich. Die einzelnen Messwerte, also nicht nur das Einhalten von Grenzwerten, liegen vor, können aber den Fahrzeugen nicht zugeordnet werden. Auch wird ein Gut-Ergebnis nicht weiter dokumentiert. Am Ende der Zugfahrt in Österreich kann nicht nachvollzogen werden, wie viele Streckeneinrichtungen beim Wagen 4711 das Einhalten von Grenzwerten überprüft haben.

Der Wagen 4711 werde nun in Österreich in den Zug 2244 eingestellt. Vor dessen Abfahrt findet erneut eine WU statt. Der durchführende Wagenmeister hat genau wie sein niederländischer Kollege keinerlei Informationen über die Historie des Wagens. Weder weiß er von den Gut-Ergebnissen der Streckeneinrichtungen während der letzten Fahrt, noch hat er eine Information darüber, dass am Wagen 4711 vor einem Tag eine WU durchgeführt wurde. Er hat daher keine andere Wahl als den Wagen 4711 – wie jeden anderen Wagen auch – einer vollständigen WU zu unterziehen.

Der Zug 2244 passiere nun auf seiner Fahrt nach Frankreich eine Zugkontrolleinrichtung in der Schweiz. Hier wird eine Flachstelle an Radsatz 43 entdeckt. Hier stellt sich im Allgemeinen die Frage, zu welchem Wagen der Radsatz 43 gehört und wie hoch die gemessenen Werte genau sind<sup>11</sup> – auch die der Wagen ohne Grenzwertüberschreitung.

Diese Geschichte des Wagens 4711 ließe sich nun beliebig fortsetzen. Die Quintessenz ist immer die gleiche: Der Wagenmeister hat keine Informationen über die Geschichte eines Wagens. Der Wagenmeister hat keine Möglichkeit, vorherige Ereignisse oder Erkenntnisse in seine Untersuchung einfließen zu lassen. Das liegt aber nicht daran, dass es derartige Ereignisse oder Erkenntnisse nicht gäbe. Sie

---

<sup>11</sup> Gemäß Aussage von Herrn Furrer (SBB Cargo) läuft derzeit ein Projekt zwischen SBB Cargo und SBB Infra zur wagenscharfen Zuordnung von Messwerten zu Wagen. Voraussetzung ist eine Möglichkeit zur Wagenidentifikation.

werden nur nicht zentral und für alle Akteure einsehbar dokumentiert. Das Lernen aus Daten, wie es zum Beispiel in der Luftfahrt sehr ausgeprägt ist (siehe Abschnitt 5), ist damit unmöglich.

Daher setzt an dieser Stelle ein erster Schritt der Vision an: Die ohnehin erhobenen bzw. vorhandenen Daten eines Wagens sollten in einer zentralen Datenbank abgelegt werden. Diese zentrale Datenbank ist in Abbildung 33 als „Digitale Wagenidentität“ (DWI) bezeichnet. Alle vorstehend genannten Daten zum Wagen 4711 sowie im Rahmen der Zugfahrten 0815 und 2244 gesammelten Informationen würden in der DWI hinterlegt. Auch Daten des EVUs (in der Abbildung in Frankreich angenommen), etwa zur Beladung der Wagen und der Laufwege würden in der DWI hinterlegt. Instandhalter und Halter des Wagens 4711 könnten Informationen über den Austausch von Verschleißteilen wie etwa der Bremssohlen hinterlegen. Daraus würde beispielsweise automatisch die mittlere Bremssohlenlaufleistung bestimmt.

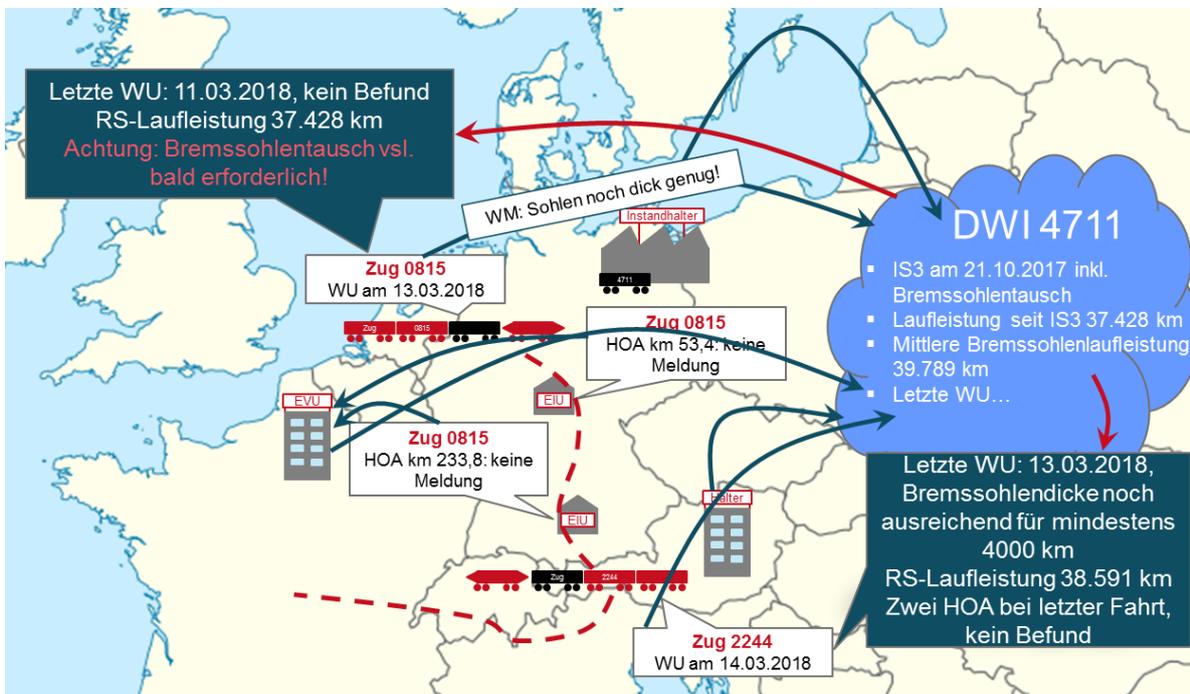


Abbildung 33: Exemplarische WU am Wagen 4711 mit Digitaler Wagenidentität (DWI)

Aus den eingegebenen und bereits weiterverarbeiteten Daten in der DWI könnte dann für den niederländischen Wagenmeister automatisch die Information generiert werden, dass gemäß aktueller Laufleistung des Wagens 4711 und der berechneten mittleren Laufleistung voraussichtlich bald ein Bremssohlentausch ansteht.

Nach Überprüfung des niederländischen Wagenmeisters steht aber fest, dass alle Sohlen noch eine Dicke von mehr als 15 mm haben. Daraus bestimmt der Algorithmus in der DWI, dass diese Dicke noch für mindestens weitere 4000 km ausreichend sind. Der österreichische Wagenmeister bekommt dementsprechend die Information, dass die Bremssohlen nicht gesondert zu prüfen sind. Durch die Gut-Ergebnisse der beiden Heißläuferortungsanlagen könnte der Algorithmus außerdem ableiten, dass

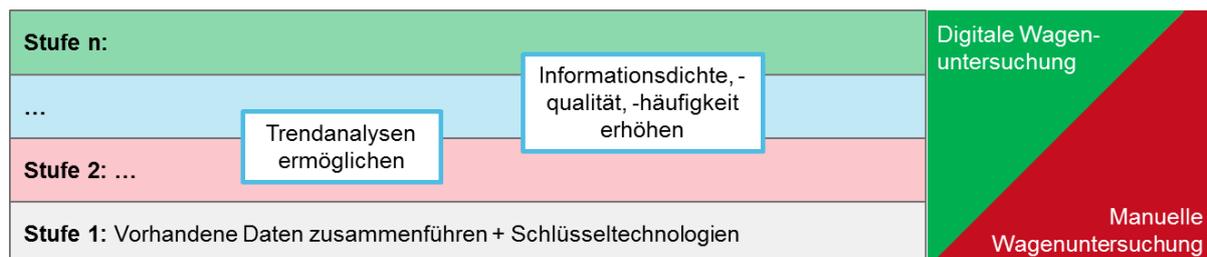
auch den Lagern keine erhöhte Aufmerksamkeit zukommen muss. Beispielseise durch eine farbige Hinterlegung einer Tabelle der Hauptbaugruppen des Wagens auf einem mobilen Endgerät wäre so für den Wagenmeister schnell ersichtlich, wo Inspektionsbedarf besteht (vgl. Abbildung 34).



**Abbildung 34: Exemplarische Darstellung des abgeleiteten Inspektionsbedarfes am Wagen 4711**

Durch die Dokumentation der Untersuchungen wäre es auf diese Weise auch denkbar, dass nicht jeder Wagen bei jeder WU am Zug untersucht werden muss. Im Beispiel könnte unter Umständen auf die Untersuchung des Wagens am 14.03. verzichtet werden, wenn klar ist, dass er letztmalig am 13.03. gründlich untersucht wurde.

Ausgehend vom Zusammenführen der grundsätzlich schon vorhandenen Daten sowie der Dokumentation der durchgeführten Untersuchungen können nun verschiedene Technologien (streckenseitige und/oder On-Board) die Informationen und Auswertungsmöglichkeiten verdichten. Diese Verdichtung kann und sollte stufenweise erfolgen. Ziel ist die Informationsdichte, -qualität und -häufigkeit weiter zu erhöhen. Daten in ausreichender Qualität und Häufigkeit ermöglichen Trendanalysen durch Algorithmen, sodass nicht das Überschreiten von Grenzwerten „abgewartet“ wird. Stattdessen können Veränderungen vom Sollverhalten frühzeitig erkannt werden. Der Anteil der digitalen Wagenuntersuchung wird so gezielt immer weiter gesteigert und der manuelle Untersuchungsaufwand in gleichem Maße gesenkt. Dabei ist zu beachten, dass das Ziel nicht ist, dass es gar keinen manuellen Aufwand mehr gibt, sondern die Häufigkeit abnimmt. Abbildung 35 zeigt diesen Zusammenhang.



**Abbildung 35: Stufenweise Entwicklung zur digitalen WU**

Es hängt stark von den Randbedingungen ab, ob Wayside-Anlagen, On-Board-Lösungen oder Mischformen fokussiert werden (siehe auch Abschnitt 9.4). Die Wahl der Technologien und damit einhergehend auch die auszuwertenden Merkmale, Trends und Grenzwerte (siehe Abschnitt 7.1) definieren die Ausgestaltung der in Abbildung 35 gezeigten Stufen. Exemplarisch ist hier die Stufe 1 durch das Zusammenführen der vorhandenen Daten definiert. Außerdem sind Schlüsseltechnologien genannt. Diese sind in Abschnitt 9.2 detaillierter beschrieben. Ein Beispiel ist hier die Möglichkeit der automatischen Wagenidentifikation, die überhaupt erst das Zusammenführen grundsätzlich bereits vorhandener Daten ermöglicht.

## 9.2 Schlüsseltechnologien

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass einige Technologien einen besonders hohen Mehrwert für die Digitalisierung der Wagentechnischen Untersuchung haben. Diese Technologien spielen eine Schlüsselrolle und werden im folgenden Abschnitt hervorgehoben.

### ***automatisierte Bremsprobe***

Die gesamte Schutzzielgruppe 2 „Verzögerungsverhalten“ (siehe Abbildung 30) sowie das Unterschutzziel „Medien verbinden“ kann im Wesentlichen durch die Schlüsseltechnologie „automatisierte Bremsprobe“ abgedeckt werden. Vorteilhaft ist, dass in absehbarer Zeit mehrere fertiger entwickelte Produkte am Markt verfügbar sein werden.

### ***digitale Wagenidentität/ Wagenanschriften***

Heutzutage sind alle denkbaren Produkte oder Vorgänge mit Bar- oder QR-Codes versehen, um eindeutige Zuordnungen, eine zentralisierte Datenhaltung und insgesamt eine schnellere Prozessabwicklung zu ermöglichen. Diese Vorteile gelten selbstverständlich auch für Güterwagen. Die Möglichkeit über alle Wagenanschriften digital zu verfügen, ist daher anzustreben. Die Aufwände für die Ausrüstung der Güterwagen sind hierbei vergleichsweise gering. Kein wagenseitiger Aufwand besteht, wenn die Wagenanschrift per Kamera ausgelesen wird. Alternativen wie NFC, RFID, QR-Codes oder ähnlich können genutzt werden, um das Problem mit unlesbaren Anschriften zu umgehen.

Neben der Identifikation braucht es eine zentrale Datenbank in der die Stammdaten der Güterwagen hinterlegt sind. Zusätzlich müssen hier aber auch die WU, die Ergebnisse streckenseitigen Zugüberwachungsanlagen etc. dokumentiert werden (vgl. Digitale Wagenidentität in Abschnitt 9.1). Ein erster Schritt in diese Richtung könnte die neuentwickelte Plattform „GCU Message Broker“ des GCU/AVV sein. [23] Mit diesen Technologien werden die Schutzziele „Wagenidentifikation“ sowie „Informationen zu Beladungsmöglichkeiten/Nutzungseinschränkungen“ abgedeckt.

### ***Beschleunigungen im Fahrwerk/Wagenkasten***

Beschleunigungen sind einfach zu erfassen und haben eine vergleichbar günstige Sensorik. Die Erwartungen sind zudem hoch, da aus Beschleunigungen einzelner Bauteile das Fahrverhalten beurteilt werden kann. Die sicherheitsrelevante Schutzzielgruppe 1 „Führung des Fahrzeuges im Gleis“ (siehe Abbildung 30) kann damit vollständig abgedeckt werden. Fertigentwickelte fahrzeugseitige Technologien gibt es für den Güterverkehr derzeit noch keine.

### ***Kamerabasierte Systeme mit Merkmalerkennung***

Eine Methode mit wenig Sensorik viele Aspekte der Zugvorbereitung zu kontrollieren ist die Nutzung von kamerabasierten Systemen. Für die Prüfung der Transportsicherung, die Prüfung von offensichtlichen Schäden, sowie der Profilvermeidung können diese herangezogen werden. Dies kann entweder durch stationäre Anlagen am Boden oder durch Drohnen aus der Luft erfolgen.

### ***Tracking&Tracing***

Auch wenn in dieser Studie nicht explizit erwähnt, stellt die Laufleistungserfassung sowie die Lokalisierung eine Schlüsseltechnologie dar. Sobald Laufleistungsinformationen und Instandhaltungsdaten in Zusammenhang gebracht werden können. Kann auch die Instandhaltung verbessert oder zumindest besser geplant werden. Ein damit einhergehender verbesserter Zustand der Güterwagen ist auch im Sinne der WU.

## **9.3 Technologische Unsicherheiten**

Es wurde bereits im Abschnitt 7.1 erwähnt, dass der Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten eine besondere Bedeutung zukommt, hier aber gleichzeitig gegenwärtig sehr wenig Wissen vorhanden ist. Momentan ist das „normale“ Betriebsverhalten von Güterwagen während der Fahrt relativ unbekannt. Entsprechend schwer ist es, abnormales Verhalten von normalem Verhalten zu unterscheiden. Auch für eine Zuordnung einer potenziellen Ursache zu einem abnormalen Verhalten gibt es momentan eine nicht ausreichende Wissensgrundlage. Folglich ist es zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, Merkmale, Trends und Grenzwerte in der Weise festlegen zu können, dass darüber die Frage „Ist das Schutzziel erfüllt?“ beantwortet werden kann. Gemäß den obigen Ausführungen ist es somit ebenfalls noch nicht möglich, Technologien abschließend festzulegen, da es hier starke Wechselwirkungen geben kann.

Es wird daher vorgeschlagen, parallel zum Einsatz der Schlüsseltechnologien Mess- bzw. Simulationenkampagnen durchzuführen, um dem Ziel der Definition von Merkmalen, Trends und Grenzwerten näher zu kommen. Neben der Messung des Spektrums des normalen Betriebsverhaltens können Simulationen und/oder Versuche gezielt einzelne Fehler abbilden, etwa den Bruch einer Primärfeder. Mit Hilfe

der Simulations- bzw. Messdaten können dann Veränderungen in beispielsweise dem Beschleunigungsverhalten erkannt werden. Wenn bekannt ist, wonach gesucht werden muss, kann auch die Technologie entsprechend ausgewählt werden.

#### **9.4 Interessenkonflikte**

Aufgrund der vielen Akteure im Bahnwesen gibt es oftmals Interessenkonflikte zwischen Wagenhalter den Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie den Eisenbahninfrastrukturbetreibern. Bezüglich der Wagentechnischen Untersuchung trifft dies vor allem auf die Zustandsdiagnose der Wagen zu. Es wurden Technologien der streckenseitigen Überwachung und der On-Board Diagnose genannt. Bei jeder Variante existieren Abhängigkeiten und unterschiedliche finanzielle Interessen.

Eine streckenseitige Überwachung hat für das EVU den Vorteil, dass die WU ein Stück weit unabhängig vom Mitwirken der Wagenhalter ist. Prinzipiell können Züge unabhängig von der Herkunft der eingestellten Wagen untersucht werden. Bei einer streckenseitigen Überwachung sind die EVU und die Wagenhalter aber abhängig von den Daten der EIU bzw. dritter Anbieter, um die WU zu digitalisieren. Weiterhin könnte das EIU zwar ein Interesse am Verkauf von Daten haben, gleichzeitig ist die Ausrüstung des Netzes mit der für die digitale WU erforderlichen Dichte aber möglicherweise für das EIU nicht immer wirtschaftlich. Andererseits sichert das EIU die Verfügbarkeit seiner eigenen Infrastruktur, indem das Rollmaterial überwacht wird. Ob der letztgenannte Aspekt schwer genug wiegt, dass eine Verdichtung der streckenseitigen Einrichtungen unabhängig vom finanziellen Aspekt des Datenverkaufs erwogen wird, ist unbekannt.

On-Board Diagnosesysteme sind zum Teil im Interesse der Wagenhalter. Zum einen haben diese dann bessere Kenntnisse über den Zustand und die Laufleistung ihrer eigenen Güterwagen, als es unter Umständen mit streckenseitigen Systemen möglich wäre. Dies ermöglicht dem Wagenhalter die Optimierung der Instandhaltung seiner Wagen. Zum anderen ermöglicht es dem Wagenhalter, die Daten an die EVU verkaufen. Für das EVU bedeutet es aber, dass eine digitale WU an einem Zug nur dann möglich ist, wenn alle Wagen im Zug mit einer entsprechenden Technik ausgerüstet sind. Ein einziger nicht ausgerüsteter Wagen im Zug könnte einen Wagenmeister erforderlich machen.

Eine weitere offene Frage ist die nach dem Besitz und der Verfügbarkeit der Daten. Wem gehören die Daten und wer erhält wann welche Daten? Welche Informationen wollen EIU und Wagenhalter dem EVU geben? Was braucht das EVU zwingend zur Gewährleistung einer sicheren digitalen WU und was bietet „nur“ Mehrwert für die Planung der Betriebsabläufe und Standzeiten?

## 9.5 Handlungsempfehlungen

Aus den vorangegangenen Betrachtungen ging hervor, dass es in vielen Bereichen viel Handlungsbedarf gibt. In diesem Abschnitt werden einige wichtige Schritte vorgestellt.

Beschleunigungssensoren am Güterwagen wurden als potentielle Schlüsseltechnologie, welche noch nicht ausgereift ist, identifiziert. Es ist zu empfehlen in diesen Bereich zu investieren und mittels Simulationen und Versuchen das Potential zu ermitteln. In Simulationen von Güterwagenfahrten auf Gleisen mit gemessener realer Gleislage können extreme Fehler, wie z.B. Federbruch, Flachstellen oder diverse Verschleißzustände nachgebildet werden. Die daraus resultierenden Beschleunigungen können dann zur Charakterisierung der Signale und zur optimalen Positionierung von Beschleunigungssensoren genutzt werden. In Feldversuchen können reale Signale untersucht werden, um herauszufinden was charakteristisch für den Normalzustand ist und ob es diesen überhaupt gibt. Ebenso kann geprüft werden, ob es einen typischen „Gut-“ oder „Schlechtzustand“ gibt, ob Fahrtrichtung, Beladungszustand oder außergewöhnliche Ereignisse, zum Beispiel Infrastrukturschäden oder Ladegutverschiebungen, erkannt werden können. Ebenso kann in Langzeitversuchen ermittelt werden, ob sich auftretende Fehler (z.B. Federbruch) vor dem Versagensfall erkennen lassen.

Ein weiterer Schritt könnte eine „Güterwagenobservierung“ mit dem Hintergrund der Identifikation des Nutzes der Datenhaltung sein. Die zentrale Frage hierbei ist, was aus dem Auswerten aller heute schon verfügbaren Daten eines Güterwagens gelernt werden kann. Dabei geht es um Historie verstehen und Zukunft prognostizieren.

Ebenso scheint ein Pilotprojekt digitale WU sinnvoll, um zu prüfen, was heute schon geht und was noch nicht. Mittels einer punktuellen Lösungsfindung an einer repräsentativen Ladestelle könnte schrittweise eine Reduktion des WU-Aufwandes erzielt werden. Beispielsweise könnte der in Abschnitt 8 genannte Einsatz von automatisierten Kamerasystemen auf diese Art erprobt werden.

Auch der Güterwagen ist noch nicht zu Ende entwickelt. Deshalb kann mithilfe einer systematischen Schadendatenanalyse und einer separaten Kundenbefragung der Güterwagen optimiert werden. Hiermit ist eine praxistaugliche Optimierung von Güterwagen zur Verringerung von Wartungsaufwänden wie z.B. Schutz der Umstellvorrichtungen gemeint. Dabei geht es darum, aus Fehlern zu lernen und Fehlerursachen systematisch abzustellen, anstatt sie nur immer wieder aufs Neue zu detektieren.

Als letzter Vorschlag gilt es, eine Neuordnung der Instandhaltung zu prüfen. Die Machbarkeit einer Reformierung der Instandhaltung unter Einbeziehung der WU als Teil der Instandhaltung und somit Aufgabe der Wagenhalter sollte systematisch untersucht werden. Auch der Einfluss der zukünftig vorhandenen Daten auf den gesamten Instandhaltungsprozess und die Instandhaltungsintervalle gemäß VPI

---

kann in diesem Zusammenhang untersucht werden. Hierbei sollten die Erfahrungen aus der Instandhaltung bei der Luftfahrt einfließen. Weiterhin sollte in diesem Kontext auch untersucht werden, ob es analog zur Radsatzwelle auch andere Komponenten am Güterwagen gibt, welche nur innerhalb von Revisionen geprüft werden können und dadurch explizit aus der WU ausgeklammert werden können (siehe hierzu auch „Sicherheitsmanagementsystem bei der Instandhaltung“ im Abschnitt 7).

## 10. Zusammenfassung

Aus den Vor-Ort-Besuchen in der Schweiz und in Deutschland konnten wichtige Erkenntnisse für die Notwendigkeit der heutigen Form sowie für die Entwicklung einer digitalen WU erlangt werden. Wesentlichste Punkte hierbei waren

- die sehr ausgeprägte Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen, welche nur Aufwendig durch Technologien zu ersetzen ist
- die Erkenntnis, dass eine Teilentlastung und somit ein entfallen einzelner Prüfpunkte der WU keine Zeitersparnis mit sich bringt. Erst ab einem gewissen Digitalisierungsgrad werden Vorteile generiert.
- dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern in Abhängigkeit von der Güterwagenkonstruktion wegen der Einsehbarkeit von Komponenten stark schwankt.

Im Rahmen der Schaddatenanalyse konnten fast 245.000 Schadmeldungen von 95.500 Güterwagen ausgewertet werden. Es konnte dabei festgestellt werden, dass jeder erfasste Wagen im Schnitt dreimal in den Datenbanken auftauchte. Quantitativ dominieren das Laufwerk, das Bremssystem und der Wagenkasten bei den schadhafte Baugruppen. Bei der Bewertung der Fehlerschwere beziehungsweise der Folgen eines Fehlers, stellte sich heraus, dass circa 10 % aller schadhafte Wagen ausgesetzt werden müssen. Bezogen auf Güterzüge bedeutet dies, dass in 14,6 % aller Güterzüge mindestens ein beschädigter Wagen eingereicht ist. Der Anteil der Wagenzüge an denen Aussetzungen vorgenommen werden müssen, beträgt in diesem Fall circa 1,8 %.<sup>12</sup>

Abseits des Bahngeschehens wurde die Instandhaltung der Luftfahrt vorgestellt und mit der der Güterbahnen verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass bei der Luftfahrt ein System, das dem heutigen Verfahren der Bahn sehr ähnlich war, für eine wirtschaftlichere und sichere Instandhaltungsform aufgegeben wurde. Unter anderen deshalb, weil ermittelt wurde, dass 89 % aller Bauteile keine Korrelation zwischen Nutzungsdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit haben und somit Hard-Time Limits für Instandhaltungsmaßnahmen keinen Mehrwert abbilden. Heutzutage verfolgt die Luftfahrt einen funktionsorientierten Ansatz analog zur Schutzzieldefinition dieser Studie. Es gibt zudem keine Analogie zur WU in der Form. Vielmehr sind alle Untersuchungen, auch Sichtkontrollen, fest im Instandhaltungsprozess verankert und dokumentiert.

---

<sup>12</sup> Basierend auf der Annahme, dass 50.000 Güterwagen täglich in Deutschland und der Schweiz einer Wagentechnischen Untersuchung unterzogen werden und ein durchschnittlicher Güterzug aus 30 Wagen besteht.

Auf dem erwähnten funktionsorientierten Ansatz basieren die im Rahmen dieser Studie identifizierten Schutzziele für eine digitale WU, die die Funktionen eines Güterwagens widerspiegeln. Folgende Schutzziele konnten hierbei identifiziert werden:

- Führung des Fahrzeuges im Gleis
- Verzögerungsverhalten
- Zugbildung ermöglichen
- Verfügbarkeit des Transportgefäßes
- Funktion der Bahnbetriebshilfsmittel

Diese Schutzziele muss ein Güterwagen erfüllen um zu 100 % einsatzbereit zu sein. Den Schutzzielen wurden physikalische Größen und diesen wiederum existierende oder potentiell nutzbare Technologien zugeordnet. Es fällt dabei auf, dass deutlich mehr streckenseitige Diagnosesysteme kommerziell verfügbar sind, als On-Board Lösungen. Verfügbare Systeme inkl. Zuordnung zu den Schutzzielen finden sich im Anhang A.

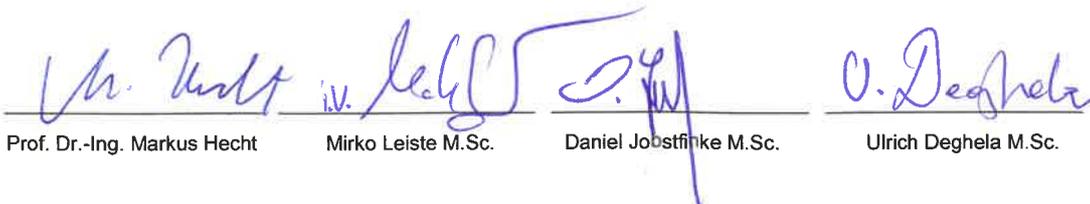
Bei der Wahl der Technologien hat sich ein Interessenkonflikt zwischen den Wagenhaltern, EIU und den EVU herauskristallisiert. Je nachdem wer in Zukunft die Daten erhebt, hat die Kontrolle über diese und die anderen Akteure im Bahnwesen geraten folglich in eine Abhängigkeit.

Dennoch konnten einige Technologien identifiziert werden, mit denen die Digitalisierung der WU entscheidend vorangetrieben werden kann. Dies sind im Wesentlichen die:

- automatisierte Bremsprobe
- digitale Wagenidentität/ Wagenanschriften
- Beschleunigungen im Fahrwerk/Wagenkasten
- Tracking&Tracing
- Kamerabasierte Systeme mit Merkmalerkennung

Neben der optimierten Zugvorbereitung generiert die Digitalisierung der WU weitere Vorteile. Sie ermöglicht einen Akteur übergreifenden Lernprozess. Wie bei der Luftfahrt können Fehlerursachen systematisch abgestellt werden. Durch die erweiterten Zustandsinformationen, die durch die genannten Technologien über den Güterwagen verfügbar sind, könnte die Instandhaltung neugeordnet werden. Die großen Instandhaltungen sowie die festen Intervalle gemäß VPI könnten dann im Rahmen einer zustandsorientierten Instandhaltung optimiert werden.

Berlin, den 03.08.2018



Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Mirko Leiste M.Sc.

Daniel Joostfinke M.Sc.

Ulrich Deghela M.Sc.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesgesetz, „Allgemeines Eisenbahngesetz,“ letzte Änderung: 20. Juli 2017, ursprüngliche Fassung: 29. März 1951.
- [2] Bundesrechtverordnung, „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung,“ Letzte Änderung: 26. Juli 2017, ursprüngliche Fassung: 4. November 1904.
- [3] Bundesgesetz, „Eisenbahngesetz (Schweiz),“ ursprüngliche Fassung: 20. Dezember 1957, letzter Stand: 1. Januar 2018.
- [4] Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems, „Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung - TEIV,“ letzte Änderung: 12. Mai 2016, Ausfertigungsdatum: 05.07.2007.
- [5] SBB Cargo, „Berufsbild Technische/r Kontrolleur/in bei der SBB Cargo,“ [Online]. Available: <https://www.sbbcargo.com/de/unternehmen/bei-sbb-cargo-arbeiten/berufserfahrene.html>. [Zugriff am 02.08.2018].
- [6] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV Schriften 758, Prüfen von Güterwagen im Eisenbahnbetrieb,“ Ausgabe 03/2009.
- [7] Schweizerische Eisenbahn, „Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV (R300.1-.15),“ Bundesamt für Verkehr, Bern, 2016.
- [8] DB Schenker Rail, „Richtlinie 936, Technische Wagenbehandlung im Betrieb (Güterwagen),“ DB, 2015.
- [9] Cargo SBB CFF FFS, „Weisung: Handbuch für den technischen Wagendienst, Dok.Nr.: G-32550,“ Neuauflage: 01.11.2015.
- [10] Cargo SBB CFF FFS, „Weisung: Zugbildung bei Cargo, Dok Nr.: G-32728,“ Freigabe: 28.06.2016.
- [11] Wagons GCU General Contract of Use for, „Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV),“ Bruxelles, 1. Juli 2006.
- [12] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Schrift 757, Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen,“ 2016.
- [13] DB Systemtechnik, „Richtlinie 915, Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen“ Aktualisierung 8, gültig ab 11.12.2016.
- [14] SBB, „Blog SBB Cargo,“ SBB, [Online]. Available: <https://blog.sbbcargo.com/22441/mobile-wagenkontrolle/mobwk/>. [Zugriff am 02.08.2018].
- [15] Spiegel Online, [Online]. Available: <http://www.spiegel.de/fotostrecke/wagenmeister-bei-der-deutschen-bahn-ueberprueft-sicherheit-von-waggons-fotostrecke-118752-12.html>. [Zugriff am 03.08.2018].

- 
- [16] M. Meyer und M. Lerjen, „Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen und Flugzeugen – ein Vergleich,“ *Eisenbahn-Revue*, S. 130 - 133, 03 2018.
- [17] M. Hinsch, *Industrielles Luftfahrtmanagement - Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe* (2. Aufl.), Heidelberg, Berlin: Springer, 2012.
- [18] M. Hinsch und J. Olthoff, *Impulsgeber Luftfahrt - Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau - und Ablaufkonzepte*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [19] H. Kinnison und T. Siddiqui, *Aviation Maintenance Management* (2. Aufl), New York u.a.: McGraw Hill, 2013.
- [20] S. P. Ackert, „Basics of Aircraft Mainenance Programs for Financiers,“ 2010. [Online]. Available: [http://aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/basics\\_of\\_aircraft\\_maintenance\\_programs\\_for\\_financiers\\_\\_\\_v1.pdf](http://aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/basics_of_aircraft_maintenance_programs_for_financiers___v1.pdf). [Zugriff am 25 07 2018].
- [21] M. Hinsch, „MSG-3, Eine Einführung in die Bestimmung grundlegender Instandhaltungsmaßnahmen bei Verkehrsflugzeugen,“ 2011. [Online]. Available: <https://aeroimpulse.de/wp-content/uploads/2016/05/MSG-3-Einfuehrung.pdf>. [Zugriff am 25 07 2018].
- [22] H. Gerhard, „Implementation of Wayside Monitoring: ZLCP – Checkpoints,“ WTMS Konferenz, Berlin, 2018.
- [23] WASCOSA , „Die AVV-Digitalisierungsoffensive,“ *WASCOSA Infoletter*, S. 9, 29 Juni 2018.

---

## Anhang A – Verfügbare Technologien

Die folgende Tabelle listet verfügbare Technologien inkl. Anbieter den Schutzziele zu. Dabei wird in den beiden grünen Spalten nach direkten und indirekten physikalischen Größen unterschieden.

On-Board Systeme sind in der Tabelle **gelb hinterlegt**.

Unterschatzziel/ Schutzfunktion	mögliche Fehlerursache	Physikalische Größe direkt	Methode	Produkt \ Anbieter	Physikalische Größe indirekt	Methode	Produkt/ Anbieter
Führung des Fahrzeuges im Gleis							
Übertragung der Vertikal- und Querkräfte & Schwingungsverhalten	Unzureichende Aufstandskräfte und Instabiler Fahrzeuglauf durch Primärfederbruch, Strukturversagen, Flachstellen, Exzentrizität, Ovalität, singuläre Abplattung, Polygone, geometrische Abweichungen der Radlaufläche, asymmetrischer Beladung, Überlastung, Lagerschaden, und Heißläufer	Vertikal- und Querkräfte am Rad oder am Gleis	Auswertung der über DMS an der Schiene gemessenen vertikalen und horizontalen Radkräfte	Argos-System/ HBM	Beschleunigungen am Gleis	Auswertung der gemessenen Beschleunigungen am Gleis/ Anregungen der Schiene	Controlguide Cmobile/ Siemens
				ATLAS-FO/ voestalpine SIGNALING			Flachstellendetektoren/ Sawy Telematic Systems
			Auswertung der über DMS an der Schiene gemessenen vertikalen und horizontalen Radkräfte	Hunting Truck Detector/ LBFoster	geometrische Abweichungen des Soll-Zustandes	optische Messung und Bildverarbeitung	mermec
				Truck Performance Detector/ TTCI			Cracked Wheel/ TTCI
				Mess- und Prüfsystem / PRODAT RKM-S	Beschleunigungen am Laufwerk		VarOBU/ AIS Automation
							Wheel Detector/Beena Vision
							Axletronic/ SKF
							Phoenix MB/ voestalpine SIGNALING
			Auswertung der Radkräfte am Laufwerk		Temperatur des Lagers	Messung und Auswertung der Temperaturentwicklung im Lager	Waggon Tracker ADV/ PJM
							IONX/AmstedRail
							Lenord + Bauer
							LLYZ3/ Franz Kaminski
							FAG/Schaeffler
							Controlguide/ Siemens
					Schall	akustische Auswertung des Schalles	Acoustic Bearing Detector/ apnatech

Unterschiedsziel/ Schutzfunktion	mögliche Fehlerursache	Physikalische Größe direkt	Methode	Produkt \ Anbieter	Physikalische Größe indirekt	Methode	Produkt/ Anbieter
<b>Verzögerungsverhalten</b>							
Sicherstellung des Bremsweges	Keine Bremswirkung durch defektes Bremsgestänge; Abnutzung der Bremssohlen,- Beläge und -Scheiben; defekte oder falsch gekuppelte Bremsleitungen; fehlender oder defekter Klotz	Verzögerung des einzelnen Fahrzeuges			Bremszylinderdruck, Kraft im Gestänge		
Halten der Geschwindigkeit		wirkendes Reibmoment			geometrische Abweichungen des Soll-Zustandes	optische Messung und Bildverarbeitung	mermec Railwatch Calipi/ Nexitsense Brake Detector/ Beena Vision VarOBU/ AIS Automation Wheel Detector/Beena Vision
Schutz des Laufwerks	Thermische Überlastung des Rades durch Bremse	Temperatur der Radscheiben	Erstellung und Auswertung der 3D-thermografischen Bilder der abgetasteten Räder und / oder Scheiben	Phoenix MB/ voestalpine SIGNALLING	Bremszylinderdruck, Kraft im Gestänge		
Festlegen des Fahrzeuges	Feste Bremse	wirkendes Reibmoment					WaggonTracker ADV/ PJM
Indirekte Bremswirkung gewährleisten	Feststellbremse defekt	Festhaltekraft			Stellung des Hamrades	Winkelstellung ermitteln und auswerten	RaVeM/ System7 IONX/AmstedRail Controlguide/ Siemens
	HLL geht nicht durch	Druckveränderung am letzten Fzg (Absenkung und Steigerung)					
<b>Zugbildung ermöglichen</b>							
Medien verbinden	Luftkupplung oder E-kupplung nicht in Ordnung	Durchgang der Medien eingeschränkt (Druckabfall)			geometrische Abweichungen des Soll-Zustandes	Bildverarbeitungssystem mit digitaler Hochgeschwindigkeits- Zeilenkamera (Luft- und Schraubenkupplung)	Beena Vision
Schwingungsverhalten in Längsrichtung	Pufferstößel verklemmt Kupplungsabriss\ ungekuppelt Schraubenkupplung lang	Beschleunigung des Wagenkastens			Pufferwege, Kräfte an der Struktur HLL Druck fällt ab		AMRA/ Bosch CarlLoc/ Fela Fleetmonitor/ Yellowfish IONX/ AmstedRail WaggonTracker A DV/ PJM Nexiot Asto Telematics Cognid Sawy Telematic Systems Controlguide Siemens
Auflaufstoßverhalten in Längsrichtung	Hohe Stoßbelastungen, Pufferteller deformiert	Pufferwege und -Kräfte/ Energieaufnahme der Puffer			Beschleunigung des Wagenkastens	Stoßererkennung	

Unterschiedsziel/ Schutzfunktion	mögliche Fehlerursache	Physikalische Größe direkt	Methode	Produkt \ Anbieter	Physikalische Größe indirekt	Methode	Produkt/ Anbieter
<b>Verfügbarkeit des Transportgefäßes</b>							
Be-/Entladbarkeit	Ladetür klemmt	Sensorik zur Merkmalserkennung	Überwachung des Türöffnungszustandes durch ein Entfernungssensor	Bosch Asto Telematics AmstedRail Siemens			
Transportsicherung	Ladung ungleichmäßig	T-Druck, Q-Kraft, Lagesensor	Druckmessung	Perpetuum LLVZ3/ Franz Kaminski Asto Telematics			
	Offene Luke	"Verschluss"-Sensor		Ionix			
Profilfreiheit	Ladung ragt ins Profil/Rungen verbogen	Abstands-messung optisch	Bildverarbeitungssystem mit digitaler Hochgeschwindigkeits-Zeilenkamera	TrainView/ Beena Vision	Beschleunigung/ Schlagerkennung	Schlagerkennung durch Auswertung der Beschleunigungen aus den Anregungen	Dragging Equipment Detector/ voestalpine SIGNALING
Schutz vor elektrischem Schlag	Erdungskabel abgerissen	Widerstand					
Funkenschutz	Funkbleche fehlen und es besteht Funkengefahr (Grauguss plus Holzboden)		Messung des Lichtraumprofils	mermec			
<b>Funktion der Bahnbetriebsmittel</b>							
Bedienbarkeit während des Rangierens	Rangiertritt verbogen	ggf. Kamerasysteme mit Merkmalserkennung	Elektromagnetische Wellen (RFID)	RFID/ Transcore			
	Wagennummer nicht lesbar, Wagenreihung	RFID, NFC, QR Codes, optische Systeme	Optische Zuguntersuchung Wagenreihung	Cargo/ Zedas Railwatch VarOBU/ AIS Automation			
Information zu Beladungs-möglichkeiten/Nutzungs-einschränkungen	Anschriften nicht lesbar						