
DISS ETH NO. 21473

Prognose der Dauer von Störungen des Bahnbetriebs

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

STEFFEN SCHRANIL

Diplom-Ingenieur, TU Dresden
geboren am 30. Dezember 1984
in Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Ulrich Weidmann

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

2013

Zusammenfassung

Die Spurgebundenheit der Bahnsysteme führt zu einer komplexen Betriebsführung, die sich insbesondere im Störfall offenbart. Diese Arbeit soll gemäss der übergeordneten Forschungsfrage zum besseren Umgang mit prinzipiell unvermeidbaren Bahnstörungen beitragen. Besonders in hoch belasteten Bahnnetzen kommt der Bahnbetriebsführung eine Schlüsselrolle zu. Daher war es ein erstes Teilergebnis, einen generischen Störungsbegriff zu entwickeln, auf dessen Grundlage das Störungsgeschehen in den verschiedenartigen Bahnsystemen konsistent beschrieben werden kann.

Eine jede Störungsprognose setzt eine Ereignisdiagnose voraus und muss mit verbleibenden Unsicherheiten adäquat umgehen. Der Informationsstand wird im Ereignisverlauf fortlaufend nachgeführt. Je zuverlässiger Prognosen im Störfall erfolgen, umso grösser wird die Beherrschbarkeit etwaiger Ereignisse und umso geringer fallen ihre betrieblichen Folgewirkungen aus. Gleichzeitig lassen sich die Unannehmlichkeiten für die Endkunden minimieren. Dies trägt zur weiteren Attraktivitätssteigerung von Bahnsystemen bei.

Diese Dissertation entwickelt ein generisches Verständnis von betrieblichen wie technischen Störereignissen, unabhängig von der jeweiligen technischen und betrieblichen Ausgestaltung des Bahnsystems. Der Einsatz von ungeplanten Ressourcen ist zentraler Gegenstand des Störungsverständnisses: Störungen werden daher als unerwartete Änderung des Ressourceneinsatzes aufgefasst.

Abstrahiert man die Bahnproduktion, so treten starke Ähnlichkeiten in Bezug auf die Industrieproduktion zu Tage. Es lassen sich in dieser Betrachtung Analogien zu anderen Wissenschaftsdisziplinen aufzeigen und für die Methodenwahl synergistiftend nutzen. Diese Abstraktion unterstützt die Störungsanalyse ebenso wie die Evaluation möglicher Entstörungsvarianten. Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit trifft an vielen Stellen bewusst konzeptionelle Aussagen zur Ableitung der geeigneten Aspekte für die Störungsprognose. Umfangreiche Fallstudien verifizieren die Aussagen der einzelnen Kapitel mit empirischem Datenmaterial diverser Bahnsysteme. Hinter dem realen Störungsgeschehen werden stochastische wie prozessuale Muster herausgearbeitet.

Die Kombination aus statistischen Analysen und prozessualen Aspekten ermöglicht die Einbindung konkreter Einzelinformationen in die Störungsprognose. Eine ständige Kalibrierung der Prognoseergebnisse mit zusätzlich gewonnenem Wissen bleibt bis zur erfolgreichen Rückführung in den Regelbetrieb erforderlich. Als Folgeprozesse der Prognose werden die betriebliche Disposition, die technische Intervention und die Ereigniskommunikation sowohl innerbetrieblich als auch gegenüber dem Endkunden herausgearbeitet sowie im Prognosekontext vertieft. Das Aufstellen eines generischen Prognoseprozesses nebst dem Aufzeigen dazu erforderlicher Inputparameter rundet diese Dissertation ab.

Abstract

The guiding device of railway systems leads to a complex operational management, particularly shown in cases of disturbances. According to the overarching research question this work aims to contribute to better deal with in general unavoidable rail operation disturbances. Especially in highly loaded rail networks, railway operations management gets a key importance. Therefore, it was a first research result to develop a generic understanding of disturbance term that can be used to consistently describe various disturbances in different railway systems.

Each disturbance forecast assumes a diagnostic event and has to deal adequately with remaining uncertainties. The information level becomes continuously increased during the event history. The more reliable disturbance forecasts occur, the greater the incident controllability and the less their operational consequences. In getting this, inconvenience of the end users can be minimized. This contributes to further increasing the attractiveness of rail systems.

This thesis develops a generic understanding of operational and technical fault events regardless of the technical and operational development of the rail system. The unplanned use of resources is the central purpose of disturbance understanding: disturbances are considered as an unexpected change in the use of resources.

The abstraction of rail operation management offers strong similarities concerning the industrial production. This approach shows analogies with other scientific disciplines and allows using synergies for the choice of methods in this analysis. Therefore the abstraction supports fault analysis as well as the evaluation of possible interference suppression variations. The present research work gives many conceptual statements to derive the appropriate aspects of the disturbance forecast. Larger case studies verify the statements of each chapter with empirical data material of various rail systems. Behind the real disturbance events stochastic and procedural patterns are worked out.

The combination of statistical analyzes and procedural aspects allows the integration of specific information items in the disturbance forecast. A permanent calibration of the forecast results with additional acquired knowledge is required to successfully return to scheduled operation. Operational dispatching, technical intervention as well as the internal and customer event communication are identified as the central outcome processes and deepened in forecasting context. The conception of a generic forecasting process in addition to demonstrating the required input parameters concludes this thesis.

Danksagung

Als erstes danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Ulrich Weidmann (ETH Zürich) dafür, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, am Lehrstuhl wissenschaftlich tätig zu sein, mich weiterzuentwickeln und diese Dissertation zu verfassen. Seine unverwechselbaren generisch-konzeptionellen Ansätze haben wesentlich den Charakter der Arbeit geprägt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan (TU Dresden) danke ich für die Übernahme des Korreferats. Durch diese Konstellation konnte die Verbindung in die nicht nur geografische Heimat bestehen. Für akademische Inputs danke ich zudem Frau Dr. Hammer (TU Dresden) und Herrn Dr. Bruckmann (ETH Zürich).

Besonders wichtig war mir der Praxisbezug. Herrn Dr. Grossenbacher (SBB Infrastruktur) sei allen voran die grosszügige Unterstützung des Forschungsvorhabens gedankt. Durch ihn entstanden weitere Kontakte im Umfeld des Betriebs, so zu Stefan Strässle und Stefan Unterberger. Weiterhin konnten die DB Netz Südost (Niklas Angermair), die BLS Netz (Markus Seibel und Martin Wyss) sowie die City-Bahn Chemnitz (Gert Schleicher) für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. Im Stadtbahnbereich kamen die Dresdner Verkehrsbetriebe (Ulrich Funk, Jens Thiede und Dietmar Jäger) sowie die Städtischen Verkehrsbetriebe Zwickau (Sarah Fretter und Frank Hahndorf) als Forschungspartner hinzu. Die praktische Spiegelung der akademischen Überlegungen habe ich extrem geschätzt und danke dafür auf das Herzlichste. Den weiteren Fachkollegen, welche am Ende dieser Arbeit aufgeführt sind, danke ich ebenso für die gute Zusammenarbeit.

Meinen IVT-Kollegen verdanke ich die angenehme Zeit auf dem Hönningerberg. Ich habe die Zusammenarbeit mit Euch allen sehr geschätzt! Insbesondere seien Marcus Rieder als Staatswissenschaftler meines Vertrauens, Hermann Orth vom befreundeten Verkehrsträger sowie Michael Schwertner, Ernst Bosina und Silko Höppner für manch optimistisches 15-Uhr-Gespräch dankend erwähnt.

Im Persönlichen gebührt ein ganz grosses Dankeschön meiner Freundin Anne Lademann für ihre Liebe und Treue, ihre Geduld, in vollen Zügen Ideen zur Störungsprognose zu diskutieren sowie manch aufmunterndes Wort zu den „Lagebesprechungen“. Weiterhin danke ich Jürg Schöning für die ausgedehnten Er-Fahrungen und Diskussionen in, um und über die Bahnen dieser Welt. Ohne ihn wäre mein Leben um einen sehr guten Freund ärmer. Ebenso danke ich Torsten Schrötter, Michael Mucha, Peter Pauker, Andreas Jäckel und Florian Menius für die langjährige Freundschaft, den Austausch und die zahlreichen Unternehmungen hier- und dortzulande.

Bisher unerwähnt blieben meine lieben Eltern. Ihnen verdanke ich, dass ich meinen bisherigen Weg so finden konnte, wie ich es getan habe. Manch guter Ratschlag und manches abendliche Telefonat haben dazu ganz wesentlich beigetragen.

Diese Arbeit ist meiner Mutter Anita Schranil gewidmet.

Inhalt

	Seite
1 Einführung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Forschungsziel	3
1.3 Struktur dieser Dissertation	6
2 Grundlagen und Problemstellung.....	7
2.1 Spurgebundene Systeme (Bahnen).....	7
2.1.1 Wesen spurgebundener Systeme als Teil der Verkehrssysteme.....	7
2.1.2 Ausprägungen spurgebundener Systeme	11
2.1.3 Relevanz für die Störungsprognose	14
2.2 Ressourcenbasierte Störungsdefinition	16
2.2.1 Normen- und Branchensicht auf Störungen.....	16
2.2.2 Ressourcenorientierung und Störungsdefinition	17
2.2.3 Systemleistungsfähigkeit im Störfall	18
2.2.4 Rolle der Verspätungen	19
2.3 Akteure im Störungsgeschehen	21
2.3.1 Systematik von Störereignissen	21
2.3.2 Elementare Bahnsystemakteure	22
2.3.3 Elementarprozesse im Umgang mit Störereignissen.....	23
2.4 Störungsverständnis in anderen Fachgebieten	25
2.4.1 Abstraktion von Störereignissen.....	25
2.4.2 RAMS-Betrachtung für Störereignisse.....	26
2.4.3 Störereignisse in der (Industrie-) Produktion	27
2.4.4 Störungswahrnehmung in der Verkehrspsychologie.....	33
2.5 Zwischenfazit zum Kapitel 2.....	36
3 Methodisches Konzept.....	37
3.1 Ressourcenorientierte Betrachtung	37
3.1.1 Ressourcenansatz	37
3.1.2 Ressourcen in der Bottom-Up-Betrachtung.....	38
3.1.3 Ressourcen in der Top-Down-Betrachtung.....	40
3.2 Fallstudien in diversen Bahnsystemen	41
3.2.1 Zielsetzung und Einteilung der Fallstudien	41
3.2.2 Stichprobenumfang der Fallstudien	43
3.2.3 Fallstudien der Knotenpünktlichkeit.....	44
3.2.4 Konzipierte Fallstudien mit den Forschungspartnern.....	46

3.3	Stochastikinversion und Quantilbetrachtung	53
3.3.1	Dichte, Verteilung und Quantile	53
3.3.2	Berechnungen mittels adaptierten Exponentialverteilungen	56
3.3.3	Berechnungen mittels Normalverteilung	57
3.3.4	Umkehrung der Inversion	59
3.4	Methoden der Variantenevaluation.....	61
3.4.1	Parameterbewertung mittels ABC-Analyse	61
3.4.2	Zusammenführen von Bewertungen	62
3.4.3	Standardisierte Bewertung	63
3.5	Zwischenfazit zum Kapitel 3.....	65
4	Analyse von Störungsarten	66
4.1	Prozessanalyse der Bahnproduktion	66
4.1.1	Generischer Störungsablauf	66
4.1.2	Prognoserelevante Anforderungen und Zeiten.....	69
4.1.3	Datenlage für das Störungsmonitoring.....	71
4.1.4	Motivationen und deren Hierarchie	73
4.2	Analyse mittels Bottom-Up-Betrachtung	75
4.2.1	Analyseansatz der Bottom-Up-Betrachtung	75
4.2.2	Klassifizierungsregeln der Bottom-Up-Betrachtung.....	75
4.2.3	Klassifizierungsschema der Bottom-Up-Betrachtung	77
4.3	Analyse mittels Top-Down-Betrachtung	79
4.3.1	Analyseansatz der Top-Down-Betrachtung.....	79
4.3.2	Klassifizierungsregeln der Top-Down-Betrachtung	79
4.3.3	Klassifizierungsschema der Top-Down-Betrachtung.....	81
5	Analysen von Störungsdaten	82
5.1	Distance zur Eruierung relevanter Ereignisklassen	82
5.1.1	Analyse des Störungseintritts als Risiko	82
5.1.2	Begriff der (Disturbance) Distance	83
5.1.3	Eindimensionales Ranking der Störungsschwere (Kritikalität).....	85
5.2	Fallstudienresultate.....	87
5.2.1	Ergebnisse der Fallstudien zur Knotenpünktlichkeit	87
5.2.2	Ergebnisse der Fallstudien mit den Praxispartnern	94
5.2.3	Schlussbemerkungen zu den Fallstudien.....	110
5.3	Quantilevaluation	111
5.3.1	Anforderungen an Quantile.....	111
5.3.2	Prognosefähigkeit, Prognosekennzahl und Störungsquantil	114
5.3.3	Stetige Quantilermittlung	120
5.4	Zwischenfazit zum Kapitel 5.....	122

6	Beheben von Störungen	123
6.1	Betriebliche Störungsbehebung (Disposition)	123
6.1.1	Elementare Dispositionsmaßnahmen	123
6.1.2	Quantifizierung der Dispositionsmaßnahmen.....	125
6.1.3	Evaluation von Einsatzkriterien der Dispositionsmaßnahmen	132
6.1.4	Rückführung in den Regelbetrieb.....	138
6.2	Technische Störungsbehebung (Intervention).....	140
6.2.1	Interventionsstrategien.....	140
6.2.2	Interventionsprozess und dessen Quantifizierung	141
6.2.3	Interventionsdaten in den Fallstudien.....	143
6.3	Ereigniskommunikation	155
6.3.1	Innerbetriebliche Meldekettens im Ereignisfall	155
6.3.2	Informationsbedürfnis des Endkunden	165
6.3.3	Information und Kommunikation im Ereignisfall.....	166
6.4	Zwischenfazit zu Kapitel 6	170
7	Prognoseprozess im Störfall	171
7.1	Ansatz und Inputs für den Prognoseprozess	171
7.1.1	Typen der Störungsprognose.....	171
7.1.2	Technische und betriebliche Störungsaspekte	172
7.1.3	Bestimmungsgrößen für die Prognosegranularitäten	175
7.2	Der Prognoseprozess inklusive Detailprozessen	178
7.2.1	Konzeption der Störungsprognose	178
7.2.2	Generischer Prozess der Störungsprognose nebst Teilprozessen	181
7.2.3	Prognosegenauigkeit und -implementierung	184
8	Synthese und Fazit.....	188
8.1	Erkenntnisse aus der aktuellen Störungsforschung	188
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	195
8.3	Fazit	197
Anhang		198

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Herleitung der Schutzfunktionen nebst Anwendungsbeispielen in Bahnsystemen (Maschek, 2012)	10
Abbildung 2: Klassifizierung von Bahnsystemen (eigene Darstellung)	11
Abbildung 3: Systemleistungsfähigkeit nebst Widerstandsfähigkeit im Störfall (Dorbritz, 2012).....	18
Abbildung 4: Systematik von Störereignissen nebst methodischem Ansatz (eigene Darstellung)	21
Abbildung 5: Bahnsystemakteure in Voll- und Stadtbahn im Sinne der EWG-Richtlinie (eigene Darstellung)	23
Abbildung 6: Elementarprozesse im betrieblichen Störungsumgang (eigene Darstellung)	24
Abbildung 7: Systemzustände gemäss CLC TR 50126-2 mit SBB-Pendants (eigene Darstellung nach Schema IVT)	27
Abbildung 8: Aufgaben und Strategien des Störungsmanagements in der Produktion (Patig, 2001).....	28
Abbildung 9: Ablauf der Mengen- und Terminüberwachung nebst Steuerungsebenen (REFA, 1985).....	29
Abbildung 10: Logistisches Störungsmanagement in kundenverbrauchsorientierten Wertschöpfungsketten (Meyer, 2007)	30
Abbildung 11: Fehlerbaum als praxisnahe Prinzipdarstellung (REFA, 1985)	31
Abbildung 12: Geschätzte Zeitkosten ÖV, Pendler, kombiniertes Modell (König, et al., 2004)	34
Abbildung 13: Funktionaler Zusammenhang zwischen mittlerer Fahrtfolgezeit und Reisezeitäquivalenzwert der zeitlichen Verfügbarkeit (Lübke, et al., 2008).....	36
Abbildung 14: Betrachtungsweisen von Störereignissen (eigene Darstellung)	40
Abbildung 15: Forschungspartner der Dissertation Störungsprognose (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 16: Primär- und Totalverspätungen als Dichtefunktion (eigene Darstellung)	53
Abbildung 17: Primär- und Totalverspätungen als Verteilung (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 18: Diverse Quantile mit zugeordneten Zeiten (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 19: Systematisierung der stochastischen Kenngrössen (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 20: Generischer Störungsablauf in temporaler Verflechtung (Schranil, et al., 2011)	67
Abbildung 21: Generischer Störungsablauf in kausaler Verflechtung (Schranil, et al., 2013)	68
Abbildung 22: Hierarchie der Motivationsrichtungen des Störungsmonitorings (Schranil, et al., 2011)	73
Abbildung 23: Distance Gesamtverkehr der SBB (2011, $\epsilon = 0.02$, eigene Darstellung, geschnittene Achsen)	84
Abbildung 24: Dichtefunktion der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)	87
Abbildung 25: Verteilfunktion der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)	88
Abbildung 26: Top-Down-Klassen der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)	88
Abbildung 27: Dichtefunktion der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)	89
Abbildung 28: Verteilfunktion der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)	89
Abbildung 29: Top-Down-Klassen der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)	90
Abbildung 30: Dichtefunktion der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)	90

Abbildung 31: Verteilfunktion der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung).....	91
Abbildung 32: Top-Down-Klassen der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung).....	91
Abbildung 33: Dichtefunktion nach Fahrtrichtung der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung).....	92
Abbildung 34: Top-Down-Klassen nach Fahrtrichtung der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung).....	92
Abbildung 35: Ausgewählte Quantile der Knotenpünktlichkeit (eigene Darstellung)	93
Abbildung 36: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der ErZu-Daten 2011 (eigene Darstellung).....	94
Abbildung 37: Distance der Betriebsstellen nach ErZu-Daten 2011 bezüglich Totalverspätung ($\epsilon = 0.01$, eigene Darstellung)	95
Abbildung 38: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Zusatzverspätungen (unten) der DB-Daten 2011 (eigene Darstellung)	96
Abbildung 39: Distance Gesamt-/ Personenverkehr zu Störungsart in DB-Daten 2011 ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)	97
Abbildung 40: Distance der Betriebsstellen in DB-Daten 2010 bezüglich Zusatzverspätungen ($\epsilon = 0.01$).....	97
Abbildung 41: Verteilfunktion ausgewählter VU-Ereignisklassen 2011 (eigene Darstellung)	98
Abbildung 42: Pünktlichkeit nach Zugtypen bei DB-Messung 2011/2012 (eigene Messung)	99
Abbildung 43: Distance Personenverkehr bezüglich Verspätungen in DB-Messung 2011/2012 ($\epsilon = 0.05$, eigene Messung)	100
Abbildung 44: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der BLS-Daten 2010 (eigene Darstellung).....	101
Abbildung 45: Distance der BLS-ErZu-Codes 2010 bezüglich Primärverspätung ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)	102
Abbildung 46: Distance der BLS-Daten 2010 bezüglich Streckenzuordnung ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung).....	103
Abbildung 47: Primär- und Sekundärverspätung der BLS-Daten 2010 (eigene Darstellung)	103
Abbildung 48: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Abweichungen (unten) der CBC-Daten 2009 (eigene Darstellung)	104
Abbildung 49: Ressourcenanteil von Ursache und Massnahme bei CBC-Störungsdaten (eigene Darstellung)	105
Abbildung 50: Distance der CBC-Störungsdaten 2009 zu Fahrplanabweichungen ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung).....	105
Abbildung 51: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Störungsdauer (unten) der DVB-Daten 2010 (eigene Darstellung)	106
Abbildung 52: Distance der DVB-Daten 2010 bezüglich Störungsdauer ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung).....	107
Abbildung 53: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der SVZ-Daten 2009 – 2011 (eigene Darstellung).....	108
Abbildung 54: Distance der SVZ-Daten 2009 – 2011 bezüglich Störungsdauer ($\epsilon = 0.03$, eigene Darstellung)	109
Abbildung 55: Vektoren der Prognosefähigkeit (eigene Darstellung).....	115
Abbildung 56: Visualisierung der Vektoren der technischen Prognosekennzahl PKZ_t (eigene Darstellung)	118
Abbildung 57: Visualisierung der Vektoren der betrieblichen Prognosekennzahl PKZ_b (eigene Darstellung)	118
Abbildung 58: Variationskoeffizient der untersuchten Störungsklassen (eigene Darstellung)	121

Abbildung 59: Zeitverlust durch Zwischenhalt bei diversen Beschleunigungen (m/s^2 , eigene Darstellung).....	128
Abbildung 60: Dispositionsevaluation basierend auf der Prognose der Fahrplanabweichung (eigene Darstellung).....	137
Abbildung 61: Generischer Interventionsprozess (Schranil, et al., 2013)	141
Abbildung 62: Generischer Interventionsprozess mit SBB-Zeiten und Zeitschätzungen (eigene Darstellung)	142
Abbildung 63: Betriebliche Distance der SIP-Daten ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung).....	144
Abbildung 64: Technische Distance der SIP-Daten ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)	145
Abbildung 65: Summenkurve der Ereignisdauern der SBB-Bahnsuizide 2010 - 2012 (eigene Darstellung)	148
Abbildung 66: Meldungsanteil aus 2009 bezogen auf die betrachteten Systeme (eigene Darstellung)	149
Abbildung 67: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Jahrgang 2009 (eigene Darstellung).....	151
Abbildung 68: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Wochengang 2009 (eigene Darstellung).....	152
Abbildung 69: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Tagesgang 2009 (eigene Darstellung).....	152
Abbildung 70: Subsystemanteil der Weichenstörungen 2009 (eigene Darstellung).....	153
Abbildung 71: Subsystemanteil der Fahrstromstörungen 2009 (eigene Darstellung)	153
Abbildung 72: Interaktionen der Grundfunktionen (Schranil, et al., 2012).....	156
Abbildung 73: Legende zu den Meldekettendarstellungen (Schranil, et al., 2012)	156
Abbildung 74: Allgemeine Meldekette in Bahnsystemen (Schranil, et al., 2012)	157
Abbildung 75: Meldekette der SBB (eigene Darstellung)	159
Abbildung 76: Meldekette der CBC (eigene Darstellung).....	160
Abbildung 77: Meldekette der DVB (eigene Darstellung)	162
Abbildung 78: Meldekette der SVZ (eigene Darstellung)	163
Abbildung 79: Toleranz- und Kommunikationsseite im Störfall (Schranil, et al., 2012).....	166
Abbildung 80: Legende zu den Kommunikationspfaden (eigene Darstellung).....	168
Abbildung 81: Kommunikationspfade zum Endkunden im Personenverkehr (eigene Darstellung)	168
Abbildung 82: Kommunikationspfade zum Endkunden im Güterverkehr (eigene Darstellung)	169
Abbildung 83: Prognosetypen der Störungsprognose (eigene Darstellung)	172
Abbildung 84: Technische und betriebliche Störungsquantile der DB-Fallstudie 2010 (eigene Darstellung).....	174
Abbildung 85: Technische und betriebliche Störungsquantile der SBB-Fallstudie 2011 (eigene Darstellung)	175
Abbildung 86: Morphologie der Prognosegranularität (eigene Darstellung).....	177
Abbildung 87: Ebenen der Einzelprognose in der Bahnproduktion (Schranil, et al., 2013)	178
Abbildung 88: Konzeptionelle Übersicht über die Störungsprognose (eigene Darstellung)	180
Abbildung 89: Generischer Prozess der Störungsprognose (Schranil, et al., 2013)	181
Abbildung 90 :Gestörte und zur betrieblichen Entstörung einzusetzender Ressource (eigene Darstellung)	182
Abbildung 91: Implementierung einer Störungsprognose in die Bahnproduktion (Schranil, et al., 2013)	187
Abbildung 92: Verkettung von Technik, Mensch und Organisation bei der Störungsprognose (eigene Darstellung)	196

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Systemaspekte der Verkehrssysteme (eigene Darstellung nach Bruttomasse typischer Einheiten)	8
Tabelle 2: Teilnetze für den Bahnbetrieb nach (Weidmann, 2012)	10
Tabelle 3: Begriffsdefinition gemäss CLC TR 50126-2 (eigene Darstellung IVT)	26
Tabelle 4: Gewichtete Zahlungsbereitschaft (in CHF bzw. CHF/h) mit Standardabweichung (Hess, et al., 2008)	35
Tabelle 5: Sichtbarkeit gestörter Ressourcen in der Bahnbetriebsforschung (eigene Darstellung)	39
Tabelle 6: Abdeckung der abgeleiteten Forschungsfragen in den Fallstudien (eigene Darstellung)	42
Tabelle 7: Messprojekte der Knotenpünktlichkeit (eigene Darstellung)	45
Tabelle 8: Fallstudien im Vollbahnbetrieb nebst charakteristischen Werten (eigene Darstellung)	50
Tabelle 9: Fallstudien im Stadtbahnbereich nebst charakteristischen Werten (eigene Darstellung)	50
Tabelle 10: Berechnete Störungsquantile diverser ErZu-Codes 2009 (eigene Darstellung in (Schranil, et al., 2011))	57
Tabelle 11: Exponential- und Normalverteilung für die Störungsprognose (eigene Darstellung)	58
Tabelle 12: Geometrische Analogie der Verknüpfung dreier quantifizierter Einzelbewertungen (eigene Darstellung)	63
Tabelle 13: Varianten von Wichtungen für Zielfunktionen am Beispiel der Disposition (eigene Darstellung)	64
Tabelle 14: Anforderungen und Voraussetzungen der Störungsprognose (Schranil, et al., 2013)	70
Tabelle 15: Analysierte Störungsdatenbanken der Forschungspartner (eigene Darstellung)	71
Tabelle 16: Klassifizierungsschema der Bottom-Up-Betrachtung (eigene Darstellung)	77
Tabelle 17: Klassifizierungsschema der Top-Down-Betrachtung (eigene Darstellung)	81
Tabelle 18: ErZu-Codes der SBB geordnet nach Distance (2011, $\epsilon = 1.00\%$ Distance, eigene Darstellung)	86
Tabelle 19: Betrachtete Betriebsstellen nebst Demografie bei der DB-Messung 2011/2012 (eigene Darstellung)	99
Tabelle 20: Anteil der Fahrzeugstörungen nach Flotte (ohne VKU Strab, eigene Darstellung)	109
Tabelle 21: Grundlegende Aussagen kleiner, mittlerer und grosser Störungsquantile (eigene Darstellung)	111
Tabelle 22: Abwägung kleiner, mittlerer und grosser Quantile (eigene Darstellung)	113
Tabelle 23: Evaluation des technischen bzw. betrieblichen Störungsquantils aus der PKZ (eigene Darstellung)	119
Tabelle 24: Elementare Dispositionsmassnahmen nebst Wirkung für Ersteller und Nutzer (eigene Darstellung)	125
Tabelle 25: Arbeitsschritte und Zeitbedarf (min) für mehrpersonaligen Triebfahrzeugwechsel (eigene Messung)	130
Tabelle 26: Prozesszeit für Führerstandswechsel mit einem Fahrpersonal (in Minuten, eigene Darstellung)	131
Tabelle 27: Maximale Synchronisationswartezeit bei diversen Streckentakten (eigene Darstellung)	132
Tabelle 28: Einzelbewertung elementarer Dispositionsmassnahmen (eigene Darstellung)	132
Tabelle 29: Ranking der Dispositionsmassnahmen mit verschiedenen Zielfunktionen (eigene Darstellung)	135
Tabelle 30: Mindestabweichungen vom Fahrplan für Dispositionsmassnahmen (in Minuten, eigene Darstellung)	136
Tabelle 31: Verfügbarkeitsreparaturzeit von Ereignissen aus 2011 bis 1.50 % Distance (eigene Darstellung)	145
Tabelle 32: Bahnsuizide bei den SBB nach Wochentag (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)	146
Tabelle 33: Bahnsuizide bei den SBB nach Monat (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)	146
Tabelle 34: Bahnsuizide bei den SBB nach Uhrzeit (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)	147
Tabelle 35: Dauer von Bahnsuiziden nach Kantonen gerankt (eigene Darstellung)	148
Tabelle 36: Klassifizierung technischer Störungen der DVB (eigene Darstellung)	150
Tabelle 37: Zusammenstellung der zuständigen Stellen im Sinn der Meldekette (eigene Darstellung)	164
Tabelle 38: Farbcodierung der Prognosegenauigkeit (eigene Darstellung)	184
Tabelle 39: Prognosegenauigkeit der Störereignisklassen ($> 5\%$ Distance) der Fallstudien (eigene Darstellung)	185

1 Einführung

1.1 Motivation

Bahnsysteme zeichnen sich unabhängig von ihrer konkreten technischen Ausprägung durch eine hohe Leistungsfähigkeit aus. Diese Leistungsfähigkeit äussert sich in der Möglichkeit, grosse Personen- und Gütermengen effizient und somit unter vergleichsweise geringem Energieaufwand zu befördern bzw. zu transportieren. Besonders in hochbelasteten Bahnnetzen kommt der Qualität der Bahnproduktion eine zentrale Rolle zu. Erst die hohe Präzision im Abwickeln von Fahrten auf diesen Netzen ermöglicht die höchstmögliche Ausnutzung der theoretischen Netzkapazität. Soll die Leistungsfähigkeit hoch belasteter Bahnnetze weiter gesteigert werden, ist die Präzision der Bahnproduktion sicherzustellen und weiter zu stärken. Dazu gehört ein qualifizierter Umgang mit eingetretenen Abweichungen und Störungen, da sich bei allen Bemühungen um einen reibungslosen Betriebsablauf das Auftreten von Störungen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand kaum vermeiden lässt. Insofern wird die Störungsbeherrschung sowohl im Interesse einer professionellen Bahnbetriebsführung als auch für die Leistungsfähigkeit des Bahnsystems zentral. Die Prognosefähigkeit von Störereignissen ermöglicht ein souveränes Handeln im Ereignisfall. Neben der höheren Qualität der Bahnbetriebsführung lassen sich wertvolle Ressourcen der Bahnproduktion (Fahrzeuge, Infrastruktur, Information, Personal und Betrieb) effizienter allozieren. Dies steigert wiederum die Produktivität und führt neben einer unmittelbaren Kostensenkung zu mehr Sicherheit im Umgang mit Störereignissen und in der komplexen Bahnbetriebsführung.

Die Gesellschaft ist verkehrswissenschaftlich betrachtet durch zunehmenden Verkehr bei nahezu gleichbleibender Mobilität determiniert. Eine Steigerung des Modal Splits im öffentlichen Verkehr gegenüber dem motorisierten Individualverkehr ist volkswirtschaftlich und ökologisch interessant, stellt aber insbesondere die spurgeführten Systeme vor Herausforderungen. Eine verstärkte Nutzung der Bahnproduktionsressourcen, verbunden mit komplexeren Anlagen, führt zu einer tendenziell grösseren Störanfälligkeit. Technische bzw. betriebliche Störungsursachen sind äussere Einflüsse aus der Witterung, aber auch systemimmanente Aspekte wie die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Komponenten. Die Bahnbetreiber sind gefordert, mögliche Störereignisse kunden- und wirtschaftlichkeitsorientiert zu bewältigen. Instandhaltung und Betriebsführung können dabei am ehesten die Auswirkungen von Störereignissen bekämpfen, in weitaus geringerem Masse auch ihr Auftreten. Damit Bahnsysteme trotz höherer Auslastung und gesteigerten Kundenanforderungen beherrschbar bleiben, muss sich die Professionalität der

Bahnproduktion insbesondere im Fall von Abweichungen und Störungen offenbaren. Dies trägt zum Attraktiveren des Gesamtsystems Bahn bei.

Der Endkunde als Fahrgast im Personenverkehr bzw. als Verlager im Güterverkehr bemerkt im Ereignisfall ausschliesslich die Störungsauswirkungen. Er hat in der Regel nicht den Einblick und nicht das Interesse an den dahinter liegenden Ursachen und Prozessen. Jedoch zeichnet er aus genau diesen Eindrücken sein Bild vom Bahnsystem und entscheidet über sein zukünftiges Mobilitätsverhalten. Damit lässt sich plausibilisieren, dass Störereignisse endkundenseitig stark negativ wahrgenommen und aus dieser Perspektive heraus extrem subjektiv bewertet werden. Dies gilt insbesondere für betriebliche Folgeereignisse wie Verspätungen im Personenverkehr oder Brüche in der Transportkette von Just-in-Time-Logistikkonzepten. Ein negatives Image des spurgebundenen öffentlichen Verkehrs als Folgeerscheinung permanenter Störungen verbreitet sich deutlich schneller als positive Erfahrungen. Die Störungsforschung in Bahnsystemen ist daher ein vielseitiges interdisziplinäres Themenfeld. Im Zuge dieser Arbeit werden die wichtigsten Aspekte zu vier Kernprozessen verdichtet:

- Prognose der Dauer eingetretener Störungen
- Interventionsprozess zur technischen Entstörung
- Dispositionsprozess zur betrieblichen Entstörung
- betriebsinterne sowie Endkundenkommunikation

Diese Kernprozesse verfügen jeweils über eine wissenschaftliche und eine wirtschaftliche Dimension. Im wirtschaftlichen Kontext dient die Störungsprognose den Verkehrsunternehmen (z. B. Eisenbahnverkehrsunternehmen, EVU) und Infrastrukturbetreibern (z. B. Eisenbahninfrastrukturunternehmen, EIU) zum besseren Umgang mit eingetretenen Störungen. Anzustreben ist die strukturierte und beschleunigte Rückkehr in den Regelbetrieb, zumindest aber in einen geplanten Betrieb als Zwischenstufe. Dabei leistet die Störungsprognose einen Beitrag zur Verbesserung der betrieblichen Disposition im Störfall; dies verbessert die Ressourcenallokation. Andererseits resultiert im Sinne einer Win-Win-Situation eine spürbare Qualitätsverbesserung für die Endkunden im Personen- wie im Güterverkehr. Durch die Optimierung der Ereigniskommunikation lassen sich präzisere und endkundengerechtere Informationen ausgeben. Diese tragen zu einer höheren Kundenzufriedenheit bei und schaffen eine verbesserte Vertrauensbasis zwischen den geschäftlichen Partnern Netzbetreiber, Verkehrsunternehmen und Endkunden.

Darüber hinaus erhebt diese Arbeit einen wissenschaftlichen Anspruch, was sich in einer mitunter abstrakten bzw. abstrahierten Betrachtungsweise äussert. Dadurch werden die Störungsbetrachtungen unabhängig vom einzelnen Bahnsystem. Die vorliegende Arbeit analysiert mit Anwendungsfokus, welche Parameter die Störungsdauer in welcher Form beeinflussen, unter welchen Rahmenbedingungen eine Störungsprognose realistisch wird und welche Ressourcen das Störgeschehen determinieren. Daher werden Methoden der statistischen und der prozessualen Prognose der Störungsdauer als Mittel zu ihrer Beherrschung in Bahnsystemen kombiniert.

1.2 Forschungsziel

Bahnsysteme als Teil öffentlicher Verkehrssysteme weisen grundsätzlich eine hohe Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit auf. Dabei ist die Leistungsfähigkeit komfortabhängig zu definieren (Anderhub, et al., 2008). Unter Störungsbedingungen ist die Leistungsfähigkeit von (Bahn-) Systemen gesondert zu betrachten (Zhu, 2000; Oetting, 2013), da auf reduziertem Netz der gleiche oder sogar noch erhöhte (Verkehrs-) Durchsatz realisiert werden muss (Danowski, et al., 2009). Andererseits können Störungen im Verkehrsablauf anhand ihrer verkehrshemmenden Wirkung auf die übrigen Verkehrsteilnehmer detektiert werden (Hoops, et al., 2000); dies betrifft sowohl Verspätungsübertragungen im Bahnsystem als auch den Individualverkehr. Insbesondere im Rahmen von Verfügbarkeitsuntersuchungen technischer Systeme, analysiert bis auf Komponentengranularität, existieren bereits Forschungsergebnisse aus dem RAMS-Bereich. Die Ausdehnung dieser Betrachtungen auf Bahnsysteme inklusive ihrer spezifischen Randbedingungen erfolgte bislang weniger, einen Ansatz dazu bietet (Weidmann, et al., 2011).

Allgemein stellen Betriebsstörungen ein technisches und wirtschaftliches (Betreiber-) Risiko dar (Welter, 2008), das es im Hinblick auf die negative Wahrnehmung seitens der Endkunden zu minimieren gilt (Schranil, 2003). Wenngleich verschiedene Bahnsysteme unter physikalisch quasi identischen Bedingungen existieren und elementare Zusammenhänge des Bahnbetriebs identisch sind, gibt es innerhalb gleichartiger Bahnsysteme heterogene Begriffswelten (Pachl, 2000). Eine einheitliche Terminologie verwendend kommt den Verkehrswissenschaften eine Systematisierungsaufgabe zu. Gleichzeitig existieren wissenschaftliche Ansätze und Strategien zur Intervention im Störfall (Potthoff, 1979), (Potthof, 1980). Beobachtungen zeigen, dass im Bereich der Störungsintervention noch Potenzial besteht (Engel, 2009), um interne Prozesse der technischen wie betrieblichen Entstörung zu rationalisieren und Endkunden geeigneter zu informieren. Die Optimierung aus Betreibersicht sollte dabei allenfalls den Anfang markieren und zunehmend aus Endkundensicht erfolgen (Schöbel, 2007). Dabei sollten die Systemakteure zusammenarbeiten, um die anfängliche Informationsasymmetrie zum Endkunden zu kompensieren.

Zahlreiche Verkehrsunternehmen haben ihrerseits Prozesse zum Notfallmanagement konzipiert (Hopf, 2009) und/oder erfassen entsprechend codierte Störungsdaten (Günter, 2009), (SBB Infrastruktur, 2010). Demzufolge existieren Untersuchungen sowohl über Aufbau, Entwicklung und Abbau von Verspätungsminuten (Hermann, 1996) als auch über die Aufteilung von Verspätungsminuten und Verspätungskosten (Maibach, et al., 2007). Systemübergreifende Analysen zu Störereignissen bestehen hingegen kaum (Schranil, 2010). Aus der Motivation dieser Arbeit lässt sich das Bedürfnis ableiten, Störereignisse in Bahnsystemen unabhängig vom Wesen des jeweiligen Bahnsystems zu analysieren und Muster im Störungsgeschehen zu identifizieren. Diese Analysen haben einen klaren Anwendungsfokus im Hinblick auf die Verbesserung der Betriebsführung im Ereignisfall. Eine enge Zusammenarbeit mit den Bahnbetreibern ist daher zur Lösungsfindung anzustreben. Dies ermöglicht weiterhin die Kalibrierung der Forschungsergebnisse. Die übergeordnete Forschungsfrage der Dissertation lautet:

Ist es möglich, eingetretene Bahnstörungen so zuverlässig zu prognostizieren, dass diese Störungsprognose für Dispositionsprozess und Kundeninformation genutzt werden kann?

Auf die Teilaspekte dieser Forschungsfrage wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit mehrfach eingegangen. Von besonderem Interesse dieser Dissertation ist es, Bahnstörungen unabhängig von der konkreten technischen Ausgestaltung des Bahnsystems zu prognostizieren. Aufzuzeigende Muster innerhalb des Störungsgeschehens sind für die Prognose ähnlicher Klassen von Störereignissen zu verwenden. Als zentrale Aspekte lassen sich an dieser Stelle fünf Forschungsziele identifizieren, welche anschliessend in abgeleitete Forschungsfragen und Hypothesen münden.

- **Definition des Störungsbegriffs und Darlegung des Störungsverständnisses**
Erarbeitung eines gemeinsamen Störungsverständnisses für unterschiedliche Bahnsysteme und Herausarbeitung relevanter Zeitdauern für die Bewertung und Analyse der Ereignisse
- **prognoserelevante Klassifizierung von Betriebsstörungen**
Aufbereitung einer generischen Analyse von Störungen unter der Zielfunktion der generellen Prognosefähigkeit, Analyse von Dispositionsprozessen und Meldekettten
- **Zusammenstellung relevanter Prognosegrössen**
Herausarbeiten relevanter zeitlicher Grössen zur praxistauglichen Realisierung der Störungsprognose, Ermittlung entsprechend charakteristischer Grössen und deren statistischer Zusammenhänge, Eruierung des Informationsbedürfnisses der beteiligten Akteure
- **Prozesskonzeption der Störungsprognose**
Beitrag zur standardisierten besseren Beherrschbarkeit eingetretener Betriebsstörungen in Bahnsystemen, Herausarbeiten von Chancen und Grenzen dieser Prognose
- **Integration der Prognose in die Kommunikationsstrategie**
Einbindung der Prognoseergebnisse in die interne und externe Ereigniskommunikation zur Optimierung der Endkundeninformation

Das Vorfeld der vorliegenden Forschungsarbeit bildeten daher umfangreiche Recherchen zur Thematik der Störereignisse in Bahnsystemen vergleiche (Schranil, 2010). Damit konnten ergänzend zur übergeordneten Forschungsfrage weitere Forschungsfragen (F) abgeleitet und je zwei Hypothesen (H) zu deren Beantwortung formuliert werden:

Statistische Muster (abgeleitete Forschungsfrage 1 nebst Hypothesen)

- F 1: Welche statistischen Muster, Verteilungen oder Gesetzmässigkeiten weisen Betriebsstörungen auf?
- H 1.1: Neben vielen Arten extrem seltener Betriebsstörungen zeigen sich in den Analysen vor allem wenige Klassen vergleichsweise häufiger Ereignisse.
- H 1.2: Insbesondere für eher häufige Störereignisse und Betriebsstörungen von vergleichbarer Natur zeigen sich deutliche Ähnlichkeiten im Ablauf und entsprechende statistische Verteilungen.

Störungsklassifizierung (abgeleitete Forschungsfrage 2 nebst Hypothesen)

- F 2: Wie erfolgt eine sinnvolle Klassifizierung von Betriebsstörungen im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit ihrer Auswirkungen?
- H 2.1: Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz liefern vergleichbare Ergebnisse zur Störungsklassifizierung.
- H 2.2: Für betriebliche Fragestellungen ist der Top-Down-Ansatz geeigneter.

Meldekette (abgeleitete Forschungsfrage 3 nebst Hypothesen)

- F 3: Welcher Meldeprozess liegt zwischen dem Störungseintritt und der Auslösung einer Disposition, welche Dispositionen erfolgen und wie ist dieser Prozess optimierbar?
- H 3.1: Meldeprozesse sind in verschiedenen Bahnsystemen und abhängig vom Betreiber stark heterogen, vor allem in Vollbahnsystemen aber tendenziell komplex.
- H 3.2: Das Layout des Meldeprozesses von Betriebsstörungen und die Effizienz der Disposition werden vom Stand der technischen Ausrüstung determiniert; klare Verantwortlichkeiten sollten definiert werden.

Prognoseprozess (abgeleitete Forschungsfrage 4 nebst Hypothesen)

- F 4: Wie kann eine praxistaugliche Störungsprognose realisiert werden und was kann sie bei einer konkret eingetretenen Betriebsstörung leisten?
- H 4.1: Auf Grundlage der Felddatenauswertung sind typische Verläufe von Betriebsstörungen darstellbar; Grenzen bestehen jedoch bei Störungen durch Elementarereignisse.
- H 4.2: Mithilfe der Störungsprognose lassen sich eintretende Betriebsstörungen hinsichtlich Dauer und Wiederherstellungsalgorithmen objektiv prognostizieren.

Ereigniskommunikation (abgeleitete Forschungsfrage 5 nebst Hypothesen)

- F 5: Wie kann die Informationsstrategie im Fall von Betriebsstörungen angesichts einer verbesserten Störungsprognose angepasst werden?
- H 5.1: Auf Grund der Störungsprognose wird die betriebliche Disposition effizienter.
- H 5.2: Durch eine verbesserte Störungsprognose können Endkunden geeigneter informiert werden.

Die Forschungsfragen und -hypothesen entstammen dem Forschungsplan (Schranil, 2010) und werden in Kapitel 8 aufgegriffen sowie basierend auf den Forschungsergebnissen beantwortet.

1.3 Struktur dieser Dissertation

Das vorliegende Kapitel 1 umreißt die Relevanz der Störungsprognose für (Verkehrs-) Wirtschaft und Wissenschaft, definiert die Ziele der vorliegenden Forschungsarbeit und führt in deren Struktur ein. Darauf aufbauend lässt sich das zugrunde liegende Forschungsprojekt in weitere abgeleitete Forschungsfragen gliedern, zu deren Beantwortung Hypothesen aufgestellt werden. Anschliessend konkretisiert Kapitel 2 die Problemstellung der Störungsforschung. Dabei wird das Wesen spurgeführter Systeme herausgearbeitet und eine systemübergreifende Definition des Störungsbegriffs im Bahnsystem abgeleitet. Die im Weiteren wichtigen Akteure des Störungsgeschehens werden abgegrenzt und vorgestellt, bevor Parallelen zum Umgang mit Abweichungen bzw. Störungen in anderen Wirtschafts- und Wissenschaftsbereichen aufzuzeigen sind. Fortfolgend stellt Kapitel 3 das methodische Konzept der Analysen vor. Jene in diese Arbeit einbezogenen Forschungspartner werden vorgestellt und ihre Auswahl begründet. Weiterhin wird die ressourcenorientierte Betrachtung vertieft und die Konzeption der jeweiligen Fallstudien dargestellt. Weiterhin befindet sich dort die Theorie zur in der Störungsprognose angewandten Statistik bzw. zur Evaluation von Varianten im Fall von Auswahlentscheidungen.

Kapitel 4 legt den Grundstein für die Prozessanalysen. Hierzu werden die relevanten Betrachtungsarten von Störereignissen beschrieben sowie Klassifizierungsregeln aufgestellt und in konkrete Klassifizierungsschemata umgesetzt. Konkrete Beispiele runden diese Betrachtungen ab. Des Weiteren wird der generische Störungsablauf vorgestellt, woraus sich vor dem Hintergrund der Datenlage geeignete Prognosegrößen ableiten lassen. Darauf aufbauend widmet sich Kapitel 5 der Auswertung von Störungsdaten. Dazu wird eine Methodik zur Eruierung relevanter Störungsklassen entwickelt; für diese Ereignisklassen werden Datenanalysen durchgeführt. Statistische Fragen der Quantilevaluation beschliessen dieses fallstudiennahe Kapitel. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Behebung von Störereignissen im Kapitel 6. Dabei ist zwischen der betrieblichen Störungsbehebung (Disposition) und der technischen Störungsbehebung (Intervention) zu separieren. Des Weiteren wird die Kommunikation im Ereignisfall näher untersucht, sowohl die innerbetrieblichen Meldekettens als auch die Endkundenkommunikation basierend auf deren Informationsbedürfnis. All diese Aspekte werden benötigt, um in Kapitel 7 den Prozess der Störungsprognose anzusetzen, zu begründen und zu detaillieren. Das abschliessende Kapitel 8 fasst die Erkenntnisse dieser Dissertation zusammen. Es beantwortet die Forschungsfragen sowie die Hypothesen. Weiterhin wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben. Somit schliesst sich der Kreis zum Kapitel 1.

Diese Dissertation gliedert sich in acht Hauptkapitel mit jeweils zwei bis fünf Unterkapiteln der zweiten Gliederungsebene, inklusive Zwischenfazit der etwas umfangreicheren Kapitel. Mit Ausnahme der kompakteren Kapitel 1 und 8 besteht jeweils eine dritte Ebene aus je zwei bis vier Teilkapiteln. Ein Anhang ergänzt diese Arbeit um weitere Daten.

2 Grundlagen und Problemstellung

2.1 Spurgebundene Systeme (Bahnen)

2.1.1 Wesen spurgebundener Systeme als Teil der Verkehrssysteme

Im Kontext der Störungsprognose führt das vorliegende Kapitel in grundlegende Fragestellungen ein. So wird zunächst dem Wesen spurgebundener Systeme nachgegangen, um deren Ausprägungen und Relevanz im Kontext von Bahnstörungen auszuloten.

Im Vergleich mit anderen Verkehrssystemen weisen Bahnsysteme einige charakterisierende Eigenschaften auf. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die Spurgebundenheit: Bahnsysteme sind form- und kraftschlüssig spurgebundene Systeme. Daraus resultieren höhere Anforderungen an die Systemkompatibilität von Fahrzeug und Fahrweg. Die technische Realisierung der Spurgebundenheit wird später für die Einteilung der Bahnsysteme vertieft. Für den Moment birgt sie den Vorteil des Auskommens mit geringer Haftreibung zwischen Fahrzeug und Fahrweg, was abgesehen von der geringeren erzielbaren Beschleunigung die Möglichkeit energiesparsamer Bewegungen über weite Strecken bietet. Die geringe Reibung impliziert einerseits die Option der Zugbildung, erfordert aber andererseits Anstrengungen zur (technischen) Sicherung der verkehrenden Einheiten, zumindest bei höheren Geschwindigkeiten. Weiterhin fehlt Bahnsystemen die Möglichkeit der Selbstorganisation der Verkehrsteilnehmer und der verkehrenden Einheiten. Daraus folgt einerseits die Implementierung eines Betriebsprogramms, meist im Sinne eines Fahrplans. Andererseits bewegt sich der Endkunde nicht mehr selbstständig im Verkehrssystem; es werden Transportgefäße eingeführt. Fasst man diese drei Eigenschaften mit ihren Implikationen zusammen, resultieren fünf wesentliche Systemaspekte:

- Spurgebundenheit → 1) hohe Systemkompatibilität
- geringe Reibung → 2a) Option der Zugbildung
→ 2b) Erfordernis der Zugsicherung
- fehlende Selbstorganisationsfähigkeit → 3a) Aufstellen eines Betriebsprogramms
→ 3b) separates Transportgefäß

Prinzipiell lassen sich alle Verkehrssysteme an diesen Systemaspekten spiegeln. Dazu werden die einzelnen Aspekte in einer ABC-Analyse (vgl. Kapitel 3.4.1) nach ihrer Ausprägung unterteilt.

„X“ entspricht dabei einer hohen Ausprägung, „•“ einer mittleren Ausprägung und „o“ einer geringen Ausprägung (Tabelle 1).

Verkehrsmittel (nach Bruttomasse)	-1- Systemkompatibilität der Fahrzeuge (Spurgebundenheit)	-2a- Zugbildungsoption (geringe Reibung)	-2b- Zugsicherung (geringe Reibung)	-3a- Betriebsprogramm (fehlende Selbstorganisation)	-3b- separates Transportgefäss (fehlende Selbstorganisation)
Fussgänger	o	o	o	o	o
Fahrrad	o	o	o	o	•
Motorrad/Moped	•	o	o	o	•
Pkw	•	o	o	o	•
Mitfahrgelegenheit	•	o	o	•	•
Bus	•	•	o	•	X
Tram/Stadtbahn	X	•	•	•	X
Flugzeug	•	o	X	X	X
Personenzug	X	X	X	X	X
Güterzug	X	X	X	X	X
Personenschiff	•	o	•	•	X
Güterschiff	•	•	•	•	X

X hoch / • mittelmässig / o gering

Tabelle 1: Systemaspekte der Verkehrssysteme (eigene Darstellung nach Bruttomasse typischer Einheiten)

Im Fall der Systemkompatibilität bedeutet eine geringe Ausprägung, dass es keinerlei relevante Beschränkungen gibt. Mittlere Ausprägungen meinen allgemein zu erfüllende Kriterien, zum Beispiel Maximalgrösse, Maximallast usw. Bei hoher Ausprägung der erforderlichen Systemkompatibilität sind die Schnittstellen zwischen Fahrweg und Fahrzeug konkret definiert. Für die Option der Zugbildung stellt die mittlere Ausprägung eine Möglichkeit im begrenzten Rahmen dar. Beispielsweise kann ein Bus einen Anhänger führen, grössere Einheiten sind jedoch technisch (bisher) nicht möglich. Die mittleren Ausprägungen der Zugsicherung meinen einfache Systeme der Verkehrsführung im Unterschied zu komplexen Systemen der Vollbahn. Beim Betriebsprogramm ist unter einer mittleren Ausprägung eine Art Fahrplan zu verstehen, welcher aber nicht konfliktfrei sein muss. Diese Randbedingung kommt erst bei stark ausgeprägten Betriebsprogrammen hinzu. Schliesslich ist unter dem separaten Transportgefäss im stark ausgeprägten Zustand eine passive Nutzung durch den Endkunden gemeint, beispielsweise im Flugzeug. Eine mittlere Ausprägung meint lediglich ein Gefäss als „Hilfsmittel“ wie beispielsweise das Automobil. Mit dieser Klassifizierung lassen sich die Verkehrssysteme nunmehr gegenüberstellen:

Je mehr Systemaspekte stark ausgeprägt sind, umso komplexer wird der Betrieb eines derartigen Verkehrssystems. Im Bereich des Güterverkehrs kommt hinzu, dass kein „autonomes Umsteigen“ möglich ist und dieser Umschlag innerhalb und ausserhalb des jeweiligen Verkehrssystems entsprechend zu organisieren ist, was die Komplexität nochmals erhöht. In diesem Sinn ist der

Fussgänger das einfachste und daher auch flexibelste Verkehrssystem, während die Bahnsysteme im Personen- und Güterverkehr extrem komplex ausfallen (Schranil, et al., 2013).

Die Spurgebundenheit beeinflusst neben den technischen Aspekten von Fahrzeug und Fahrweg vor allem die Betriebsführung. Sie sollte daher als Alleinstellungsmerkmal der „Bahnen“ dienen und charakterisiert jene eineindeutig, ohne die konkrete technische Ausführung vorweg zu nehmen oder unkonventionelle Systeme auszuschliessen. Spurgeführte Verkehrsmittel sind Verkehrsmittel, welche auf einer vorgegebenen Spur zwangsweise geführt sind (Wichser, et al., 2005). Bei der Bezeichnung „Bahn“ besteht zunächst die Tendenz zur betrieblichen Interpretation im Sinne von „Eisenbahn“ oder „Strassenbahn“ als weit verbreitete Systeme; zentral für den Begriff „Bahn“ und die damit verbundenen (Störungs-) Betrachtungen ist fortfolgend einzig die Spurgebundenheit. Die Fahrzeuge jedes Verkehrssystems sollen möglichst genau einer geometrisch definierten horizontalen und vertikalen Ideallinie folgen (Weidmann, 2012). Diese Linie ist die eigentliche „Spur“.

Jene Spurgebundenheit bewirkt, dass neben der vertikalen auch die horizontale Linienführung detailliert festliegt. Dies wiederum bringt die Möglichkeit, einem Streckenverlauf präzise zu folgen und ein zweites Fahrzeug einem ersten exakt folgen zu lassen (Zugbildung). Entsprechend finden sich die Anfänge der Bahnen einerseits in befestigten Spuren für die Wagenräder bei gefährlichen, instabilen Wegabschnitten und andererseits im Bergwerksbereich, vgl. (Ammoser, 2008). Mit der Industrialisierung brachte der technische Fortschritt die Nutzbarmachung der Dampfmaschine für Transportaufgaben. In Verbindung mit der Spurgebundenheit wurde es nun technisch möglich, mehrere Fahrzeuge als Zug verkehren zu lassen, sowohl im Güterverkehr zum effizienten Transport grösserer Massen als auch im Personenverkehr zur Bewältigung grösserer Nachfragen.

Die Zugbildung setzt wiederum die Notwendigkeit dazu voraus und plausibilisiert, dass Bahnen insbesondere im öffentlichen Verkehr mit Bündelung der Einzelnachfrage Einsatz finden. Andererseits steigt durch die grösseren Fahrzeugverbände im Ereignisfall das Gefahrenpotenzial auf Grund der grösseren kinetischen Energie, impliziert durch die gegenüber Einzelfahrzeugen grössere Zugmasse und der im Personenverkehr grösseren Anzahl von Nutzern je Transporteinheit. Beides erfordert erhöhte Anstrengungen in eine sichere Betriebsführung spurgebundener Systeme und begründet die technische Zugsicherung als zweite zentrale Systemeigenschaft der Bahnen (Pachl, 2011). Die Systemeigenschaften der Bahnen erlauben ein Herleiten der wichtigsten Schutzfunktionen (Maschek, 2012):

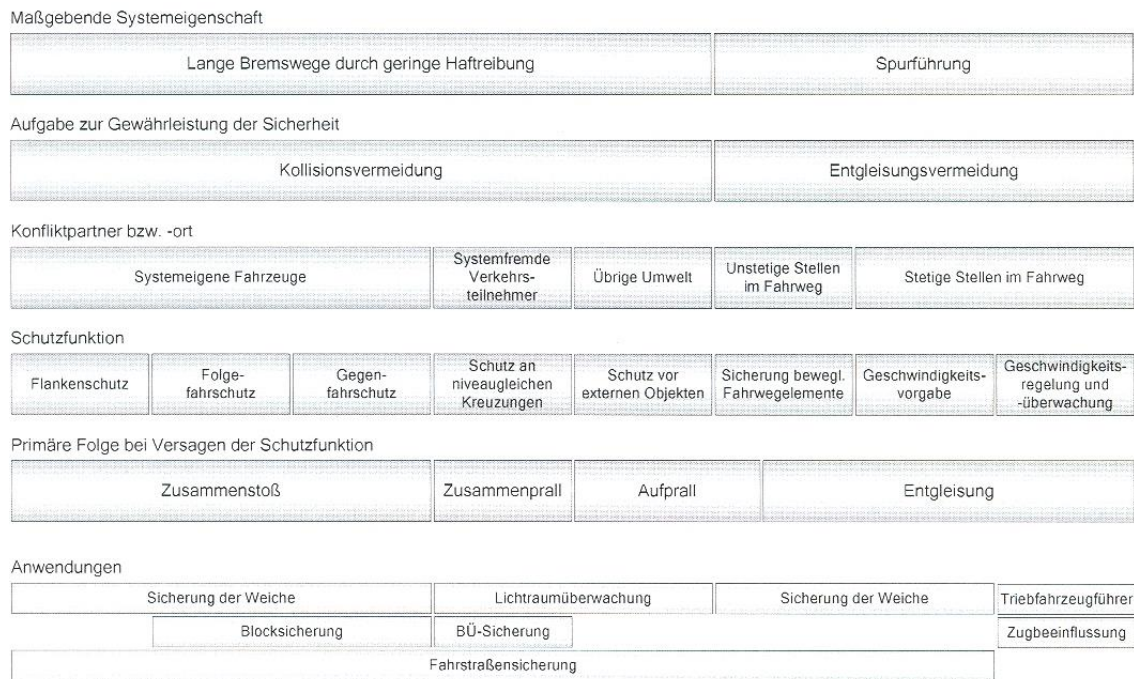


Abbildung 1: Herleitung der Schutzfunktionen nebst Anwendungsbeispielen in Bahnsystemen (Maschek, 2012)

Die Spurgebundenheit birgt jedoch den Nachteil, dass der Verkehrsteilnehmer auf der Betrachtungsebene des Zugverbands auf eben diese Spur angewiesen ist. Im Fall von Störereignissen kommt der Disposition folglich eine Schlüsselrolle zu: Ein spontanes Umfahren von Störereignissen wie im Strassenverkehr ist bei den Bahnen – vorbehaltlich einiger Zweiwegefahrzeuge – technisch unmöglich. Dies begründet Ähnlichkeiten in der Bahnbetriebsführung sowie aufzugreifende Parallelen verschiedener Bahnsysteme für die Störungsprognose.

Die jeweiligen Bahnnetze lassen sich darüber hinaus in fünf Teilnetze untergliedern, welche ihrerseits die zentralen Funktionen abbilden (Weidmann, 2012), Tabelle 2:

Fahrbahnnetz	Bahnenergienetz ¹	Telekomnetz	Steuerungs- und Sicherungsnetz	Organisationsnetz
Tragen	Energieversorgung	Informationstransfer	Lenken	Entscheiden
Führen	Energierückleitung	(Sichern)	Steuern	Koordination
Vorantreiben/Bremsen			Sichern	Information

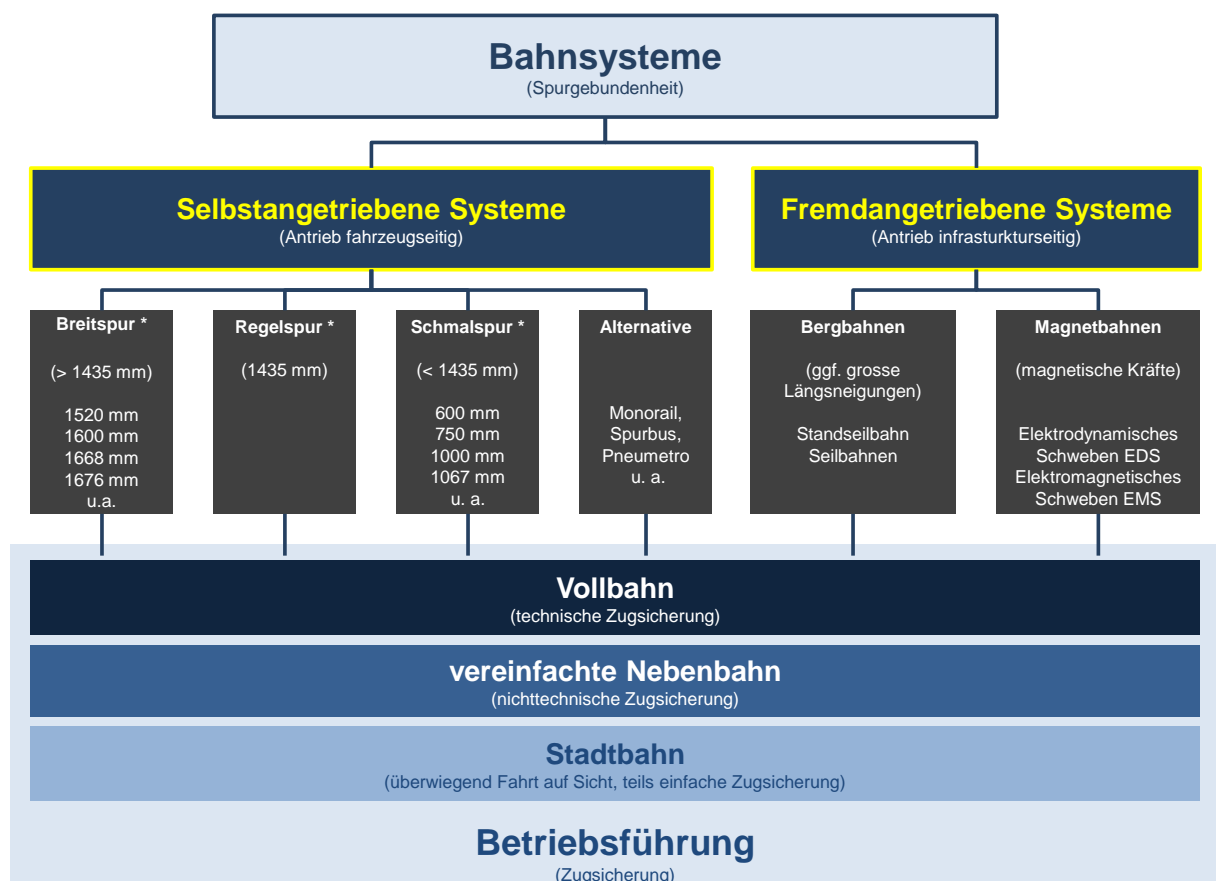
Tabelle 2: Teilnetze für den Bahnbetrieb nach (Weidmann, 2012)

Spurgebundenheit, geringe Reibung und allenfalls geringe Selbstorganisation charakterisieren die Bahnsysteme. Der erste und der dritte Aspekt belässt jedoch ein Variantenspektrum dieser Art der Verkehrssysteme. Spurgebundenheit als signifikante Eigenschaft der Bahnsysteme und Betriebsprogramm als Folge der geringen Selbstorganisation werden im Folgenden zur Systematisierung der Bahnsysteme aufgegriffen.

¹ In der Quelle als „Bahnstromnetz“ bezeichnet, hier jedoch wegen nichtelektrifizierten Bahnnetzen verallgemeinert.

2.1.2 Ausprägungen spurgebundener Systeme

Soweit die Spurgebundenheit als notwendige Bedingung zur Einordnung eines Verkehrssystems als Bahn angesehen wird, verbleibt ein grosses Spektrum derartiger Systeme. Eine Einteilung der wichtigsten Vertreter kann nach der generellen Antriebsart vorgenommen werden. Dabei erfolgt die Klassifizierung nach dem Aspekt des fahrzeugseitigen oder infrastrukturseitigen Antriebs. Die weitere Klassifizierung analysiert die technische Realisierung der Spurgebundenheit. Daraus resultieren konventionelle Rad-Schiene-Systeme, welche anhand der Spurweite klassifiziert werden können, und verschiedene weitere Ansätze. Die Vielfalt unkonventioneller Bahnen ist im Vergleich zu ihrer Relevanz in der Grundgesamtheit der Bahnsysteme eher gross. Eine detaillierte Erörterung dieser Systeme würde den thematischen Rahmen dieses Artikels sprengen, es sei auf die wichtigsten Gruppen verwiesen.



* klassische Rad-Schiene-Systeme («konventionelle Bahnen»)

Abbildung 2: Klassifizierung von Bahnsystemen (eigene Darstellung)

Abbildung 2 nimmt eine Einteilung in Bergbahnen für grosse Längsneigungen (welche nicht realisiert sein müssen, vgl. Skymetro Zürich) und Magnetbahnen sowie als „Alternative“ bezeichnete Systeme für Monorail, Spurbusse, Pneumetro etc. vor. Letztere Sonderformen spurgebundener Systeme zählen nur insoweit zu den Bahnen, als kein Übergang auf den klassischen Strassenverkehr stattfindet. Trolleybusse gehören nicht zu den spurgebundenen Systemen, da sie ihre

(Fahr-) Spur innerhalb der Restriktionen der Energieversorgung (Stromabnehmer, Hilfsverbrennungsmotor, Traktionsenergiespeicher) autonom wählen können.

Mit dieser Methodik lässt sich eine technische Einordnung der einzelnen Bahnsysteme vornehmen. Die Formen der Bahnbetriebsführung sind dabei weitestgehend vom jeweiligen technischen Bahnsystem unabhängig. Am deutlichsten fällt diese Unterscheidung bei der Fokussierung auf die Realisierung der Zugsicherung aus. Hierbei ist zwischen den Vollbahnen (Haupt- und Nebenbahnen) mit technischer Zugsicherung, vereinfachten Nebenbahnen ohne technische Zugsicherung (z. B. nichtsignalisierter Zugleitbetrieb) und auf Sicht verkehrende oder lediglich einfach gesicherte Stadtbahnen zu differenzieren. Auch im Bereich der konventionellen Bahnen sind all diese Betriebsformen gebräuchlich. Insofern sind sowohl die Bahnbetriebsführung als auch die Spurgebundenheit für die Einteilung der Bahnen zielführend, jedoch voneinander weitestgehend unabhängig. Insbesondere die Spurweite konventioneller Bahnen beeinflusst weder die Betriebsführung noch die Leistungsfähigkeit dieser Verkehrssysteme.

Eisenbahn (Vollbahn/Nebenbahn)

„Eine Eisenbahn ist ein auf zwei eisernen Schienen und meist eigenem Verkehrsweg laufendes, maschinengetriebenes Verkehrsmittel zur Beförderung von Personen und/oder Gütern“ (Pachl, 2011) mit Verweis auf (Autorenkollektiv, 1981). Die Infrastruktur der Eisenbahn verläuft grundsätzlich unabhängig² von anderen Verkehrssystemen. Der Fahrweg besteht aus zwei Stahlschienen im Abstand der Spurweite, gemessen als „[minimaler] horizontaler Abstand der Fahrkanten beider Schienen eines Gleises“ (Lübke, et al., 2008) unterhalb des Schienenkopfes³. Weltweit hat sich die ursprünglich britische Spurweite von 1435 mm (entspricht 4' 8,5") als Regelspur⁴ durchgesetzt. Bahnsysteme geringerer Spurweiten tragen die Bezeichnung Schmalspurbahn; grössere Spurweiten kennzeichnen Breitspurbahnen. Die übrigen Parameter wie Abstand und Gestaltung der Schwellen, Art und Ausgestaltung des Oberbaus (z. B. als Schotteroberbau oder feste Fahrbahn) sowie die Anlage des Unterbaus sind je nach Infrastrukturbetreiber heterogen.

Die Zugfahrten auf Eisenbahnen werden in der Regel technisch oder nichttechnisch gesichert. Bei höherer Netzauslastung und/oder Geschwindigkeit ist die technische Zugsicherung zwingend (Weidmann, 2011). Die technische Sicherung von Zugfahrten (z. B. mittels Streckenblock) ist ein zentrales Merkmal der Vollbahn⁵, dort vor allem bei Hauptbahnen. Vereinfachte Betriebsformen (z. B. Zugleitbetrieb) existieren insbesondere bei Nebenbahnen und Schmalspurbahnen. Auf Grund der tendenziell grossen Zuglängen und der daraus resultierenden kinetischen Energie existieren für Rangierarbeiten und für den Kollisionsfall hohe Anforderungen an die zu kompensierende Längsdruckkraft der Fahrzeuge; dies beeinflusst neben dem Schienenfahrzeug-

² Ausnahmen bestehen durchaus, z. B. die Strecke Chur – Arosa der Rhätischen Bahn in der Ortslage Chur.

³ Der konkrete Messpunkt hängt von der Spurweite (und vom Infrastrukturbetreiber) ab, bei Regelspur sind es 7 ... 14 mm.

⁴ Die Bezeichnung „Normalspur“ ist gelegentlich synonym; Spurweiten jenseits der 1435 mm sind dabei nicht „unnormal“, sondern lediglich nicht die Regel.

⁵ Eine konsistente Definition des Begriffs Vollbahn besteht bislang nicht. Eigener Bahnkörper und technische Zugsicherung gelten in der Fachwelt als zentrale Charakteristika der Vollbahnsysteme.

bau erneut die Bemühungen um die Zugsicherung. – Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Vollbahnen keine Regelspurbahnen sein müssen. Beispielsweise betreibt Russland auf 1524 mm Breitspur⁶ ein Vollbahnnetz inklusive Hochgeschwindigkeitsverkehr. Auch auf Schmalspur findet man Vollbahnen: Prominentester Vertreter in der Schweiz ist die meterspurige Rhätische Bahn. Da im helvetischen Bahnverkehr mehrere sehr leistungsfähige meterspurige Schmalspurbahnen mit beachtlichen Verkehren vom RegioExpress bis zur S-Bahn bestehen, präferiert man in der Allianz Railplus die Bezeichnung „Meterspurbahn“ um gelegentlichen Assoziationen mit technisch veralteten schmalspurigen Bahnen zu entgehen.

S-Bahn-Systeme sind eine (Spezial-) Form der Vollbahnen. Die Bindung des Begriffs an separierte Bahnnetze wie in Berlin, Paris oder Wien ist in der jüngeren Verkehrswissenschaft nicht mehr üblich. Stattdessen ist der Begriff S-Bahn nun funktional aus der Bahnproduktion abgeleitet und mit dichten Haltabständen, dichten Taktfolgen und hohem Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge assoziiert. Demnach finden sich S-Bahn-Systeme auch im Mischverkehr mit klassischen Vollbahnsystemen (z. B. S-Bahnen in und um Zürich oder Dresden).

Stadtbahn/Strassenbahn

Stadt- bzw. Strassenbahnen sind eine Betriebsführungsform von Bahnsystemen zur Feinerschliessung im urbanen Raum. Die dort vorhandene Platzknappheit führte bei ihrer Errichtung zur Mitbenutzung der bestehenden Verkehrswege und somit oftmals zur Anordnung in Strassenmitte. Da es hier Interaktionen mit dem übrigen Individualverkehr gibt, fahren Strassenbahnen auf Sicht und meist ohne technisch gesicherten Fahrweg, also ohne Zugsicherung. Damit gehen verschärfte Anforderungen an das Bremsvermögen und Restriktionen hinsichtlich der maximalen Zuglängen einher. Von der fehlenden Zugsicherung wird meist erst bei höheren Geschwindigkeiten (> 60 km/h) und in Tunneln abgewichen. Die Nachteile der klassischen Strassenbahn kompensierend, werden heutzutage eher Stadtbahnen gebaut. Der Paradigmenwechsel von der rumpelnden „Strassenbahn“ zur modernen „Stadtbahn“ seit den 1990er Jahren hat zahlreiche Neubauprojekte ermöglicht und – ausgehend von Frankreich – den (Wiederauf-) Bau kompletter Netze gebracht. Entscheidende Parameter im Unterschied zur Strassenbahn sind (Schranil, et al., 2012):

- Optimierung der Einstiegssituation → Abstimmung Fahrzeug und Bahnsteig
- Einsatz spurtstarker Fahrzeuge → Drehstromantriebstechnik
- Anlage separater Bahnkörper → bauliche Reduzierung der Konfliktpunkte
- Bevorrechtigung an Knotenpunkten → bedarfsgerechte LSA-Steuerung
- Einsatz längerer Fahrzeuge → mehrgliedrige Gelenktriebwagen
- Echtzeit-Fahrgastinformation → Rechnergestütztes Betriebsleitsystem (RBL)

U-Bahnen stellen wiederum eine Sonderform der Stadtbahn in Agglomerationen dar. Da sie meist – aber nicht zwangsläufig⁷ – im Tunnel verlaufen, weisen sie zwingend eine Zugsicherung auf und sind auf Grund des isolierten Netzes mit vergleichsweise überschaubarem Aufwand automatisch

⁶ Teilweise werden 1520 mm Spurweite neu eingebaut, was im Verschleissfall 1524 mm Spurweite entspricht.

⁷ Nach (Wichser, et al., 2005) meint U-Bahn lediglich eine „unabhängige Bahn“.

betreibbar. Beispielsweise nach deutschem Recht werden U-Bahnen gemäss der Bau- und Betriebsordnung für Strassenbahnen (BO Strab) betrieben, auch wenn sich vor allem wegen der Zugsicherung Analogien zur Vollbahn herstellen liessen.

In der Schweiz existiert keine rechtliche Trennung in Strassenbahn (Tram) und Eisenbahn. Dies ermöglicht die einfachere Anwendung von Mischformen im urbanen Raum, beispielsweise bei der Frauenfeld-Wil-Bahn (Meterspurbahn) mit strassenmittiger Trassierung in der Ortslage Frauenfeld. Die Stadtbahn Zug (Baar – Zug – Luzern bzw. Zug – Arth-Goldau – Erstfeld) ist praktisch eine S-Bahn statt einer Stadtbahn, da sie auf dem gesamten Liniennetz als Vollbahn mit Vollbahnfahrzeugen betrieben wird.

Mischformen

Eine Kombination aus Strassenbahn und Eisenbahn stellen Tram-Train-Systeme dar. Diese nutzen im urbanen Bereich das bestehende Stadtbahnssystem mit dem Vorteil der dichten Haltestellenabstände und im Bereich des Umlandes das bestehende Eisenbahnnetz mit dem Vorteil der grosszügigeren Trassierung und den daraus folgend höheren Geschwindigkeiten. Nach (Nägeli, 2010) bestehen verschiedene Ausprägungen von Tram-Train-Systemen, wobei im Maximalfall sowohl im Eisenbahn- als auch im Strassenbahnnetz ein Mischverkehr mit anderen dort charakteristischen Verkehrsmitteln besteht. Klassisch wachsen Tram-Train-Systeme aus dem Strassenbahnnetz heraus in das Umland und nutzen dort die bestehende Infrastruktur mit („Karlsruher Modell“). Es gibt seltener auch den umgekehrten Fall des Train-Trams, beispielsweise bei der Stadt- und Regionalbahn Zwickau als „Zwickauer Modell“ (Schranil, 2008) mit Übergang des entsprechend ausgerüsteten Eisenbahnfahrzeugs auf das Stadtbahnnetz. Die Anwendung von Tram-Train-Systemen setzt dabei die Erfüllung der Vorschriften für die Eisenbahn *und* für die Stadtbahn voraus, was insbesondere fahrzeugtechnisch zu grösseren Herausforderungen bei Konstruktion und Zulassung führt.

2.1.3 Relevanz für die Störungsprognose

Für die Bahnbetriebsführung und darauf aufbauend auch die Bahnbetriebsforschung nebst ihren zugrunde liegenden Analysen ist die Spurgebundenheit der jeweiligen Bahnsysteme zentral. Dabei besteht wie ausgeführt kein Zusammenhang zwischen der technischen Realisierung der Spurgebundenheit und der Betriebsführung im Generellen. Entsprechend ist die detaillierte technische Ausgestaltung im konkreten Bahnsystem für die Störungsforschung wichtige Randbedingung im Sinne möglicher Entstörungsstrategien, aber nicht determinierend im Sinne der generellen Störungsprognose.

Die zentrale Eigenschaft der Spurgebundenheit bewirkt, dass ausschliesslich in hohem Masse systemkompatible Fahrzeuge auf dieser speziellen Infrastruktur eingesetzt werden können. Diese Systemkompatibilität findet auf einer sehr hohen Detailierungsebene statt und umfasst vor allem folgende Aspekte:

- | | |
|--|-----------------------|
| • Spurmass/Spurweite | → Fahrbahnnetz |
| • Fahrzeugumgrenzung/Lichtraumprofil | → Fahrbahnnetz |
| • Rad- und Schienenprofil (Spurkranzflankenwinkel) | → Fahrbahnnetz |
| • Bahnenergieversorgung (bei elektrischen Bahnen) | → Bahnenergienetz |
| • mögliche Informationsübertragung | → Telekomnetz |
| • Zugsicherungssystem | → Steuerung/Sicherung |

Der Einsatz dieser systemkompatiblen Fahrzeuge determiniert die Bahnproduktion und setzt Spezialwissen voraus, welches ausschliesslich beim Fachpersonal vorhanden ist. Ein simples Substituieren gestörter Ressourcen ist dabei nicht möglich. Dies erfordert einen sinnvollen Umgang mit Reserven *innerhalb* des jeweiligen (Bahn-) Systems. Erst diese systemimmanenten Reserven erlauben einen Ersatz gestörter Ressourcen.

Daraus resultierend sind ein *flexibles* Umfahren von gestörten Infrastrukturen oder der Einsatz eines *beliebigen* Ersatzfahrzeugs ebenso unwahrscheinlich wie der Rückgriff auf *beliebiges* Personal. Dies ist die betriebliche Spezifität der Bahnen, beispielsweise im Unterschied zum Linienbus: Eine gesperrte Strasse kann in aller Regel mehr oder weniger grossräumig umfahren werden. Ein Reservebus – auch jenseits des eigenen Busbetriebs oder aus dem Ausland – kann gemietet werden und ein Lenker mit entsprechender Fahrerlaubnis kann innerhalb kurzer Zeit eingewiesen und eingesetzt werden. Diese Flexibilität ist, ausgelöst durch die Komplexität von Bahnsystemen und im Interesse der Sicherheit in Bahnsystemen, nur bedingt und im Rahmen der technischen Möglichkeiten anzustreben.

Eine Anwendung der Störungsprognose auf andere als in den Fallstudien zu behandelnde Bahnsysteme ist grundsätzlich möglich. In Abhängigkeit vom jeweiligen System ist dabei eine Verschiebung der Störungsschwerpunkte zu beobachten (beispielsweise wird eine Standseilbahn kaum Fahrplanabweichungen durch Zugfolgeverspätungen aufweisen). Die grundlegenden Zusammenhänge der Störungsanalyse und der Prognoseprozess bleiben von den jeweiligen Systemspezifika der einzelnen Bahnsysteme unberührt, da das gemeinsame Merkmal der Spurbundenheit dominiert. Betrieblich wird in dieser Arbeit auf Voll- und Stadtbahnen fokussiert.

2.2 Ressourcenbasierte Störungsdefinition

2.2.1 Normen- und Branchensicht auf Störungen

Aufbauend auf dem charakterisierenden Eigenschaften der spurgeführten Verkehrssysteme (siehe Kapitel 2.1) gilt es nun, die Frage nach dem bisherigen Verständnis von Störungen zu beantworten und eine für die weitere Arbeit zu verwendende Störungsdefinition abzuleiten. Anschliessend sind die Systemleistungsfähigkeit und die Rolle der Verspätungen im Störfall zu betrachten. Nähert man sich aus (bahn-) technischer Sicht dem Thema Störung, besteht die Tendenz, lediglich rein technische Aspekte zu berücksichtigen. Dies widerspricht in gewisser Weise dem realen Störungsgeschehen: Neben gestörten Komponenten prägen rein prozessuale Aspekte das Betriebsgeschehen und folglich auch das Störungsgeschehen. Daher sind rein betrieblich-prozessuale Aspekte ebenso betrachtungsrelevant und rechtfertigen die Beschränkung auf technische Aspekte keinesfalls. Der Ausfall einer Ressource oder deren ungeeigneter bzw. verzögerter Einsatz führen in gleicher Weise wie technische Störungen zu Abweichungen vom geplanten Produktionsprozess im Sinne der abzuleitenden Definition. Die konventionelle Analyse von Störungen erfolgt bisher auf zwei Arten:

- Störungen als Ausfall technischer Komponenten (technische Betrachtung)
- Störungen basierend auf Fahrplanabweichungen (betriebliche Betrachtung)

Eine einheitliche Definition des Störbegriffs in Bahnsystemen besteht hierbei bislang nicht (Monecke, 2010). Entsprechend heterogen ist das Spektrum der verwendeten Definitionen, wie folgende nicht abschliessende Zusammenstellung an einigen Normen, Richtlinien bzw. Vorschriften verdeutlicht (Schranil, et al., 2012). Eine Störung wird demnach aufgefasst als:

- Zustand einer Einheit, gekennzeichnet durch seine Unfähigkeit, aus beliebigem Grund eine geforderte Funktion zu erfüllen (CENELEC, 2010)
- Ein Fehler ist eine unzulässige Abweichung der Ist-Merkmalwerte eines Merkmals vom Sollwert („Fehler“ (REFA, 1985))
- bemerkbare unangenehme Abweichung vom geplanten Betriebszustand (VDV, 2009)
- Störungen sind Abweichungen von betrieblichen Planungen oder definierten Sollzuständen (DBAG-I-NPB, 2010)
- Betriebsabwicklung während einer akuten Störung, die Änderungen gegenüber dem geplanten Verkehr verlangen („Störungsbetrieb“ (SBB-I-B, 2012))
- Zustandsänderung von „normal“ zu „Abweichung“ (Engelhardt, 2009)

Im Kontext dieser Arbeit interessieren jedoch technische *und* betriebliche Aspekte in ihrer Verknüpfung. Es ist dabei das Ziel, fortfolgend einen generischen Störungs begriff herauszubilden, welcher der weitergehenden Forschung übergeordnet werden kann und welcher als charakterisierendes Merkmal sowohl technischer als auch betrieblicher Störungen dienen kann, unabhängig vom konkreten Bahnsystem oder den Besonderheiten der dortigen Bahnproduktion.

2.2.2 Ressourcenorientierung und Störungsdefinition

Für wissenschaftliche Auswertungen und betriebliche Vergleiche zwischen Bahnnetzen sind heterogene Auffassungen, wie in Kapitel 2.2.1 aufgezeigt, ungeeignet. Es ist als zentrale Anforderung an eine Störungsdefinition vielmehr notwendig, einheitliche und vom konkreten Bahnsystem unabhängige Kriterien für die Charakterisierung einer Abweichung als Störung zu generieren. Diese Störungsdefinition muss sowohl technische als auch betriebliche Aspekte des Störungsgeschehens einbeziehen. Dabei darf es keine Abhängigkeit von der vorherrschenden Produktionsweise oder dem Störungshergang im Sinne von technischer oder betrieblicher Abweichung geben, da dies der Komplexität des Gesamtsystems Bahn nicht gerecht würde. Insbesondere Verspätungen sind per se keine notwendige Bedingung der Existenz einer Störung, aber womöglich zentrale Begleiterscheinung.

In dieser Arbeit werden die Ressourcen des Bahnbetriebs nebst ihrer Allokation als charakterisierender Aspekt einer Störung herangezogen. Der Begriff „Ressource“ geht auf das lateinische „resurgere“ (hervorquellen) zurück und ist weitgehend synonym zu „Produktionsfaktor“ (Weidmann, 2011). Im Rahmen der vorliegenden Forschung wurde eine ressourcenorientierte Störungsdefinition aufgestellt:

Eine Störung ist ein vom Regelbetrieb abweichender Zustand, dessen Behebung ausserplanmässige Ressourcen erfordert.

Diese Definition basiert auf den spezifischen Ressourcen des Bahnbetriebs, welche in Kapitel 3.1 vertieft werden. Die Störung ist hier der Oberbegriff für technische und betriebliche Störereignisse. Der Einsatz ausserplanmässiger Ressourcen ist die notwendige Bedingung für die Existenz einer Störung (Schranil, et al., 2013). Das Wesen der ausserplanmässigen Ressourcen unterscheidet sich nicht von der Art planmässiger Ressourcen; es sind stets Fahrzeuge, Infrastruktur, Informationen, Personal und der Betrieb als prozessualer Aspekt zu betrachten. Das trifft neben der Erstellersicht auch auf die Nutzersicht zu, wobei hier die Ressourcen Zeit, Geld und Komfort zentral sind.

Im Störungsfall wird jedoch der *Einsatz* dieser Ressourcen modifiziert. Wird im Störungsfall erstlerseitig rechtzeitig die gestörte Ressource substituiert, so bemerkt der Endkunde dieses Ereignis idealerweise nicht. Es handelt sich dann dennoch um eine Störung, da der Einsatz jener Ersatzressource ungeplant war und beispielsweise einen Eingriff des Betriebspersonals erforderte. Beispielhaft sei auf den rechtzeitig bereitgestellten, gleichwertigen Ersatzzug oder die Umleitung des Zuglaufs über eine gleichwertige Ausweichstrecke verwiesen. Wird eine technische Störung durch Redundanzen betrieblich quasi unsichtbar, so sind die Personal- und Materialaufwendungen zur vollständigen Wiederherstellung aller Anlagenfunktionen jene ungeplanten Ressourcen, die das Ereignis als Störung charakterisieren. Hier sei beispielsweise auf den Ausfall einer redundanten Klimaanlage verwiesen, deren Reparaturerefordernis die technische Störung charakterisiert, ohne dass ein Betriebseinfluss oder eine Wirkung auf den Endkunden zu verzeichnen gewesen wären.

Entsprechend ist die endkundenseitig spürbare Verzögerung im Betriebsablauf ebenso als Störung zu bezeichnen, da hier die (Nutzer-) Ressource Zeit im ungeplanten Umfang beansprucht wird. Erst durch die Abstraktion des Störereignisses auf den zugrunde liegenden Ressourceneinsatz der Bahnproduktion wird eine wissenschaftlich konsistente Analyse von „Störungen“ in verschiedenartigen Bahnsystemen realisierbar. Dies schafft die Grundlage für die weitergehenden Betrachtungen.

2.2.3 Systemleistungsfähigkeit im Störfall

Am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT der ETH Zürich bestehen bereits Untersuchungen der Störungsforschung im Bahnbereich. Die vorliegende Arbeit zur Störungsprognose beschäftigt sich mit statistischen Mustern und Handlungsoptionen im Störungsgeschehen. Sie fokussiert dabei auf kleinere und mittlere technische wie betriebliche Störungen der Bahnproduktion. Somit ist sie das wissenschaftliche Bindeglied zwischen der Analyse von Grossstörungen (siehe Abbildung 3) wie (Teil-) Netzzusammenbrüchen (Dorbritz, 2012) und der Frage der technischen Verfügbarkeit von Systemen und Komponenten nebst ihrer charakteristischen Werte aus dem RAMS-Bereich (vgl. auch (Fink, et al., 2013)).

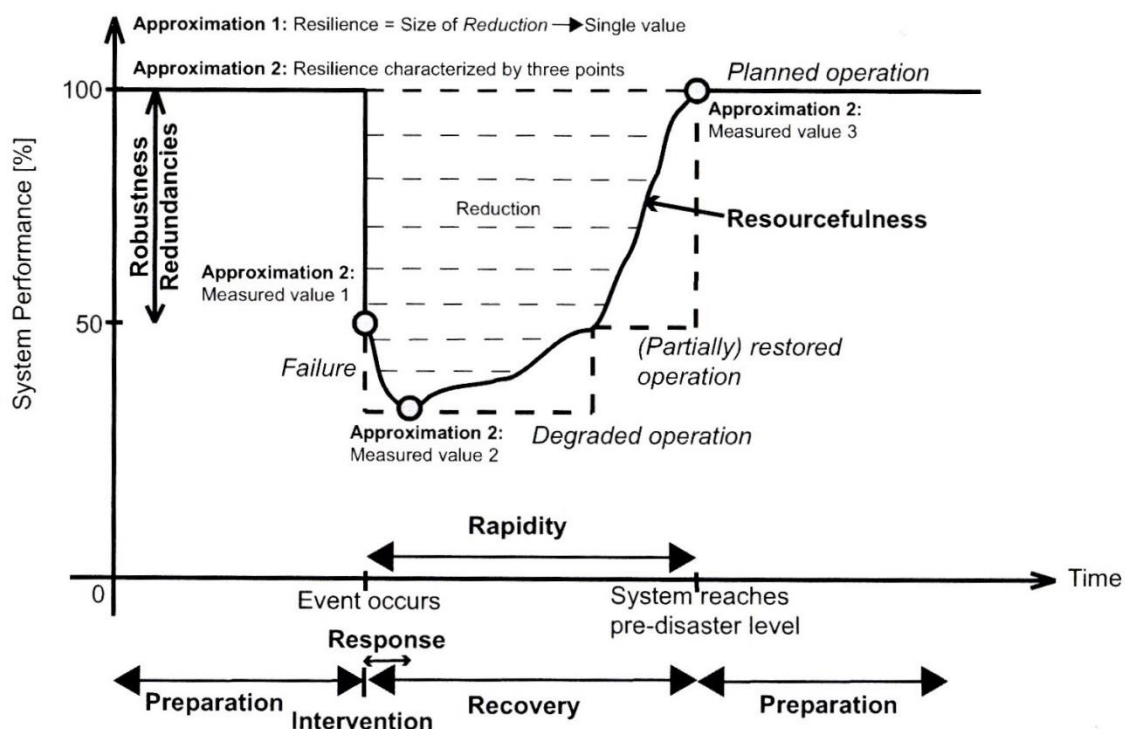


Abbildung 3: Systemleistungsfähigkeit nebst Widerstandsfähigkeit im Störfall (Dorbritz, 2012)

Im allgemeinen Störfall (vgl. Abbildung 3) sinkt die Leistungsfähigkeit des gesamten Bahnsystems. Dies resultiert einerseits aus möglicherweise technisch gestörten Systemen und Komponenten sowie andererseits aus ausserplanmässig benötigten Ressourcen für die Behebung dieser Störung (siehe Störungsdefinition in Kapitel 2.2.2), die dann an anderer Stelle nicht

mehr verfügbar sind. Der extremste Beeinträchtigungsgrad einer Störung tritt hierbei nicht schlagartig in voller Grösse auf. Je nach Art des Ereignisses kommt es zur kaskadenartigen Reduktion der Gesamtleistungsfähigkeit, was insbesondere im Auftreten von Folgeereignissen und in sich einstellenden Systemrückkopplungen begründet liegt. Durch die technische wie betriebliche Entstörung wird die Systemleistungsfähigkeit schrittweise wieder hergestellt. Den Endzustand bildet die Wiederaufnahme des Regelbetriebs inklusive der Wiederherstellung aller Funktionalitäten der Produktionsressourcen im (Bahn-) Gesamtsystem. Bereits daraus lässt sich erkennen, dass für die Störungsbetrachtung stets zwischen technischen und betrieblichen Aspekten zu differenzieren sein wird.

2.2.4 Rolle der Verspätungen

In der endkundenseitigen Störungswahrnehmung der Bahnproduktion spielen Verspätungen eine zentrale Rolle; in der Bahnbetriebsforschung sind sie hingegen lediglich *eine* Störungsauswirkung. In Kapitel 2.2.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass Störereignisse nicht zwingend Verspätungen auslösen müssen und daher kein hinreichendes Kriterium einer vorhandenen Störung sein können. Da Störungen in der betrieblichen Auswirkung dennoch leicht zu Verspätungen führen, interessiert zunächst die Grenze zwischen Pünktlichkeit und Verspätung. Zahlreiche Bahnbetreiber haben ein eigenes Verspätungsverständnis (Nyström, 2008). Es zeigt sich ein extrem heterogeneres Bild, hier beispielhaft für die SBB aufgezeigt (Strässle, 2011). Als Verspätung gelten in Abweichung vom Sollfahrplan:

- 3 min Personenverkehr
- 5 min hochpriorisierte Postzüge
- 15 min Postzüge
- 30 min Binnengüterverkehr
- 60 min Transitgüterverkehr

Als Kriterium für diese Grenzen fungiert der Zeigersprung, das heisst, die Minuten werden im Verzögerungsfall ganzzahlig abgerundet und bei Verfrühung aufgerundet. Zum Vergleich: Im Luftverkehr gelten 15 Minuten Abweichung noch als pünktlich, im europäischen Bahnverkehr gemäss UIC hingegen 5 Minuten – mit national unterschiedlichen Rundungsregeln (UIC 450-2, 2009). Dies bedeutet beispielsweise, dass ein Personenzug bei DB Netz in Deutschland mit 05:59 Minuten Verzögerung gegenüber der geplanten Fahrlage noch als pünktlich gilt. Insofern ist die Bezeichnung Verspätung bereits eine Bewertung der Abweichung (Vorzeichenkonvention „+“ für Verzögerungen, „-“ bei Verfrühung, gemäss Kapitel 0). Für die Bahnbetriebsforschung ist hier die wertungsneutrale Bezeichnung „Abweichung“ zu präferieren.

Je nach Analysefokus bestehen verschiedene lokale Messpunkte der Pünktlichkeit. Für den Endkunden ist neben der Zielstation vor allem das zeitliche Erreichen der Anschlusszüge von Interesse. Unterwegshalte interessieren praktisch kaum. Innerhalb der Bahnproduktion wird er-

stellerseitig oft auf die Ankunft am Zielbahnhof des Zuglaufs abgehoben. Dies verzerrt bei langlaufenden Zügen die Verspätungswahrnehmung, da scheinbar nur ein Zug verspätet ist, tatsächlich aber zahlreiche Anschlusszüge nicht erreicht werden konnten und somit endkundenseitig weitaus umfassendere Verspätungen eintreten. Demgegenüber verschiebt die Analyse aller kommerziellen Halte den Analysefokus in verspätungsseitig weniger auffällige und eher kurzläufige Züge der Feinerschliessung (Nah- und Regionalverkehr). Da dies die Problematik möglicher Anschlussbrüche auf Unterwegsstationen ebenso nicht hinreichend abbildet, verwenden die SBB die sogenannte Kundenpünktlichkeit und analysieren Abweichungen an 13 Netzknoten. Dazu werden die mutmasslichen Fahrgastanzahlen (Reisendenfrequenzen) eines jeden Zuges inklusive der Umsteiger zugrunde gelegt.

Implikation für die Störungsforschung

Im Störfall ist zwischen technischen und betrieblichen Aspekten zu unterscheiden. In betrieblichen Dimensionen ist einzig die Abweichung vom Planbetrieb oder dem geplanten Betrieb Analysegegenstand im Sinne der Nutzerressource Zeit. Die technische Betrachtung fokussiert auf die Zeitspanne vom Ereigniseintritt bis zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit der gestörten Ressource. Das kann auch eine Verschiebung der eigentlichen Intervention bedeuten, wenn beispielsweise die defekte Weiche in einer Endlage verkeilt wird oder die Reparatur am an sich betriebstüchtigen Fahrzeug auf den nächsten Werkstattaufenthalt verschoben wird. In einem derartigen Fall beeinflusst die verschobene, dann aber geplante Intervention auf Grund mangelnder Priorität zwar die technische Störungsdauer, das Ereignis ist aber nicht weiter betriebsrelevant. Dieser Umstand rechtfertigt wiederum die geringere Priorisierung und provoziert scheinbare Ausreisser in der Auswertung technischer Störungsdauern. Einige Betreiber (SBB-I-B-ROT, 2010) schliessen den jeweiligen Störfall dann vorerst ab und sprechen anschliessend von einer separaten Instandhaltungs- oder Baumassnahme. Die (zeitliche) Zuordnung zur eigentlichen Störung kann darunter leiden und Fehlinterpretationen technischer Störungsdauern auslösen, weshalb von dieser Unterteilung abzusehen ist.

2.3 Akteure im Störungsgeschehen

2.3.1 Systematik von Störereignissen

In diesem Kapitel werden Störereignisse zunächst systematisiert. Anschliessend werden die Akteure im Bahnbetrieb abgeleitet und elementare Prozesse für den Umgang mit Störereignissen aufgezeigt. Zur generellen Analyse des Störungsgeschehens wird folgende Systematik entwickelt und verwendet (Abbildung 4):

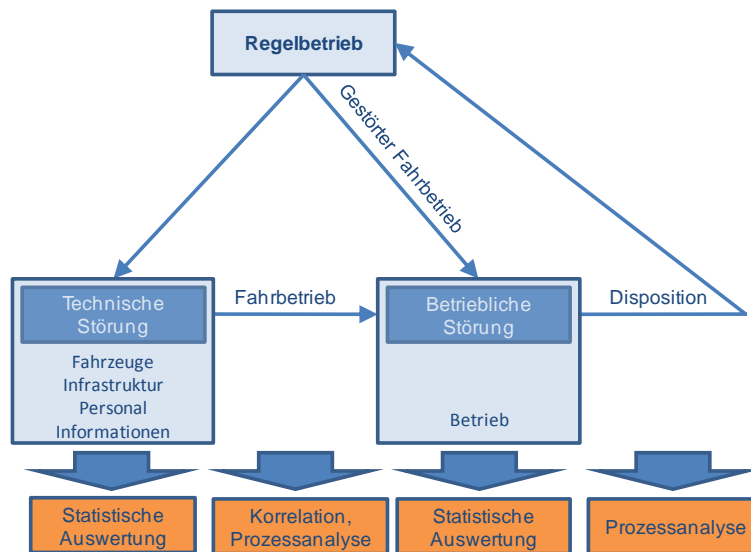


Abbildung 4: Systematik von Störereignissen nebst methodischem Ansatz (eigene Darstellung)

Den Ausgangspunkt der Bahnbetriebsforschung, im konkreten auch der Störungsforschung, bildet der geplante Fahrbetrieb („Regelbetrieb“) auf Grundlage jener an den Endkunden publizierten Informationen. Massgebend dafür ist die aktuelle Unterfahrplanperiode; entsprechend sind beispielsweise Fahrzeitabweichungen im Bauzustand gegenüber dem Normalzustand gemäss einem gültigen Baufahrplan nicht als „Verspätung“ oder „Störung“ zu betrachten.

Auf Grund mangelnder Verfügbarkeit von Komponenten des Bahnsystems kommt es zur technischen Störung. Dies an sich stellt noch keine Einschränkung des Bahnbetriebs dar. Erst durch den nicht oder nur teilweise möglichen Einsatz der gestörten Ressource für den Fahrbetrieb mu-tiert die technische Störung zu einer betrieblichen Störung. Diese Unterscheidung ist in dem Sinne relevant, dass beispielsweise eine vorübergehend unnutzbare, aber gleichzeitig nicht beanspruchte Infrastruktur per se keine betrieblichen Störungen nach sich zieht. Demgegenüber ist das Auftreten betrieblicher Störungen ohne (erkennbare) technische Ursache möglich, beispielsweise durch Verkehrsüberlastung, ins Netz einbrechende Verspätungen u. ä.

Ziel der Disposition muss es nun sein, geordnet und zeitnah in einen geplanten Betrieb als Zwischenstadium oder direkt in den Regelbetrieb zurückzukehren und Auswirkungen auf Fahrgäste sowie Kostenfolgen zu minimieren, ohne das Störungsausmass unnötig zu vergrössern (Schranil, et al., 2011). Der Fokussierung auf die Störungssystematik halber sind an dieser Stelle die Inter-

vention (siehe Kapitel 6.2) und die Ereigniskommunikation (siehe Kapitel 6.3) als weitere Folgeprozesse von Störereignissen nicht dargestellt.

In der Logik dieser Arbeit wird der Begriff Störung als Oberbegriff für technische wie betriebliche Ereignisse genutzt. Die Ressourcen im Bereich technischer Störungen sind demnach klar zuordnenbar, während im betrieblichen Bereich vor allem prozessuale Aspekte der Bahnproduktion zur Störung führen. Diese Unterscheidung ist für die späteren Analysen zentral.

Da Bahnsysteme (siehe Kapitel 2.1) eine enge technische, betriebliche und mit gewissen juristischen Einschränkungen auch organisatorische Verflechtung zwischen der Infrastruktur und dem Verkehr auf dieser Infrastruktur aufweisen, werden Aspekte mangelnder Fahrwegverfügbarkeit rasch als Störung offenbart. Dies unterscheidet die spurgebundenen Systeme von anderen Verkehrssystemen, in denen eher von „Verkehrsbehinderung“ oder „externen Einflüssen“ zu sprechen wäre und solchen Behinderungen leichter ausgewichen werden könnte (z. B. durch Umfahren einer Schadstelle auf dem Fahrradweg).

2.3.2 Elementare Bahnsystemakteure

Im Sinne der Störungsprognose erfolgt eine bewusste Eingrenzung der Analysen auf den zu optimierenden Umgang mit eingetretenen Störereignissen statt im Vermeiden von Störereignissen an sich. Seit der Richtlinie „91/440/EWG des Rates vom 29. Juli 1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft“, der in wesentlichen Aspekten auch die Schweiz folgt, ist im Bereich der Schieneninfrastruktur ein diskriminierungsfreier Netzzugang zu gewähren. Es wird in drei Ebenen separiert (Knieps, 1996):

- Ebene I Angebot im Eisenbahnverkehr
- Ebene II Aufbau und Betrieb von Zugüberwachungssystemen⁸
- Ebene III Aufbau und Betrieb von Schieneninfrastrukturen

Ebenfalls in (Knieps, 1996) werden drei Reformmodelle für den Betrieb in Netzen vorgestellt und diskutiert. Die angestrebte Marktöffnung für weitere Unternehmen bewirkt bei den Akteuren des Bahnbetriebs einen zunehmenden Pluralismus hinsichtlich der ökonomischen Zugehörigkeit. Den hier nicht zu diskutierenden Ansätzen zur Trennung von Netz und Betrieb (ggf. auch weitere Separierung hinsichtlich Zugüberwachungssystemen, s. o.) ist gemeinsam, dass im Störungsfall Akteure aufeinandertreffen werden, welche ökonomisch separierten Unternehmen angehören. Abbildung 5 illustriert diese Zusammenhänge. Auf der Ebene I in obiger Betrachtungsweise agieren die Verkehrsunternehmen, im konkreten Fall die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU). Jene sind für den Endkunden als „Bahn“ wahrnehmbar. Die EVU beschränken sich somit auf die Leistungserstellung im Bahnsystem. Dazu betreiben und unterhalten sie Schienenfahrzeuge. Die Ebenen II und III sind für die Endkunden nicht mehr direkt sichtbar, aber unternehmerisch oftmals

⁸ inklusive Bahnbetriebsführung und Kapazitätszuteilung

vereint. Die verkehrlichen Infrastrukturen werden auf Ebene III geplant, errichtet und unterhalten. Tätig sind hierbei die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU). In aller Regel führen die EIU auch die Prozesse der Bahnproduktion im Sinne der Betriebsführung nebst der Kapazitätszuteilung auf Ebene II. Somit resultieren im Vollbahnbereich aus den regulatorischen Ebenen I bis III die beiden elementaren Akteure EVU und EIU.

	Vollbahn	Stadtbahn
Ebene I	EVU	Stadtbahn (Fahrbetrieb)
Ebene II	EIU	
Ebene III		Stadtbahn (Infrastruktur)

Abbildung 5: Bahnsystemakteure in Voll- und Stadtbahn im Sinne der EWG-Richtlinie (eigene Darstellung)

Im Stadtbahnbereich sind die Trennungen zwischen den Ebenen nicht mehr in dieser Schärfe nachzeichenbar. Hier arbeitet die Ebene II näher mit der Ebene I zusammen, während die Ebene III davon eher separiert agiert. Der dabei zu verzeichnende Unterschied gegenüber der Vollbahn rührt aus der stärkeren Verflechtung von Sicherheitstechnik und Bahnbetriebsführung im Sinne des Einstellens gesicherter Fahrwege für die Vollbahn her.

2.3.3 Elementarprozesse im Umgang mit Störereignissen

Die Betriebsführung im Störfall ist eine zentrale Herausforderung in der Bahnproduktion. Bei Störereignissen ist das Zusammenwirken verschiedener Akteure erforderlich (siehe Kapitel 2.3.2). Störfälle sind von einer Menge auszutauschender Informationen begleitet. Eine zentrale Rolle spielen dabei Meldeprozesse zwischen den Akteuren des Bahnbetriebs. Die Interaktion der Akteure der Bahnproduktion lässt die Identifikation von fünf funktionalen Elementarprozessen zu:

- Beobachten/Überwachen des Betriebsgeschehens und der dazu erforderlichen Technik
- Melden etwaiger Abweichungen
- Disponieren als operative Anpassung des Betriebsprogramms
- Umsetzen der Disposition (Regelkreisschluss zum Beobachten/Überwachen)
- Informieren der betroffenen Endkunden

Die detaillierte Ausgestaltung dieser Prozesse kann zwischen den Bahnsystemen, aber auch zwischen einzelnen Bahnbetreibern zahlreiche Ausführungsvarianten aufweisen. Die grundsätzliche Logik hinter dem Umgang mit Störereignissen in der Bahnproduktion lässt jedoch fundamentale Gemeinsamkeiten erkennen (Abbildung 6).

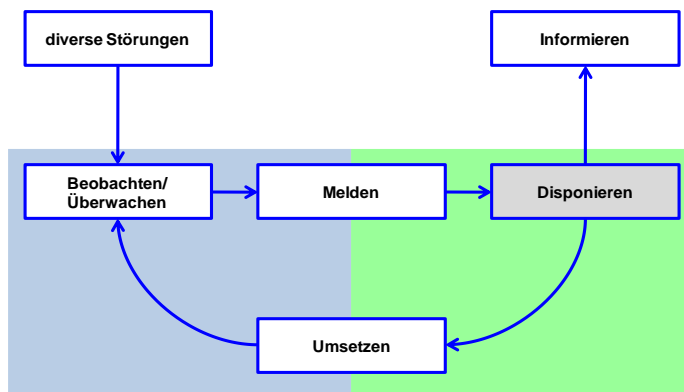


Abbildung 6: Elementarprozesse im betrieblichen Störungsumgang (eigene Darstellung)

Netzgröße und Betriebsprogramm eines Bahnsystems determinieren Hierarchie und Komplexität bei der Realisierung dieser Prozesse. Die Elementarprozesse „Beobachten/Überwachen“ – „Melden“ – „Disponieren“ – „Umsetzen“ sind jedoch bei allen Bahnsystemarten identifizierbar und beruhen auf diesen elementaren Funktionalitäten. Je kleiner das Bahnsystem ist, umso grösser ist der Trend zur Bündelung dieser Funktionalitäten in einer Person (Fahrpersonal) und umso kleiner sind die nutzbaren Synergieeffekte bei Zentralisierung.

Der Extremfall ist demnach die Minimalvariante einer einzelnen Stichstrecke mit geringem Verkehrsaufkommen. An diesem Gedankenexperiment lassen sich die elementaren Funktionalitäten ebenso identifizieren wie an einem realistischeren grösseren Bahnnetz. Demnach könnte in einem solch minimalem „Netz“ aus nur einer Strecke auf die Disposition verzichtet werden. Im Gegenzug steigt der effektive Handlungsrahmen von Dispositionsmaßnahmen mit Netzgröße und Betriebsprogramm überproportional an. Die dabei vorherrschende Komplexität (nicht Kompliziertheit) erlaubt besonders in dichten, hochausgelasteten Bahnnetzen bislang keinen Verzicht auf technisch unterstützte menschliche Disposition im Sinne des Letztentscheids; die menschliche Entscheidungsfähigkeit in komplexen Situationen übersteigt bislang die künstliche Intelligenz.

Auf die genannten Elementarprozesse (siehe Visualisierung in Abbildung 6) stützen sich die Analysen der Meldekettens bei verschiedenen Bahnbetreibern (siehe Kapitel 6.3.1). Im vorliegenden Kontext interessieren vorab aber eher generelle Aspekte daraus. Hierbei eignet sich besonders die Darstellung als Regelkreis (Lübke, et al., 2008), da mit der Umsetzung der Dispositionsmaßnahme eine neue Situation innerhalb des Betriebsführung entsteht, welcher erneut zu beobachten bzw. zu überwachen ist. Eine zentrale Rolle (graue Markierung des zugehörigen Feldes in Abbildung 6) kommt dem Disponieren zu. Die Elementarprozesse lassen sich zunächst den Ressourcen Information (grüne Hintergrundfärbung) und Betrieb (blaue Hintergrundfärbung) zuordnen. Weitere Ressourcen werden bei detaillierteren Analysen sichtbar.

Moderne Ansätze der Bahnproduktion bringen Operation, Disposition, Intervention sowie bedingt auch den Fahrbetrieb strukturell näher zusammen um Synergien zu nutzen. Wegen der Trennung von Netz und Betrieb im EU-Raum sind die Vollbahnen davon meist weniger betroffen, konzentrieren aber ihrerseits Operation, Disposition und Intervention zunehmend in (Infrastruktur-) Betriebszentralen.

2.4 Störungsverständnis in anderen Fachgebieten

2.4.1 Abstraktion von Störereignissen

Ein jedes Störereignis im Bahnsystem weist eine individuelle Charakteristik auf. Diese besteht sowohl in der Ereignisart nebst dem Hergang als auch in der Behebung mit den detaillierten Konsequenzen für den übrigen Bahnverkehr. Jedoch lassen sich – wie noch zu zeigen sein wird – Muster im Störungsgeschehen erkennen und Ereignisklassen bilden. Im Sinne der Störungsforschung sind die Abstraktion der Einzelereignisse und deren detaillierte Analyse zunächst gleichberechtigt. Im Sinne der Störungsprognose verschiebt sich der Forschungsfokus vom einzelnen Ereignis hin zur Grundgesamtheit der Ereignisse einer Klasse, um relevante Muster im Störungsgeschehen zu identifizieren. Diese können wiederum zu einer verbesserten Beherrschung des Einzelereignisses beitragen.

Abstrahiert man Störereignisse, so erschliessen sich Analogien zu anderen Fachgebieten. Einige diesbezüglich relevante Fachgebiete werden im Folgenden vorgestellt und bieten wichtige Denkanstöße für die Störungsprognose innerhalb der Bahnproduktion. Andererseits lassen sich fachlichen Verknüpfungen zu benachbarten Forschungsgebieten aufgreifen, um einzelne Aspekte der vorliegenden Störungsforschung besser einordnen zu können.

Referenziert man die Bahnproduktion auf die (Industrie-) Produktion, so gleicht das konkrete Störereignis dem (Teil-) Ausfall eines Produktionsmittels. Diese Sichtweise führt hin zu Ansätzen aus der Produktion (siehe Kapitel 2.4.3). Die Spezifität der Bahnproduktion als Dienstleistung für den Endkunden ist dabei die fehlende Lagerbarkeit. Zu unterscheiden sind weiterhin technische und betriebliche Störungen. Die Recherche der technischen Störungsursache führt meist auf mangelnde Zuverlässigkeit und/oder Verfügbarkeit der Systeme, Teilsysteme und Komponenten. Dahingehend analysiert gelangen Aspekte der RAMS-Betrachtung mit den Stossrichtungen Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit in den Fokus (siehe Kapitel 2.4.2).

Ein weiterer Ansatz interpretiert die (technische und/oder) betriebliche Störungsdauer stochastisch. Sie wird dann zur Zufallsgrösse. Hierzu existieren bereits umfassende Erfahrungen aus der Verkehrssystemtheorie, welche eine Grundlage für die statistischen Störungsauswertungen in der Bahnproduktion (siehe auch Kapitel 3.3) bilden. Dabei entsteht ein starker Bezug zur Mean Down Time (MDT) aus dem RAMS-Bereich, wenn auch aus der Perspektive der angewandten Statistik. Im Unterschied zur klassischen Produktion besteht zumindest im Personenverkehr ein direkter Kontakt zum Endkunden in Form des Fahrgasts. Dies gewinnt bei der Ereigniskommunikation an Bedeutung und offenbart die fachliche Verflechtung zur Verkehrspsychologie (siehe Kapitel 2.4.4). Dort liegen weitere Untersuchungen über den Wert und die Wahrnehmung von Warte-, Umsteige- und Fahrzeit vor.

2.4.2 RAMS-Betrachtung für Störereignisse

Die Betrachtung technischer Störereignisse auf Grundlage des Ausfallverhaltens einzelner Komponenten im technischen Gesamtsystem ist Kerndisziplin der RAMS-Betrachtung. RAMS als Akronym der englischen Begriffe Reliability (Zuverlässigkeit), Availability (Verfügbarkeit), Maintainability (Instandhaltbarkeit) und Safety (systemimmanente Sicherheit) greift die inhaltliche Verflechtung dieser Aspekte auf. Im englischen Sprachgebrauch besteht eine Unterscheidung zwischen systemeigener Sicherheit (Safety) und Sicherheit gegen Eingriffe ins System von aussen (Security). Teilweise wird die Security in die Betrachtungen integriert, was dann als RAMS(S) bezeichnet wird. Dabei ist im Vorfeld zu definieren, auf welcher Betrachtungsebene RAMS anzuwenden ist. In der Regel sind dies Systeme, Subsysteme oder auch einzelne Komponenten. Auf dieser Betrachtungsebene existieren zwei digitale Zustände:

- Betriebszustand (up state)
- Ausfallzustand (down state)

Der Übergang zwischen den Zuständen erfolgt in diesem Modell jeweils schlagartig. Alle relevanten Dauern werden als mittlere Zeiten gemessen. Die mittlere Dauer des Ausfallzustands kennzeichnet die Mean Down Time (MDT). Demgegenüber ist die mittlere Dauer des Betriebszustands als Mean Time Between Failure (MTBF) definiert und synonym zur Mean Up Time (MUT) zu verstehen. Die mittlere Dauer zwischen dem Eintritt zweier Ausfälle ist demnach die Summe aus MTBF und MDT. Die Mean Down Time gliedert sich wiederum in administrative und logistische Verzögerungen (MAD bzw. MLD) sowie die mittlere Reparaturzeit Mean Time to Repair (MTTR). Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kenngrößen nebst ihrer Definition.

MTBF	Mean Time between Failures	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen
MUT	Mean up Time	mittlere Klardauer (mittlere Betriebszeit eines Systems)
MDT	Mean down Time	mittlere Unklarzeit (mittlere Zeit unabhängig vom Grund)
MTTR	Mean Time to repair/restore/recover	mittlere Reparaturzeit
MAD	Mean administrative Delay	mittlere Administrative Verzögerung
MLD	Mean logistics Delay	mittlere logistische Verzögerung

Tabelle 3: Begriffsdefinition gemäss CLC TR 50126-2 (eigene Darstellung IVT)

Mit diesen Begriffen ist eine konsistente Zustandsbeschreibung auf der jeweiligen Betrachtungsebene möglich. Interessant ist dabei vor allem die zeitliche Progression. Daraus resultiert die Dauer und somit der Zahlenwert der charakteristischen Größen. Der Übergang zwischen den einzelnen Phasen wird als schlagartig angenommen. Für technische Störereignisse ist eine derartige Aufbereitung wegen ihrer Verwendung in der EN 50126 zu empfehlen, jedoch im Bahnbetrieb bisher nicht konsequent implementiert. Stattdessen bestehen heterogene Begriffswelten, was die Vergleichbarkeit bisweilen erschwert. Am Beispiel der Interventionsstatistik der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) lässt sich zeigen, dass eine „Übersetzung“ der verwendeten Bezeichnungen in die Fachbegriffe der RAMS-Themenwelt möglich ist (siehe Ergänzungen in Abbildung 7).

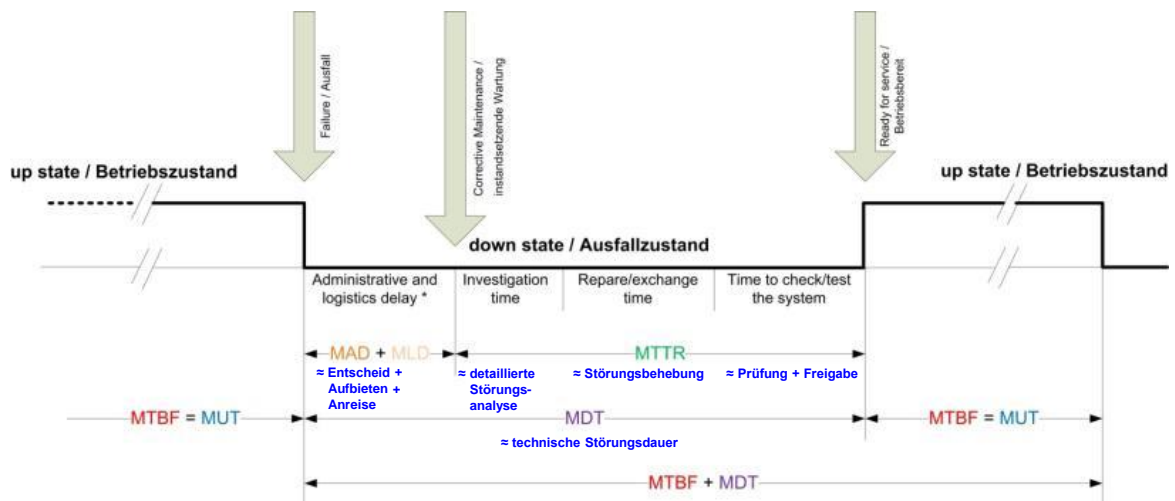


Abbildung 7: Systemzustände gemäß CLC TR 50126-2 mit SBB-Pendants (eigene Darstellung nach Schema IVT)

Obige Abbildung 7 zeigt die charakteristischen Zeitdauern der RAMS-Betrachtung basierend auf EN 50126 mit den Fachbegriffen aus Tabelle 3. Von zentraler Bedeutung für die Störungsprognose sind die technische Störungsdauer, welche mit der MDT identisch ist, und die MTTR, welche der Summe aus den Dauern für detaillierte Störungsanalyse, Störungsbehebung nebst Prüfung/Freigabe gleicht. Die MTTR wird gelegentlich als „Verfügbarkeitsreparaturzeit“ dokumentiert. Die Analyse der Felddaten (siehe auch Kapitel 6.2.3) wird noch zeigen, dass die Datenhaltung technischer Störungen bislang nur selten alle interessanten (Teil-) Zeiten bereithält.

Zweckgemäss besteht eine Übertragbarkeit von EN 50126 (Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)) bei technischen Störungsbetrachtungen. Hierbei sind Teilzeiten definiert und standardisiert erfassbar. Ein Pendant für die betriebliche Störungsdauer und die Beeinträchtigungssumme auf Grund der Parallelität mehrerer Betriebsprozesse besteht nicht. Die Auswirkung auf den Bahnbetrieb im Sinne der Abweichungen vom Betriebsprogramm im Sinne rein prozessual bedingter Ereignisse ist weniger gut abbildbar. Für rein technische Fragestellungen bietet die RAMS-Betrachtung hingegen eine Terminologie mit international einheitlich definierten Kennwerten an. Daher sind die Datenerfassungen der Bahninfrastrukturbetreiber mit Vorteil in diese Richtung weiterzuentwickeln, was im Sinne des Lernens aus technischen Störungen besonders zu empfehlen ist und einen Vergleich zu anderen Produktionsformen aus der Industrie ermöglichen sollte.

2.4.3 Störereignisse in der (Industrie-) Produktion

Im Vergleich zur industriellen Produktion ist die Bahnproduktion eine sehr spezielle Produktionsform mit ortsveränderlichen Produktionsmitteln und einer beachtlichen Flächenausdehnung. Beide Produktionsformen müssen jedoch mit Störereignissen umgehen, weshalb sich vergleichende Betrachtungen anbieten. Generell gibt es verschiedene Strategien des Störungsmanagements (Patig, 2001); dies sind zunächst Prävention, Antizipation, Ignoranz und eine konkrete Reaktion.

Letzteres ist besonders im Umgang mit eingetretenen Bahnstörungen relevant. Abbildung 8 gibt einen kompakten Überblick über das Störungsmanagement der Produktion.

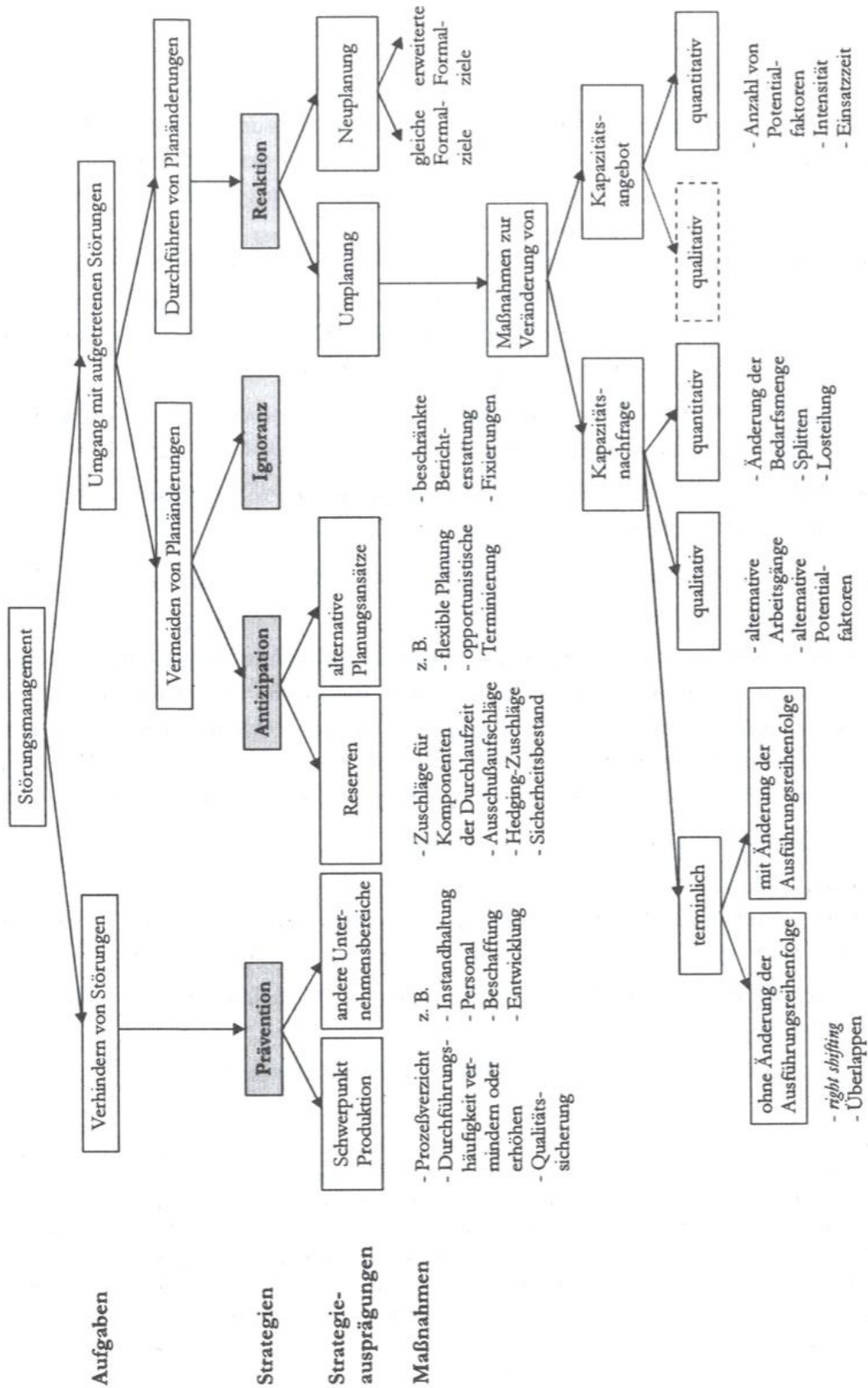


Abbildung 8: Aufgaben und Strategien des Störungsmanagements in der Produktion (Patig, 2001)

Arbeitsgruppe REFA

Die Arbeitsgruppe REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.) hat sich bereits sehr früh mit Produktionsabläufen beschäftigt und entsprechende Handbücher erarbeitet. Demnach führen Störungen zu unerwarteten Unterbrechungen des Arbeitsablaufs. Zu derartigen unerwarteten Unterbrechungen kann es kommen, wenn

- die Versorgung mit Eingaben unterbrochen wird (Informationen, Material, Energie usw.)
 - in den Eingaben versteckte Mängel sich bemerkbar machen und die Einstellung des Arbeitsvorganges erforderlich machen
 - Betriebsmittel oder Personal ausfallen.
- (REFA, 1985)

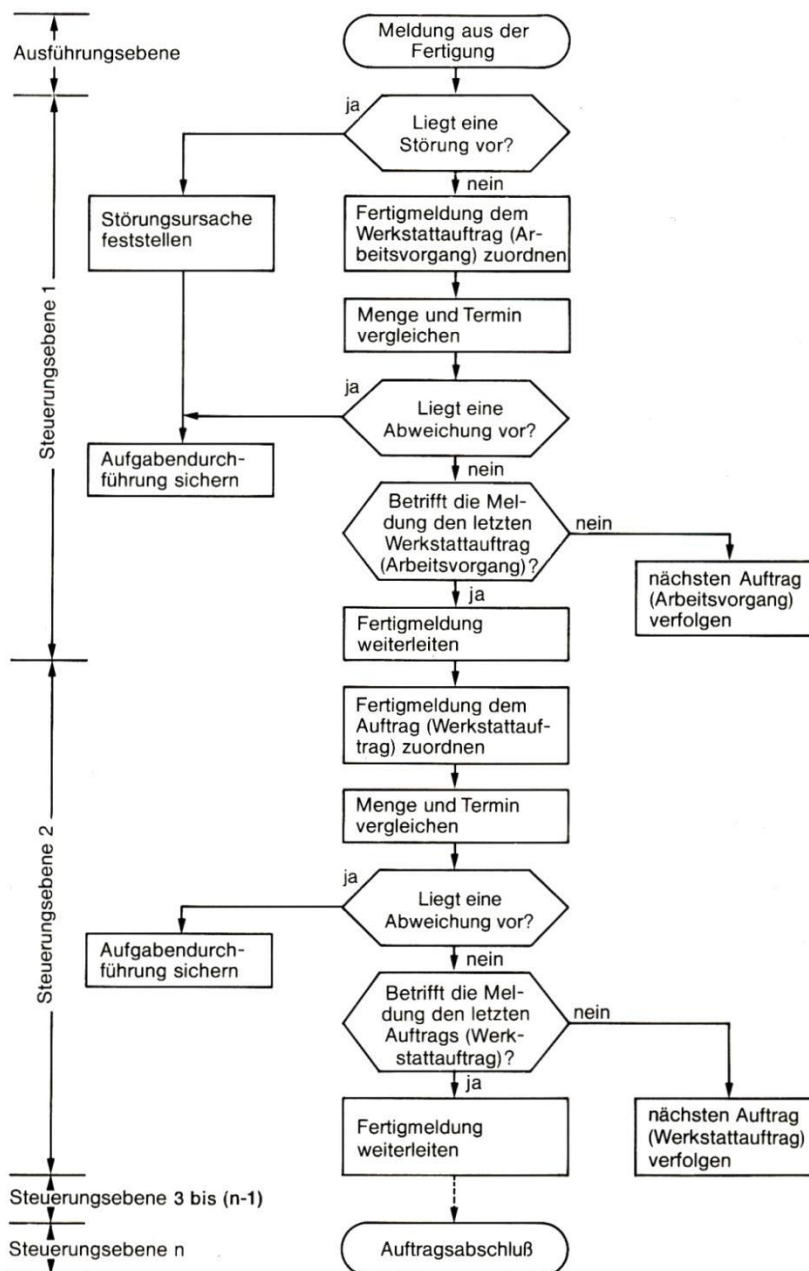


Abbildung 9: Ablauf der Mengen- und Terminüberwachung nebst Steuerungsebenen (REFA, 1985)

Da Störungen schlimmstenfalls einen Produktionsstillstand auslösen können, ist eine kontinuierliche Überwachung der Produktion zu gewährleisten. Somit sollen kritische Abweichungen frühzeitig erkannt werden. Abbildung 9 zeigt entsprechend den Ablauf der Mengen- und Terminüberwachung in der Produktionssteuerung, konkret dargestellt für die Werkstattsteuerung.

Störungsmanagement und -ursachensuche

Der Eintritt einer Störung (Begriffsdefinition für Bahnproduktion siehe Kapitel 2.2.2) erfordert einen geänderten Ressourceneinsatz (siehe auch (Fischäder, 2007)). Das Störungsmanagement hat dabei eine entscheidende Bedeutung für die Produktion mit wachsenden Anforderungen, vgl. (Meyer, 2007). Störgrößen sind dabei zunächst einer Bewertung zu unterziehen, bevor es zur Einleitung etwaiger (Gegen-) Massnahmen kommen kann (siehe Abbildung 10):

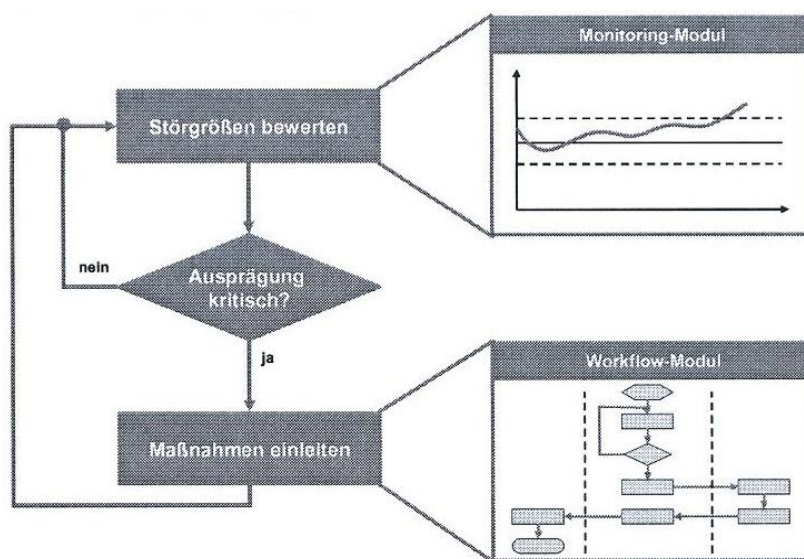


Abbildung 10: Logistisches Störungsmanagement in kundenverbrauchsorientierten Wertschöpfungsketten (Meyer, 2007)

Das Ermitteln von Störungsursachen ist immer dann erforderlich, wenn beim Überwachen der Bereitstellung und der Arbeitsabläufe eine wesentliche Soll-Ist-Abweichung festgestellt wurde. Während die Ist-Datenerfassung zunächst nur den Ort und die Dauer einer Störung erfasst, geht die Ermittlung der Störungsursachen darüber hinaus und versucht zu analysieren, wo wann und warum die aufgetretene Störung verursacht wurde (REFA, 1985). Bei der Suche nach Störungsursachen sind allerdings lediglich Vergangenheitsdaten sichtbar. Die eigentliche Störungsentstehung ist zumindest teilweise nicht mehr sichtbar. Bei der Suche nach Störungsursachen entsteht eine verzweigende Struktur, weil eine Störung immer aus mehreren Ursachen entstanden sein kann (REFA, 1985). Aus diesem Ansatz resultiert der klassische Fehlerbaum, dessen Untersuchungsrichtung der ursprünglichen Abweichungsentstehung entgegen gerichtet sein sollte (Abbildung 11), um Fehler effizienter recherchieren zu können.

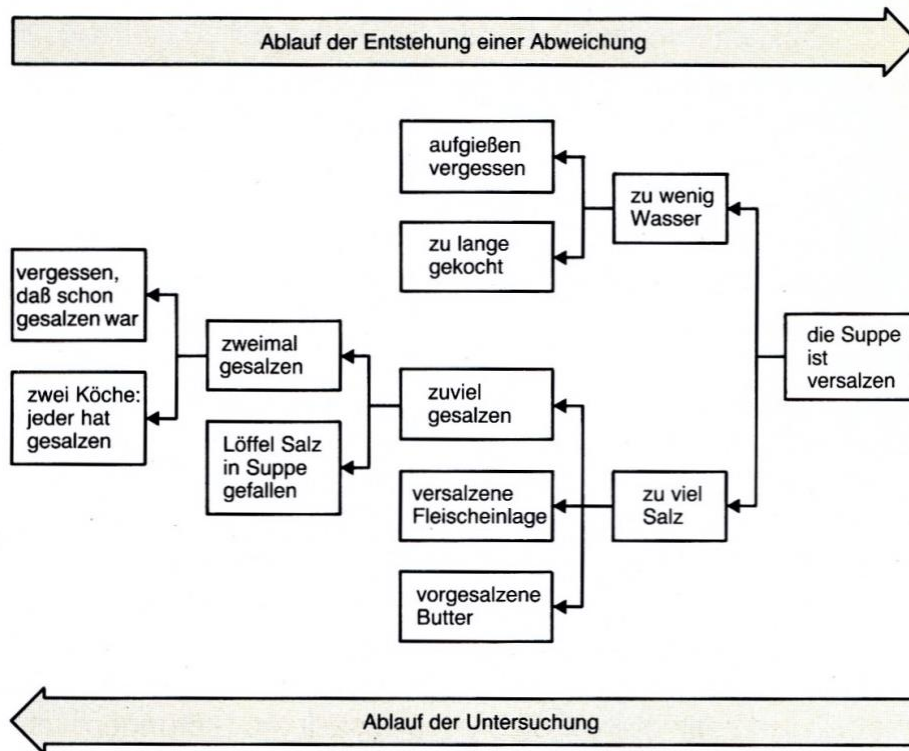


Abbildung 11: Fehlerbaum als praxisnahe Prinzipdarstellung (REFA, 1985)

Messung der Produktionsergebnisse

In der Industrieproduktion kann der Output als Produktionsergebnis neben der Anzahl bzw. Menge der Produkte auch zeitbezogen als Durchsatz ermittelt werden. Störungen offenbaren sich dann anhand der Abweichung vom geplanten Output. Dies kann durch geringere Produktionsmengen oder durch mehr Input für die gleiche Produktionsmenge geschehen. Verzögerungen im Produktionsablauf gehören in letztere Kategorie, da mehr Arbeitszeit und damit mehr Produktionsressourcen für den gleichen Output erforderlich sind. Diese Verzögerungen sind darüber hinaus eine Möglichkeit, verdeckte Störungen oder Ungenauigkeiten im Produktionsprozess plausibel zu detektieren.

Der konsumierte Output als Ergebnis der Bahnproduktion ist messbar in Form von Personenkilometern bzw. Tonnenkilometern, innerbetrieblich ist auch die Messung in geplanten und gefahrenen Trassenkilometern oder Angebotskilometern üblich. Die eigentliche Leistungserstellung wird in der Bahnproduktion wie in der industriellen Produktion kontinuierlich überwacht. Hier ist der Vergleich von Soll und Ist der Weg-Zeit-Linie im grafischen Fahrplan der massgebende Ausgangspunkt. Grundsätzlich wäre auch eine Referenz auf die Produktionsergebnisse Personenkilometer und Tonnenkilometer möglich. Bei der SBB-Bahnproduktion werden beispielsweise Verspätungen als Produktionsabweichung in Form von (modellierten) Reisendenverspätungsminuten ausgewertet. Dazu wird die Zeitdauer der Abweichung an den Messbahnhöfen im Streckennetz mit der Anzahl der Reisenden multipliziert; diese Fahrgastzahl wird aus Frequenzerhebungen mehrmals im Jahr ermittelt.

Konsequenzen und Spezifitäten für die Bahnproduktion

Je nach Branche und konkreter Produktionsart ist in der Industrieproduktion ein Produktionsstillstand im Störfall möglich, um stringent die Behebung möglicher Störungen durchzuführen. Allerdings bestehen Industriezweige, in denen ein Herunterfahren der Produktion unter allen Umständen vermieden werden muss, um die Produktionsanlagen funktionstüchtig zu halten. Dazu zählen Teile der chemischen Industrie, Stahlwerke, Zementwerke u. a. Bei der Bahnproduktion ist ein kompletter Produktionsstillstand ebenso grundsätzlich zu vermeiden. Dies resultiert insbesondere im Personenverkehr aus dem intermodalen Wettbewerb und den Erwartungen des Endkunden an eine zeitgemässe Dienstleistung⁹. Die Disposition ersetzt hierbei die quasi fehlende Lagerfähigkeit innerhalb der Bahnproduktion, was für diese Produktionsform ein Alleinstellungsmerkmal darstellt. Daher ist in der Bahnproduktion das Umdisponieren über alternative Ressourcen (z. B. Umleitung, Ersatzzug, Busnotverkehr) gegenüber dem Produktionsstillstand zu präferieren; entsprechende Entstörungsstrategien sind zu erarbeiten.

Die Spezifität der Bahnproduktion im Vollbahnbereich liegt in Anzahl und Heterogenität der involvierten Stellen im Störfall (Infrastrukturbetreiber, Verkehrsunternehmen, ggf. jeweils noch dritte Infrastrukturbetreiber und/oder Verkehrsunternehmen). Dabei sind sowohl die Komplexität als auch die Abhängigkeiten der einzuleitenden Massnahmen vom einzelnen Schadensereignis nebst dessen Randbedingungen höher als in der (Industrie-) Produktion. Im Stadtbahnbereich ist die Heterogenität involvierter Stellen zwar schwächer ausgeprägt, jedoch steigen die Wechselwirkungen mit der verkehrlichen Umwelt anderer Verkehrsmittel.

Vollbahn- und Stadtbahnproduktion haben gemein, dass der Störfall eine Kontextanalyse des einzelnen Störereignisses erfordert und eine Fokussierung auf die eigentliche Störgrösse bzw. die Störungsart nicht genügt. Neben der technischen Störungsdauer stehen die betrieblichen Abweichungen beispielsweise in Form von Verspätungsminuten und die Massnahmen zur technischen wie betrieblichen Störungsbehebung im Fokus der Betriebsführung.

⁹ Stunden- oder gar tagelanges Warten auf die nächste Bahnverbindung ist in unserem Kulturkreis nicht akzeptiert.

2.4.4 Störungswahrnehmung in der Verkehrspsychologie

Besonderheiten des öffentlichen Verkehrs

Den Formen des öffentlichen Verkehrs ist der Wandel vom aktiven individuellen Verkehrsteilnehmer zum passiven Verkehrsnutzer gemein. Dieser Wechsel führt auf der Wahrnehmungsseite zu einem interessanten Nebeneffekt: Im Störfall werden sich sowohl der Fahrgast im Personenverkehr als auch der Verlager im Güterverkehr auf die Bahnbetriebsführung verlassen müssen statt individuell eingreifen zu können. Diese erzwungene Tatenlosigkeit führt zu einer kritischeren Reflexion der betrieblichen und bisweilen auch technischen Massnahmen der Störungsbehebung. Die Nutzung eines öffentlichen Bahnsystems unterscheidet sich insofern fundamental von der Nutzung anderer individueller Verkehrssysteme (Fahrrad, Pkw usw.). Determinierend ist hierbei das Wesen des öffentlichen Verkehrs. Unter den Begriff des öffentlichen Verkehrs fallen diverse Angebotsformen nebst ihren diversen technischen Realisierungen, welche erst nachgelagert von Interesse sind. Diese Angebotsformen sind gekennzeichnet durch:

- Ortsveränderungen von Personen und materiellen Gütern
- Leistungsangebot mit örtlicher und zeitlicher Verfügbarkeit
- Inanspruchnahme durch jedermann auf Grundlage von Beförderungsbestimmungen
- Zusammenfassung verschiedener Einzelnachfragen
- Ausschluss des Zwangs zum Selbstfahren (König, 2004/2005)¹⁰

Die schweizerische Litra versteht unter dem öffentlichen Verkehr:

- *Als öffentlicher Verkehr gilt die publizierte, regelmässige und gebündelte Beförderung von Personen und Gütern mit eigens dafür ausgerüsteten Verkehrsmitteln. Dieser erfolgt [...], um entweder eine bestimmte Grundversorgung sicherzustellen, eine Verlagerung von privaten Verkehren auf gemeinsam genutzte Transportmittel zu erwirken oder um schlicht einer Gemeinwohlverpflichtung nachzukommen.* (Faganini, 2012)

Wahrnehmungsprinzipien

Aus der (Verkehrs-) Psychologie sind zwei Wahrnehmungsprinzipien bekannt (Schlag, 2005/2006). Die Top-Down-Wahrnehmung geht vom Generellen, Gesamten aus und tastet sich in die Details vor, während die Bottom-Up-Wahrnehmung vom Einzelnen zum Ganzen betrachtet. Im Alltag ergänzen sich beide Formen der Wahrnehmung, wobei die Top-Down-Betrachtung eher bei bekannten Sachverhalten anzutreffen ist, die Bottom-Up-Wahrnehmung eher bei unbekanntem oder neuen Ereignissen. Neben der Verkehrspsychologie ist diese Unterscheidung u. a. auch bei (Finanz-) Analysen üblich. Für die Analyse von Störereignissen setzt der Top-Down-Ansatz bei den Störungsfolgen, insbesondere dem Verspätungsausmass, an; die Bottom-Up-Betrachtung ist für die Analyse der Störungsursachen interessant.

¹⁰ Dieselbe Definition findet sich in (Wichser, et al., 2005) mit Verweis auf Prof. em. Heinrich Brändli. Dort erfolgte die Begriffsbildung um 1973. Siehe auch (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2006).

Zeitwahrnehmung und Monetarisierung

Die Frage nach der Wahrnehmung von Störungen ist eng mit der Wahrnehmung einzelner Zeitan-teile entlang der Reisekette sowie deren Abbildung in Geldwerten verbunden. Hierzu bestehen bereits Untersuchungen über den monetären Zeitwert von Reiseketten, beispielsweise (König, et al., 2004). Darin wird in der Regel differenziert nach:

- Verkehrsmittel
- Reiseweite
- Zweck der Reise
- verfügbarem Jahreseinkommen

Zwischen dem öffentlichen Verkehr (ÖV) und dem Individualverkehr werden in (König, et al., 2004) unterschiedliche Zeitbewertungen angesetzt. Diese werden sensibler, sobald weite Reisen unternommen werden, da hierfür insgesamt mehr Zeit aufzuwenden ist. Zeitwertunterschiede vertiefen sich nach dem Zweck der Reise (z. B. Geschäftsreise vs. Privateinkauf). Das verfügbare Jahreseinkommen spannt eine weitere Dimension der Betrachtung auf und referenziert insbesondere bei Geschäftsreisen auf monetäre Gewinne bei kürzerer Reisezeit bzw. quasi Verdienstauffälle bei verlängerter Reisezeit. Abbildung 12 zeigt exemplarisch den Zeitwert für Pendler im ÖV.

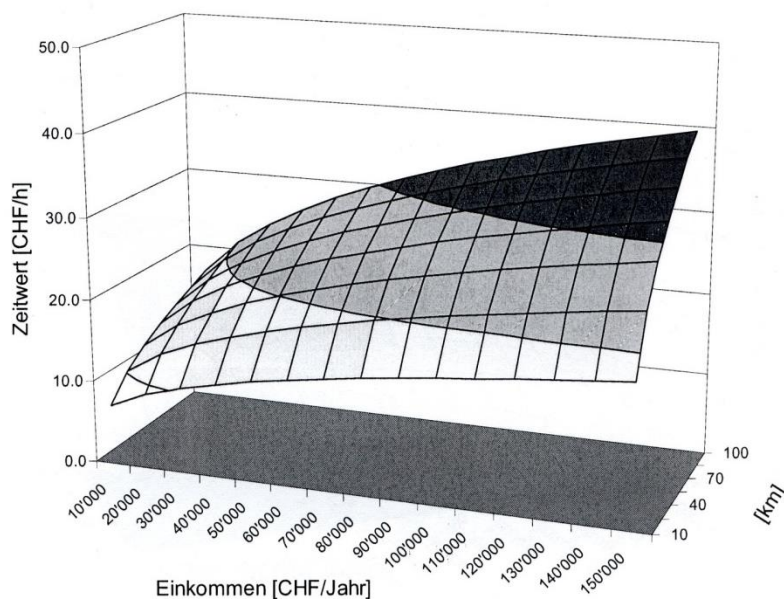


Abbildung 12: Geschätzte Zeitkosten ÖV, Pendler, kombiniertes Modell (König, et al., 2004)

Darüber hinaus ist während einer Reise in verschiedene Teilzeiten zu differenzieren, da die Wahrnehmung und folglich auch der monetäre Zeitwert schwanken. (Hess, et al., 2008) unterscheidet hierzu die reine Fahrzeit, den angebotenen Takt, notwendige Umsteigevorgänge, Umsteigezeiten und die Zugangszeit zur eigentlichen Fahrt. Folgende nach Reisedistanz und Einkommen gewichtete Zahlungsbereitschaft wird abgeleitet (Tabelle 4):

	alle Wegzwecke	Pendler	Geschäftlich	Freizeit	Einkaufen
Fahrzeit PW	22.23 (5.2)	30.02 (2.65)	30.77 (24.61)	21.05 (6.06)	19.78 (8.26)
Fahrzeit ÖV	13.77 (3.99)	15.35 (4.18)	34.1 (14.63)	11.46 (3.28)	11.76 (3.46)
Takt	4.71 (1.77)	4.37 (1.32)	9.43 (2.42)	4.13 (1.59)	4.19 (0.85)
Umsteigen [CHF/U]	2.34 (1.44)	1.92 (0.79)	3.55 (2.42)	2.38 (1.59)	1.94 (0.85)
Umsteigezeit	6.16 (5.19)	4.11 (2.39)	48.71 (33.29)	8.9 (2.15)	6.74 (3.95)
Zugangszeit	23.03 (8.66)	22.37 (1.79)	62.0 (15.29)	21.75 (7.24)	10.11 (5.94)

Tabelle 4: Gewichtete Zahlungsbereitschaft (in CHF bzw. CHF/h) mit Standardabweichung (Hess, et al., 2008)

In (Hess, et al., 2008) fallen vor allem die hohen Zahlungsbereitschaften der Zugangszeit und der (geschäftlichen) Umsteigezeit auf. Ein explizites Ausweisen der Wartezeit findet nicht statt. Für dichtere Angebote „Takt“ besteht ebenso eine Zahlungsbereitschaft, da grössere Taktzeiten (bzw. -lücken) zusätzliche Wartezeiten beim Zugang, Abgang bzw. beim Umsteigen entlang der Reiseketten provozieren. Umsteigevorgänge lassen sich ebenso monetarisieren, hier allerdings nicht zeitabhängig sondern bezogen auf die Anzahl der Umsteigevorgänge.

Es ist zu postulieren, dass Reisezeitanteile ohne Fortbewegung (Umsteige-, Zugangs- und Wartezeit) insgesamt negativ, ergo teuer, bewertet werden (König, 2004/2005). Einer ähnlichen Darstellung folgt (Lübke, et al., 2008) mit der Quantifizierung der Zeitanteile. Hierzu werden alle Nichtreisezeiten mit einem Reisezeitäquivalent abgebildet, welcher deren (negativer) Wirkung entspricht:

- Fusswegzeiten (Zugangszeit) quadratisch, zzgl. Wichtung
- Umsteigezeiten Faktor 1.3, zzgl. „Stressfaktor“ bei knappen Anschlüssen
- Verspätungen Faktor 2.7 (falls ausschlaggebend für Planungsvarianten)
- Wartezeiten Faktor 1.3

Ein zusätzlicher Umsteigevorgang kann die Attraktivität des Gesamtangebots stark beeinflussen und bis zu 40 % Aufkommensrückgang generieren (Lübke, et al., 2008). Dies kommt vor allem bei Gelegenheitsnutzern und Mobilitätseingeschränkten¹¹ zum Tragen und sollte bei der Kundenlenkung berücksichtigt werden, da eine mögliche Alternativverbindung mit zusätzlichen Umsteigevorgängen oftmals als unattraktiver wahrgenommen wird und folglich nicht mehr als gleichwertig angesehen werden kann.

Subjektiv bewertet werden auch Anpassungszeiten, die aus dem vorhandenen Angebot resultieren, da die eigene Reiseplanung gegebenenfalls um einige Minuten verschoben werden muss, was wiederum einer Art Wartezeit entspricht. Ein Rückschluss auf Wartezeiten, die aus (störungsbedingt) verspäteten Verkehrsmitteln resultieren, ist ebenso möglich und rechtfertigt die Anstrengungen zur Minimierung der endkundenseitigen Störungsfolgen. Abbildung 13 zeigt die Reisezeitäquivalente gegenüber der Fahrtfolgezeit exemplarisch auf.

¹¹ dies beginnt bereits bei grossem Reisegepäck

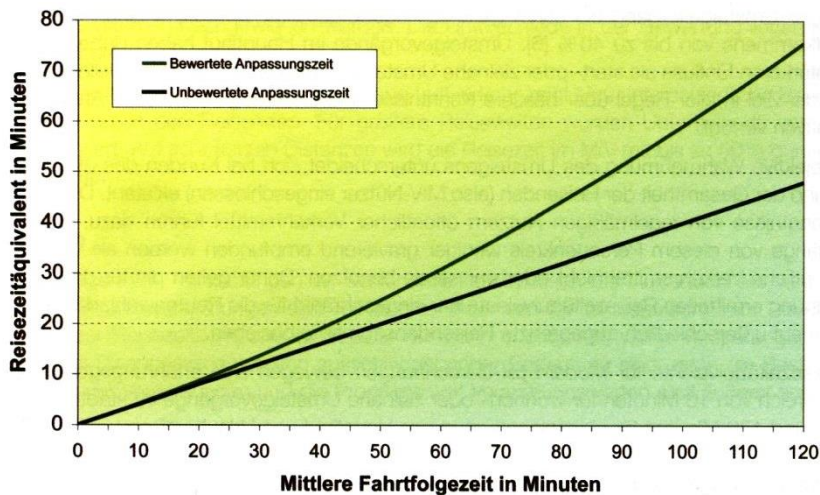


Abbildung 13: Funktionaler Zusammenhang zwischen mittlerer Fahrtfolgezeit und Reisezeitäquivalenzwert der zeitlichen Verfügbarkeit (Lübke, et al., 2008)

Dementsprechend lassen sich Folgezeiten aus Verspätungen und Störungen quantifizieren. Dies kann mittels der subjektiv empfundenen Zeit oder monetär erfolgen. Für eine monetäre Bewertung kann die monetäre Stundenbewertung mit der subjektiven Bewertung der Wartezeit multipliziert werden. Teilweise wird für die subjektive Bewertung der Wartezeit eine Vergrößerung mit Faktor 2.5 gegenüber der realen Wartezeit angesetzt (Maibach, et al., 2007). Bei allen monetären Betrachtungen ist eine Kalibrierung nach dem Jahreseinkommen erforderlich. Die quantitative Kosten-Nutzen-Begründung von Infrastruktur- oder Angebotsverbesserungen mit monetären Zeitwerten ist in der Verkehrswissenschaft inklusive der -planung nicht unumstritten.

2.5 Zwischenfazit zum Kapitel 2

Bahnsysteme unterscheiden sich von anderen Verkehrssystemen durch geringe Haftreibung und die Spurgebundenheit, die ein Betriebsprogramm zur Kompensation der fehlenden Selbstorganisationsfähigkeit erfordert. Abweichungen von diesem Regelbetrieb, welche als hinreichende Bedingung ausserplanmässige Ressourcen erfordern, werden fortfolgend als Störung bezeichnet. Im Störfall müssen verschiedene Akteure zusammenarbeiten, welche administrativ verschiedenen Unternehmen angehören können. Die Bahnproduktion weist dabei Gemeinsamkeiten mit der Industrieproduktion auf. In Anlehnung daran wird die Ressourcenallokation für die Störungsforschung in dieser Arbeit vertieft. Insbesondere technische Störungen lassen sich mit den RAMS-Terminologien standardisiert abbilden. Betriebliche Störungen werden vom Endkunden sensibel wahrgenommen. Aus den verbleibenden Unsicherheiten bei der Monetarisierung von Reisezeitanteilen heraus wird in dieser Arbeit auf eine Monetarisierung der Störungsdauern verzichtet. Jedoch werden die Wahrnehmungsprinzipien aus der Psychologie übernommen und für die spätere Störungsklassifizierung weiterentwickelt. Mit diesen methodischen Analogien zu anderen Fachgebieten werden Systemvergleiche diverser Bahnsysteme durchführbar.

3 Methodisches Konzept

3.1 Ressourcenorientierte Betrachtung

3.1.1 Ressourcenansatz

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Methoden zur Beantwortung der Forschungsfrage aus Kapitel 1.2 zunächst theoretisch vorgestellt. Diese werden in den folgenden Kapiteln für die jeweiligen Aspekte des Forschungsprojekts Anwendung finden.

Schaut man nun extrem detailliert auf den Einzelfall, so bildet jedes Ereignis ein Unikat. Dennoch gibt es Gemeinsamkeiten, insbesondere bezüglich des Forschungsthemas. Damit lassen sich aus den singulären Ereignissen Cluster gleichartiger Ereignisse ableiten. Die Störungsforschung erfordert hierbei den Spagat zwischen dem interessanten Einzelereignis einerseits und dessen Relation zur Grundgesamtheit aller Ereignisse andererseits.

Die Bahnproduktion als spezielle Produktionsform (siehe Kapitel 2.4.3) greift auf Ressourcen zurück. Der französische Begriff „*ressource*“ ist dabei der Politökonomie entnommen und bezeichnet materielle, finanzielle und personelle Mittel, die eingesetzt werden können (oder müssen), um gesetzte Ziele zu erreichen (siehe z. B. deutsche Bundeszentrale für politische Bildung, Internetrecherche 06/2010). In der Bahnproduktion ist dieses Ziel der geplante Regelbetrieb. Die Ressourcen zur Produktion einer kommerziell nutzbaren Fahrt zwischen zwei Punkten setzen sich nach (Weidmann, 2011) zusammen aus:

- Ressourcen der Verkehrsunternehmungen
- Ressourcen der Infrastrukturunternehmungen
- Serviceleistungen
- Prozesse und -abhängigkeiten

Der Ressourcenansatz wird in den folgenden beiden Unterkapiteln vertieft. In der Bottom-Up-Betrachtung wird die Frage nach der jeweils gestörten Ressource erörtert. Diese Betrachtungsweise erörtert Störereignisse ursachenbasiert von der gestörten Ressource her zu den Störungsfolgen. Die Top-Down-Betrachtung geht umgekehrt vor und fokussiert zunächst auf die Wirkungsseite der Störung. Beide Betrachtungen sind methodisch komplementär.

3.1.2 Ressourcen in der Bottom-Up-Betrachtung

Die ursachenbasierte Bottom-Up-Betrachtung in der Bahnproduktion setzt bei (König, 2008) an. Dieser Ansatz lässt sich plausibel mit der Arbeitsfrage nachvollziehen, welche Ressourcen bei einem hypothetisch noch nicht vorhandenen Bahnsystem zur Aufnahme der Bahnproduktion benötigt werden. Dies sind folgende Ressourcen:

- **Fahrzeug** sämtliches Rollmaterial im Bahnsystem
- **Infrastruktur** alle ortsfesten Anlagen zur verkehrlichen Leistungserstellung¹²
- **Personal** betriebliche und technische Mitarbeiter
- **Information** betriebsrelevante Daten (Betriebsprogramm) nebst Dispositionssystemen

Zur Ressource Fahrzeug zählen alle Ereignisse, bei denen das Rollmaterial eine Störung aufweist oder anderweitig nicht einsetzbar ist. Dies sind überwiegend technische Aspekte. Bei der Infrastrukturressource sind analog sowohl technische Störungen als auch aus anderen Gründen nicht nutzbare Infrastrukturen (z. B. belegte Abschnitte → Stellwerksstörung oder Zugfolgekonflikte) zu betrachten. Fehlendes Personal oder Fehler des vorhandenen Personals zählen in die Ressource Personal, wobei jene Fehler eher selten in dieser Schärfe dokumentiert sind (siehe auch nachfolgende Betrachtungen zur Sichtbarkeit von gestörten Ressourcen). Sämtliche Vorgaben zum Betriebsprogramm wie die Systemlandschaft der Betriebsführung werden in der Ressource Information subsumiert. In der Bahnbetriebsführung kommt es zu Ereignissen, welche die Prozessplanzzeitdauern überschreiten und an sich keine rein technischen Ursachen im Sinne der obigen Ressourcen haben. Oftmals sind dies prozessual bedingte Störereignisse, wie beispielsweise eine Haltezeitüberschreitung. Diese könnte ihre Ursache in der Fahrzeugwahl (z. B. zu wenige Türspuren), in der Infrastruktur (z. B. zu schmaler Bahnsteig), beim Personal (z. B. fehlende Türfreigabe oder unsorgfältige Arbeitsweise) oder bei der Information (z. B. zu kurze Aufenthaltszeit im Fahrplan) sowie beim Verhalten der Fahrgäste etc. haben. Daher werden prozessuale Ereignisse der Ressource Betrieb zugewiesen.

- **Betrieb** prozessuale Betriebsführungsaspekte

Die Ressourcen Fahrzeug, Infrastruktur, Information und Personal sind stark ursachenbasiert und werden in Kapitel 4.1 weiter analysiert. Die Ressource Betrieb kommt dagegen bei prozessualen Ereignissen zur Anwendung, wobei die Störungsbetrachtung hier eher auf die Wirkungsseite widerspiegelt. In der Bahnbetriebsführung ist diese Art der Ereignisse noch recht häufig.

Die vorliegende Bottom-Up-Betrachtung erfordert zu jedem Störfall eine umfassend dokumentierte Informationslage. Dies ist in der Realität nicht immer der Fall, insbesondere bei Ereignissen an denen Infrastrukturbetreiber und Verkehrsunternehmen beteiligt sind zwischen denen zumindest eine organisatorische Grenze besteht (siehe Kapitel 2.1.2). Weiterhin ist es möglich, dass eine Verkehrsleistung (z. B. Zugfahrt) auf ein benachbartes Infrastrukturnetz übergeht oder von einem solchen in das eigene Netz einbricht. Auf Grund unterschiedlicher

¹² inklusive weiterer Infrastrukturanlagen der Verkehrsunternehmen

Betriebsführungsinstrumente erfolgt dann praktisch meist keine umfassende Informationsweitergabe, so dass etwaige mitgebrachte Abweichungen unzureichend begründet sind. An den Schnittstellen zwischen Netzbetreibern und Verkehrsunternehmen treten in der Praxis somit Informationsdefizite auf, die zu Fehlinterpretationen von Störereignissen führen können. Zwei Beispiele zur Verdeutlichung dessen:

- Fahrzeugstörung im Nachbarnetz bewirkt Einbruchsverspätung ins eigene Netz
 - **real:** Ressource Fahrzeug
 - **wahrgenommen:** Ressource Betrieb
- fehlerhafte Fahrplanunterlagen bewirken eine scheinbare Verspätung, die Infrastruktur kann für den nachfolgenden Zug zunächst nicht genutzt werden, er erreicht das Nachbarnetz verspätet
 - **real:** Ressource Information
 - **zunächst wahrgenommen:** Ressource Infrastruktur
 - **wahrgenommen:** Ressource Betrieb

Je nach Datenlage ist somit die Sichtbarkeit gestörter Ressourcen bei der Analyse von Bahnbetriebsstörungen zu berücksichtigen, da sie die scheinbare Verschiebung von Störungsschwerpunkten beim Überschreiten der jeweiligen Organisationsgrenze begründen können. Tabelle 5 verdeutlicht diesen Umstand. Die dortige Farbcodierung für die Bottom-Up-Betrachtung der Ressourcen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit immer wieder aufgegriffen.

gestörte Ressource (Ursache)	sichtbare gestörte Ressource			
	eigenes EVU	eigenes EIU	drittes EVU	benachbartes EIU/EVU
Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug Infrastruktur	Fahrzeug Infrastruktur	Betrieb
Infrastruktur	Infrastruktur	Infrastruktur	Infrastruktur	Betrieb
Information	Information	Information	Information	Betrieb
	Information	Betrieb	Infrastruktur	
	Betrieb	Information		
Personal	Personal	Personal	Personal	Betrieb
	Personal	Betrieb	Infrastruktur	
	Betrieb	Personal		
Betrieb	Betrieb	Betrieb	Betrieb	Betrieb
			Infrastruktur	

Tabelle 5: Sichtbarkeit gestörter Ressourcen in der Bahnbetriebsforschung (eigene Darstellung)

Der Zuordnung einer Störung zu einer Ressource ist somit zentral für die gesamte Bottom-Up-Betrachtung. Dabei ist die Frage nach der gestörten bzw. nicht nutzbaren Ressource zu stellen und diese Ressource in die Störfalldokumentation aufzunehmen. Falls sich im Verlauf einer Bahnstörung neue Erkenntnisse über den Einzelfall ergeben, ist möglicherweise die Ressourcenzuordnung einer Korrektur zu unterziehen. Erst in den weiteren Analyseschritten wird hinsichtlich System, Subsystem, Komponente und Schadensart tiefgehend klassifiziert. Im Zuge der Prozessanalysen im Störfall (Kapitel 4.1) wird dieses Vorgehen detailliert vorgestellt.

3.1.3 Ressourcen in der Top-Down-Betrachtung

Die Top-Down-Betrachtung fokussiert auf die Wirkungsseite von Störereignissen und damit auf die Auswirkungen für den Endkunden, also den Fahrgast im Personenverkehr oder den Verloader im Güterverkehr. Hierbei sind drei Ressourcen zu identifizieren:

- **Zeit** Rückschluss auf Abweichungen, Verspätungen oder Anschlussbruch
- **Geld** Rückschluss auf störungsbedingte Kosten
- **Komfort** reduzierter Service bei sonst identischem Angebot

Für die weiteren Analysen ist vor allem die Ressource Zeit von Interesse, da sie aus Endkundenperspektive ein plausibel messbares Abbild der Abweichungen liefert. Die Ressource Geld spielt eine untergeordnete Rolle, da im Störfall eher mit Kulanz der beteiligten Verkehrsunternehmen zu rechnen ist; von Interesse wären sonst störungsbedingte Konflikte mit dem Tarifsystem, Kosten für Ersatzverkehr oder Taxi. Hingegen spielt der Komfort im Personenverkehr eine wichtige Rolle, wenn der Rollmaterialeinsatz störungsbedingt verändert, dadurch der Service reduziert, jedoch das Betriebsprogramm inklusive des Fahrplans eingehalten wird.

In der Top-Down-Betrachtung wird vorwiegend auf die Zeit fokussiert. Dies anerkennt deren hohe Bedeutung, ermittelbar über den Versatz der Weg-Zeit-Linien zwischen realen und geplanten Betriebsprozessen. Erst die Annäherung an die Bottom-Up-Betrachtung eröffnet die Themenkreise der detaillierten technischen oder betrieblich-prozessualen Störungsursache (Abbildung 14).

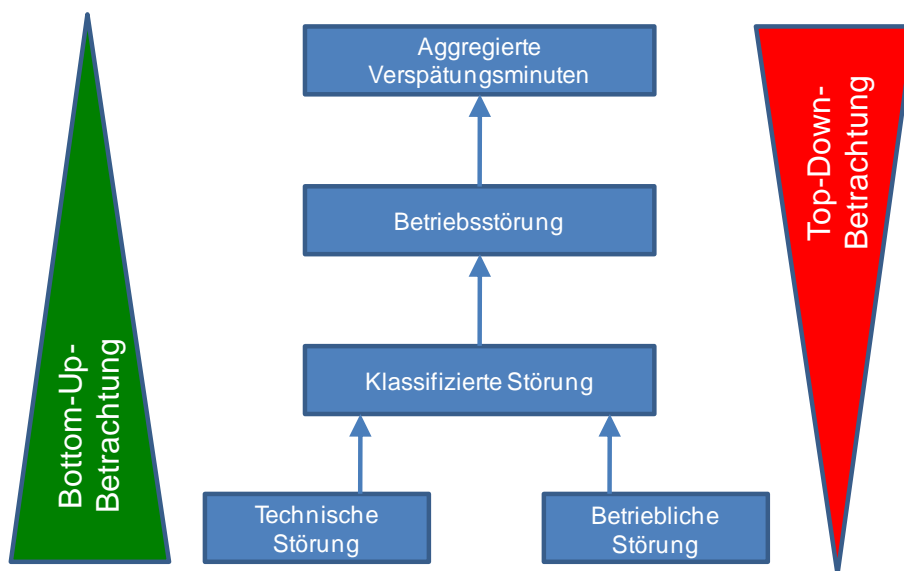


Abbildung 14: Betrachtungsweisen von Störereignissen (eigene Darstellung)

Das Potenzial der Top-Down-Betrachtung liegt vor allem in der Fokussierung auf den Endkunden, da aus seiner Sicht die technische Störungsursache weniger relevant ist als die zeitlichen Störungsfolgen. Der Nutzer im öffentlichen Verkehr erlebt somit eher die Wirkungsseite als die Ursachenseite von Störungen. Abbildung 14 zeigt, wie beide Betrachtungsweisen im Zuge der Störungsforschung in Relation zueinander stehen.

3.2 Fallstudien in diversen Bahnsystemen

3.2.1 Zielsetzung und Einteilung der Fallstudien

Der Projektansatz bedingt Einblicke in die reale Situation der Bahnproduktion, welche sich in der benötigten Granularität nicht simulieren lässt. Daher wird die Methode der Case Studies gewählt, was wiederum die Einbindung verschiedener Forschungspartner erfordert. Neben der akademischen Betreuung konnten Praxispartner im Voll- und Stadtbahnbereich gewonnen werden. Diese Konstellation ist zum realitätsnahen Abbilden des komplexen Gesamtsystems Bahn als auch zum Erarbeiten praxistauglicher Ansätze existenziell. Abbildung 15 zeigt eine Zusammenstellung der akademischen Forschungspartner (erste „Zeile“) sowie der Partner aus den Bereichen Vollbahn (zweite „Zeile“) und Stadtbahn (dritte „Zeile“); diese werden im Verlauf des Kapitels vorgestellt.



Abbildung 15: Forschungspartner der Dissertation Störungsprognose (eigene Darstellung)

Die Leitung dieser Dissertation obliegt der Professur für Verkehrssysteme am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH). Da an der ETH Zürich eher die bahnbetrieblichen Aspekte behandelt werden, erwies es sich als sinnvoll, ein bahntechnisches Pendant an einer ebenfalls renommierten Hochschule für das Korreferat zu wählen. Dieses wurde in der Professur für Elektrische Bahnen (EB) am Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik (IBB) der Technischen Universität Dresden (TUD) gefunden.

Für die Störungsprognose ist das reale Störungsgeschehen in der Bahnproduktion massgebend. Basierend auf der Forschungsfrage (siehe Kapitel 1.2) mit ihrer Fokussierung auf eingetretene Störungen wurde der Methodikentscheid gefällt, das reale Störungsgeschehen anhand von Felddaten in Fallstudien zu analysieren. Aus diesem Grund ist die Auswertung von Felddaten elementarer Bestandteil der vorliegenden Forschungsarbeit. Damit sollen sowohl der Praxisbezug als auch die Anwendungsrelevanz für die reale Bahnbetriebsführung sichergestellt werden. Andererseits ist die künstliche Generierung von Felddaten nicht Gegenstand der Arbeit, da einem entsprechenden (Simulations-) Modell Störungsparameter zu hinterlegen wären, welche erst in dieser Arbeit eruiert werden. Dadurch ist der Rückgriff auf bestehende Datenbanken der Bahnproduktion unabdingbar.

Nicht in jedem Fall werden technische und betriebliche Störereignisse in gleicher Detaillierung erfasst. Die Bahnbetriebsführung dokumentiert eher die Auswirkungsseite von Störungen auf das Betriebsprogramm (Fahrplanabweichungen bzw. Verspätungen). Mit gewissen Einschränkungen sind auch technische Störungsdauern dokumentiert. Dies ist der Fall, wenn technische und betriebliche Störungsdauer identisch sind, beispielsweise bei Triebfahrzeugstörungen. Reine Verkehrsunternehmen dokumentieren im Sinne des Flottenmanagements eher technische Störungsdauern bei Ereignissen am Fahrzeug im Sinne der RAMS-Terminologie. Die Infrastrukturbetreiber – hier ausdrücklich abzüglich der Bahnbetriebsführung – konzentrieren sich eher auf die technische Störungsdauer von Ereignissen an ihren Anlagen, wobei ebenso ein Bezug zur RAMS-Terminologie hergestellt werden kann. Insofern ist die Querverbindung zwischen den betrieblichen Daten der Bahnbetriebsführung mit den technischen Störungsdaten von Flotte und Infrastruktur spannend.

Beim Ansatz der Fallstudien im jeweiligen Bahnsystem besteht in dieser Arbeit folgende thematische Reihenfolge:

- 1.) Überblick über **Störungsschwerpunkte** im Bahnsystem
(ggf. vorgängige Klassifizierung von uncodierten Felddaten)
- 2.) **Analyse** signifikanter Ereignisklassen von betrieblichen bzw. technischen Störungen
- 3.) Generierung von Erkenntnissen für die **Behebung** von Störungen (Kapitel 6)

Nicht jede Fallstudie eignet sich für die Beantwortung aller abgeleiteten Forschungsfragen. Vielmehr gilt es aus den zur Verfügung stehenden Daten in Abhängigkeit der betrachteten Bahnnetze zielgerechte Informationen zu generieren. Nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die zur Beantwortung der abgeleiteten Forschungsfragen und -hypothesen herangezogenen Fallstudien dieser Arbeit.

Forschungsfragen	statistische Muster	Störungsklassifizierung	Meldekette	Prognoseprozess	Ereigniskommunikation
Forschungspartner	F 1 / H 1.1 + H 1.2	F 2 / H 2.1 + H 2.2	F 3 / F 3.1 + F 3.2	F 4 / H 4.1 + H 4.2	F 5 / H 5.1 + H 5.2
Vollbahn SBB	X	X	X	X	X
	X	X	(X)	(X)	(X)
	X	X	(X)	X	X
	(X)	X	X	-	-
Stadtbahn DVB	X	X	X	X	X
	(X)	X	X	-	-

X konkrete Fallstudie / (X) Rückschlüsse aus anderer Fallstudie oder nur ansatzweise / - ohne separate Fallstudie

Tabelle 6: Abdeckung der abgeleiteten Forschungsfragen in den Fallstudien (eigene Darstellung)

3.2.2 Stichprobenumfang der Fallstudien

Bei allen Felddatenauswertungen der Fallstudien ist auf eine hinreichend grosse Stichprobe zu achten. Der Umfang der Stichproben einer Störungsklasse hängt statistisch betrachtet von der generellen Irrtumswahrscheinlichkeit dieser Analyse, von der zugelassenen Abweichung der Störungsdauer und vom Variationskoeffizienten der Ereignisse einer Störungsklasse ab. Dieser Variationskoeffizient ist das Verhältnis aus Standardabweichung und Mittelwert der jeweiligen Zufallsgrösse (z. B. Störungsdauer in der jeweiligen Ereignisklasse). Die Ermittlung des minimalen Stichprobenumfangs erfolgt gemäss folgender Ungleichung:

$$n_{\min} \geq \frac{t^2}{e_r^2} \cdot VX^2 \quad (1)$$

mit	e_r	Abweichung von ermittelter Störungsdauer	in 0 ... 1
	n_{\min}	minimale Ereignisanzahl der Störungsklasse	-
	t	Parameter der Studentverteilung für Irrtumswahrscheinlichkeit	-
	VX	Variationskoeffizient der Störungsklasse	in 0 ... 1

Neben diesen rein statistischen Aspekten ist bei Störungsanalysen in Bahnsystemen ein weiterer Aspekt zu berücksichtigen: Störereignisse in der Bahnproduktion sind teilweise recht stark vom Witterungsgeschehen abhängig (Schrötter, 2010). Daher sollte der Zeitraum von Störungsanalysen mindestens einen Jahrgang umfassen, um allfällige Witterungseinflüsse einzubeziehen. Die Anzahl der Störereignisse je Störungsklasse für statistisch signifikante Bahnbetriebsanalysen beträgt daher:

$$n = \max \begin{cases} n_{\text{Jahr}} \\ n_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

mit	n	Beobachtungsumfang der Störungsklasse	-
	n_{Jahr}	Anzahl Störereignisse einer Störungsklasse in Jahresperiode	-
	n_{\min}	minimale Ereignisanzahl der Störungsklasse	-

Dem Wesen der Bahnsysteme (siehe auch Kapitel 2.1.2) folgend, sind für die Störungsprognose Vollbahn und Stadtbahn von besonderer Relevanz. Beide Systeme gehorchen zwar ähnlichen physikalischen Prinzipien, jedoch bewirkt ihr Wesen eine Verschiebung von Schwerpunkten des Störungsgeschehens. So sind bei der Stadtbahn störungsrelevante Interaktionen mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) häufiger als bei der Vollbahn, während bei dieser Verspätungseinbrüche aus angrenzenden Bahnnetzen (z. B. Ausland) häufiger auftreten. Die nachfolgende Einteilung der Fallstudien stützt sich daher primär auf die Unterscheidung der Bahnsysteme und erst in zweiter Ebene auf die Unterteilung in technische und betriebliche Auswertungen.

3.2.3 Fallstudien der Knotenpünktlichkeit

Zur empirischen Analyse statistischer Verteilungen von Fahrplanabweichungen (siehe auch Tabelle 6) werden an zentralen Punkten diverser Bahnnetze Messungen der Ankunft und Abfahrt durchgeführt und an Daten der jeweiligen Bahnbetreiber gespiegelt. Die Messungen finden ausschliesslich im Personenverkehr statt und folgen der Top-Down-Betrachtung (siehe Kapitel 3.1.3). Kriterium für Beginn und Ende des Haltevorgangs waren gemäss (Weidmann, 2011) der Anfahr- bzw. Anhalteruck. Die Fahrplanlage wird dazu jeweils auf ganze Minuten diskretisiert. Dies ist bei den Eisenbahnen üblich und wird im Interesse gleicher Methodik bei den Stadtbahnen ebenfalls entsprechend realisiert.

Massgebend ist jeweils das Kriterium des Zeigersprungs; es erfolgt eine Diskretisierung der Daten auf ganze Minuten. Bei Verspätung wird auf ganze Minuten abgerundet, bei Verfrühung entsprechend auf ganze Minuten aufgerundet. In dieser Arbeit gilt die Konvention, Verfrühung als negative Werte und Verzögerung als positive Werte darzustellen. Rechnerisch ergibt sich für die Ermittlung der Abweichung basierend auf Soll- und Istzeiten:

$$\Delta t = \begin{cases} \left\lceil \frac{t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}}}{60} \right\rceil & \text{für } t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} < 0 \\ \left\lfloor \frac{t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}}}{60} \right\rfloor & \text{für } t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

mit	t_{Ist}	Istzeit	in s
	t_{Soll}	Fahrplanzeit	in s
	Δt	Fahrplanabweichung	in min

Liegen Felddaten bereits in Minutengranularität, jedoch ohne Stundenangabe vor, resultiert eine leicht modifizierte Formel zur Berechnung der Fahrplanabweichung:

$$\Delta t = \begin{cases} t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} + 60 & \text{für } t_{\text{Soll}} - t_{\text{Ist}} \leq -31 \\ t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} - 60 & \text{für } t_{\text{Soll}} - t_{\text{Ist}} \geq +31 \\ t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

mit	t_{Ist}	Istzeit	in min
	t_{Soll}	Fahrplanzeit	in min
	Δt	Fahrplanabweichung	in min

Für die Erfassung von Soll- und Istminuten und die damit verbundene Rückrechnung auf die Abweichungen muss der Übergang von einer Stunde auf die nächste beachtet werden. Sollte eine Fahrt beispielsweise .58 stattfinden und erfolgt erst zur Minute .00, so ist die Abweichung „+2“ und nicht „-58“. Verspätungen oder Verfrühungen über |30| Minuten sind auf Grundlage der Betriebsbeobachtung dann manuell nachzuführen. Neben der eigenen Erfassung von Felddaten wurden die Ergebnisse mit den Daten der Bahnbetreiber verglichen. Die Messungen fanden an folgenden Knotenpunkten statt:

- Dresden Hbf Vollbahn DB Messung, Internet, Betreiberdaten
- Olten Vollbahn SBB Betreiberdaten
- Zürich HB Vollbahn SBB Messung, Betreiberdaten

- Dresden, Postplatz Stadtbahn DVB Messung, Betreiberdaten
- Zürich, Bellevue Stadtbahn VBZ Messung (Methodentest)
- Zwickau, Neumarkt Stadtbahn SVZ Messung (Methodentest)

Für die Knotenpunktanalysen werden die realen und jahrgangsweise beim Betreiber dokumentierten Ankunfts- und Abfahrtszeiten stichprobenartig untersucht. Als Gegenüberstellung zu den Messwerten werden bei DB, SBB und DVB entsprechende Betriebsstellen-Datenbankauszüge analysiert. Im Fall der DB wird der Ansatz dahingehend weiterverfolgt, dass auf der Bahnhomepage publizierte Informationen („Ist mein Zug pünktlich?“) für die Hauptbahnhöfe der 30 grössten deutschen Städte von 05/2011 bis 04/2012 automatisiert abgefragt und ausgewertet wurden. Die dabei mitgelesenen Verspätungsbegründungen werden tiefer analysiert. Tabelle 7 gibt einen Überblick über alle Messprojekte, Zeiträume und den Datenumfang.

Knoten	Art	Zeitraum	Datensätze
Dresden Hbf (Messung) an	Messung Vollbahn	12/2010 - 12/2012	1199
Dresden Hbf (Messung) ab			
Dresden Hbf (Erfassung I) an	Erfassung Vollbahn	05/2011 - 04/2012	3816
Dresden Hbf (Erfassung I) ab			
Dresden Hbf (Erfassung DB) an	Erfassung Vollbahn	2010 (je 15.)	9013
Dresden Hbf (Erfassung DB) ab			
Olten (Erfassung 09) an	Erfassung Vollbahn	2009	382626
Olten (Erfassung 09) ab			
Olten (Erfassung 10) an	Erfassung Vollbahn	2010	382795
Olten (Erfassung 10) ab			
Zürich HB (Messung) an	Messung Vollbahn	10/2010 - 04/2013	1183
Zürich HB (Messung) ab			
Zürich HB (Erfassung 09) an	Erfassung Vollbahn	2009	920460
Zürich HB (Erfassung 09) ab			
Zürich HB (Erfassung 10) an	Erfassung Vollbahn	2010	926098
Zürich HB (Erfassung 10) ab			
Dresden Postplatz (Messung) an	Messung Tram	10/2010 - 12/2011	2248
Dresden Postplatz (Messung) ab			
Dresden Postplatz (Erfassung) an	Erfassung Tram	2010 (je 15.)	213148
Dresden Postplatz (Erfassung) ab			
4 Knoten	4 Arten	5 Jahre	2842586

Tabelle 7: Messprojekte der Knotenpünktlichkeit (eigene Darstellung)

Messungen im Stadtbahnbereich erwiesen sich bei grossen Haltestellen anspruchsvoller als im Vollbahnbereich, da die Zugfolgezeiten kürzer und die Änderungen gegenüber der fahrplanmässigen Zugfolge flexibler sind. Die Ergebnisse der Messungen und Analysen sind in Kapitel 5.2.1 dargestellt.

3.2.4 Konzipierte Fallstudien mit den Forschungspartnern

In diesem Kapitel werden die zur Bearbeitung der Fallstudien ausgewählten Forschungspartner gegliedert nach Vollbahn und Stadtbahn vorgestellt, bevor im weiteren Gang der Arbeit die Ergebnisse dargelegt und verarbeitet werden. Neben einer kurzen Beschreibung der Unternehmungen wird dargelegt, auf welcher Datengrundlage Fallstudien durchgeführt wurden. Weitere Angaben zu den Forschungspartnern sind Anhang 3 und Anhang 4 zu entnehmen.

Fallstudien im Bereich Vollbahn

Schweizerische Bundesbahnen SBB

Die Schweizerischen Bundesbahnen betreiben als integrierte Unternehmung das am stärksten ausgelastete Bahnnetz der Welt mit einer Flächenausdehnung über einen Grossteil der Schweiz. Der Konzern ist gegliedert in die Divisionen SBB Infrastruktur, SBB Personenverkehr, SBB Cargo, SBB Immobilien und weitere Konzernaufgaben. Die folgenden statistischen Angaben geben einen kompakten Überblick über das gesamte Unternehmen.

- Netzlänge: 3 040 km Regelspur / 98 km Meterspur
- Mitarbeiter: 28 586
- Triebfahrzeuge: 1 375
- Wagen: 11 098
- Fahrgäste: 356.6 Mio. p. a.
- Trassenkilometer: 169.9 Mio. km p. a. (eigene Infrastruktur)

(SBB AG Kommunikation & Public Affairs, 2012)

Wesentliche Anregungen, Ansprechpartner und Daten dieser Forschungsarbeit kamen von den SBB. Dadurch erfolgte über die gesamte Bearbeitungszeit eine enge Kooperation mit dem Anforderungs- und Projektmanagement der SBB Infrastruktur (SBB-I-B-APM).

Im Rahmen der Betriebsführung von SBB Infrastruktur werden betriebliche Abweichungen ab 170 s erfasst und codiert gemäss der ErZu-Codeliste (SBB Infrastruktur, 2010). Die Erfassungsgrenze rührt von der schweizerischen Pünktlichkeitsgrenze von 3:00 min, wobei Fälle knapp unter dieser Grenze einbezogen werden. ErZu steht dabei für Ereignisse im Zugsverkehr und enthält insbesondere Betriebstag, Betriebsstelle, Zugnummer des Primärzugs, Abweichungen des Primärzugs (Primärverspätung) sowie Zuganzahl und Abweichungsminuten der Sekundärverspätung. Der Primärzug ist hierbei jener Zug, bei welchem die Störung auftritt oder welcher das Störereignis als erster erreicht. Sekundärverspätungen sind alle mittelbar ausgelösten Abweichungen auf verkehrende Züge. Die Summe aus Primär- und Sekundärverspätung ergibt die Totalverspätung. Bei technischen Störereignissen am Fahrzeug ist ein Rückschluss auf die Ereignisdauer möglich, allgemein sind die betrieblichen Auswirkungen der Ereignisse dokumentiert. Bei grösseren und insbesondere Infrastrukturstörungen ist die Zuordnung zu einem Primärzug tendenziell unscharf. Für die Jahre 2009 und 2011 wurden die ErZu-Daten analysiert.

Separat wurden im Bereich der SBB technische Störereignisse ausgewertet. Datengrundlage hierfür war das SIP (SBB-Infrastruktur-Portal, vormals DERI) mit allen technischen Störungen aus 2011. Im Hinblick auf die Prognosefähigkeit wurden darüber hinaus die Einsatzprotokolle der Lösch- und Rettungszüge (LRZ) für amtlich bestätigte Bahnsuizidfälle der Jahre 2009 bis 2012 analysiert und Muster der Störungsdauer dieser Ereignisse untersucht.

Deutsche Bahn DB

Die Deutsche Bahn entstand zum 01.01.1994 als Zusammenschluss der Deutschen Bundesbahn (Alt-BRD) und der Deutschen Reichsbahn (Ex-DDR) als Aktiengesellschaft mit dem (bisher einzigen) Eigentümer Bundesrepublik Deutschland. Sie ist heute eine Holding mit den zentralen Geschäftsfeldern DB Netz, DB Fernverkehr, DB Regio und DB Schenker Rail (Güterverkehr). Weitere Aktivitäten im In- und Ausland (z. B. DB Arriva) gehören ebenso zum Konzern. DB Netz ist in sieben geografische und daraus abgeleitete organisatorische Bereiche über Deutschland verteilt. Die folgenden Kennzahlen beziehen sich auf den innerdeutschen Anteil der DB.

- Netzlänge: 33 505 km Regelspur
- Mitarbeiter: 121 101
- Triebfahrzeuge: 8 882
- Wagen: 108 435
- Fahrgäste: 2 760 Mio. p. a.
- Trassenkilometer: 1 039 Mio. km p. a. (eigene Infrastruktur)
(DB Mobility Logistics, 2013)¹³

Die Zusammenarbeit im Kontext dieser Arbeit fand mit der DB Netz Südost statt. Von der DB Netz Südost im Bereich Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (Mitteldeutschland) konnten betriebliche Daten für 2010 ausgewertet werden. Relevant sind dabei die VU-Daten (Verspätungsursache). Diese werden ab einer betrieblichen Abweichung von 90 s gegenüber dem Fahrplan erhoben und codiert erfasst. Eine Zuordnung zu Störfällen besteht nicht, vielmehr wird jeder Einzelzug dokumentiert. Dies bewirkt, dass „Sekundärverspätungen“ hier als separate Ereignisse bevorzugt mit Begründungen aus dem Bereich „Zugfolge“ dokumentiert sind. Es zeigte sich weiterhin, dass in den Daten für 2010 nur von der DB als Störung interpretierte Ereignisse enthalten sind, woraufhin eine Folgefallstudie sämtliche Ereignisse von 2011 zur Datengrundlage hat. Somit war es möglich, relevante Störereignisse herauszuarbeiten und hinsichtlich der betrieblichen Folgen statistisch zu analysieren. Eine Fortsetzung der Knotenpünktlichkeit aus Kapitel 3.2.3 analysiert an den Endkunden im Internet kommunizierte Abweichungen mit identischen Fragestellungen.

¹³ DB Fernverkehr, DB Regio, DB Schenker Rail, DB Dienstleistungen, Sonstige; ohne DB Arriva und DB Schenker Logistics

BLS AG

Die BLS AG als zweitgrösste Bahn der Schweiz kam als Praxispartner in Frage, um bei den SBB getestete Methoden unter ähnlichen Randbedingungen zu verifizieren. Die BLS verfügt über eigene Infrastruktur und eigenes Rollmaterial; es findet jedoch ein grosszügiger Übergang in und von dem SBB-Netz statt.

- Netzlänge: 436 km Regelspur (Betriebsführung: 520 km)
- Mitarbeiter: 2740 (ohne Busland AG)
- Triebfahrzeuge: 202
- Wagen: k. A.
- Fahrgäste: 51.8 Mio. p. a.
- Trassenkilometer: 13.7 Mio. km p. a. (eigene Infrastruktur), (BLS AG 2012)

Bei der BLS findet eine prinzipiell ähnliche Erfassung wie bei der SBB statt. Die dortige Fallstudie sollte zeigen, inwiefern sich die Methodik der Auswertung übertragen lässt und welche Störungsschwerpunkte sich bei diesem Betreiber aufzeigen lassen. Referenzjahr war hier 2010.

City-Bahn Chemnitz CBC

Die City-Bahn wurde Anfang 1997 als regionales Verkehrsunternehmen gegründet. Die Infrastruktur gehört zur Regio Infra Service Sachsen (RIS) bzw. zur DB Netz. Tariflich gehört die City-Bahn Chemnitz zum Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS). Mittlerweile bietet das EVU Bahnverkehr auf vier Regionalstrecken im Umland von Chemnitz an. Ende 2002 wurde die Kursbuchstrecke 522 von Chemnitz nach Stollberg als Tram-Train-System reaktiviert. Folgende Eckdaten charakterisieren die CBC:

- Netzlänge: 91 km Regelspur (84 km EBO, 7 km BO Strab)
- Mitarbeiter: 62
- Triebfahrzeuge: 12
- Wagen: 0
- Fahrgäste: 2.3 Mio. p. a.
- Trassenkilometer: 1.4 Mio. km p. a. (Fahrzeugkilometer)

(Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2012)

Dem Ziel folgend, auch kleinere Verkehrsunternehmen mit anderen spezifischen Fragestellungen einzubeziehen, wurde die City-Bahn-Chemnitz (CBC) zur Felddatenauswertung hinzugezogen. Den grösseren Vollbahnfallstudien als Pretest vorgelagert wurden die Mitschriften der Fahrdienstleiter im Bereich der City-Bahn Chemnitz ausgewertet. Diese Mitschriften entstammen dem Infrastrukturbetreiber RIS (Regio Infra Service Sachsen) und lagen in Form handschriftlich ausgefüllter Formulare vor. Insofern bestand eine erste Aufgabe in der Digitalisierung der Daten. Weiterhin erfolgten Codierung und Klassifizierung entsprechend der Bottom-Up-Betrachtung und Auswertungen relevanter Ereignisklassen für die Felddaten aus dem Jahr 2009. Die vergleichs-

weise geringe Netzgrösse und die Ortskenntnis des Autors ermöglichten eine einfache Verifizierung der jeweiligen Forschungsmethodik.

Tabelle 8 zeigt eine Zusammenstellung der betrieblichen Fallstudien im Vollbahnbereich mit den zugrunde liegenden Datenbanken. Die beteiligten Forschungspartner sind dabei alphabetisch geordnet. Für die statistische Störungsforschung sind nun sowohl die Ereignisanzahlen als auch die Anzahl der erfassten Abweichungsminuten („Abweichungen“) von Interesse. Beide Grössen sind in der Tabelle sowohl als absolute Grössen als auch bezogen auf Netzausdehnung bzw. Betriebsprogramm (Trassenkilometer) dargestellt. Die scheinbare Vielzahl der DB-Ereignisse folgt aus der geringeren Erfassungsgrenze und den damit dominanten Kleinereignissen.

Fallstudie	Tool	Datensätze	Auswertungstage	betrachtete Netzlänge (km)	Ereignisse je Tag und 100 Netz-km (1/100 km)	Abweichung je Tag und 100 Netz-km (min/100 km)	Fahrplannetze (10 ⁶ km)	Ereignisse je 1 Mio. Trassen-km (1/10 ⁶ km)	Abweichungen je 1000 Trassen-km (min/1000 km)
Bern-Lötschberg-Simplon	ErZu, 2010	8030	365	436	5.0	145.5	13.7	586.1	16.9
City-Bahn Chemnitz	FDL, 2009	753	365	92	2.2	25.0	1.5	502.0	5.6
Deutsche Bahn BZ Südost	VU, 2010	53537	345	6700	2.3	253.8	128.2	417.6	45.8
Schweizerische Bundesbahnen	VU, 2011	1055241	365	6700	43.2	928.9	129.8	8129.7	175.0
	ErZu, 2009	117649	365	3039	10.6	409.5	164.3	716.1	27.6
	ErZu, 2011	123461	365	3040	11.1	476.9	165.9	744.2	31.9

Tabelle 8: Fallstudien im Vollbahnbetrieb nebst charakteristischen Werten (eigene Darstellung)

Fallstudie	Tool	Datensätze	Auswertungstage	betrachtete Netzlänge (km)	Ereignisse je Tag und 100 Netz-km (1/100 km)	Abweichung je Tag und 100 Netz-km (min/100 km)	Fahrplannetze (10 ⁶ km)	Ereignisse je 1 Mio. Trassen-km (1/10 ⁶ km)	Abweichungen je 1000 Trassen-km (min/1000 km)
Dresdner Verkehrsbetriebe	NLS, 2009	1697	365	135	3.4	-	-	-	-
Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau	RBL, 2010	104448	365	135	212.0	-	13.7	7623.9	97.5
	BLS 2009-2011	468	1034	19	2.4	378.0	3.0	154.3	24.5

Tabelle 9: Fallstudien im Stadtbahnbereich nebst charakteristischen Werten (eigene Darstellung)

Fallstudien im Bereich Stadtbahn

Dresdner Verkehrsbetriebe DVB

Die Dresdner Verkehrsbetriebe betreiben in der sächsischen Landeshauptstadt ein ausgedehntes Stadtbahnnetz aus zwölf Linien sowie weitere Bus-, Bergbahn- und Fährlinien. Der Stadtbahnbereich setzt mindestens deutschlandweit Massstäbe beim Übergang von einer klassischen Strassenbahn zu einer modernen und zukunftsorientierten Stadtbahn bei gleichzeitiger Netzerweiterung. Die Unternehmensgründung in der heutigen Form erfolgte im August 1993. Die DVB ist integriert aufgestellt und unterteilt in neun „Center“: Fahrbetrieb, Schienenfahrzeuge, Kraftfahrzeuge, Infrastruktur, Personal/Bildung, Zentrale Verwaltungsdienste, Finanzen, Einkauf/Materialwirtschaft sowie Verkehrsmanagement/Marketing. Diese handeln ökonomisch unabhängig auf einem konzerninternen Markt. Im Kontext der vorliegenden Dissertation erfolgt die Zusammenarbeit mit den Centern Fahrbetrieb (betriebliche Störungen) und Infrastruktur (technische Störungen). Die Dresdner Verkehrsbetriebe gehören dem Verkehrsverbund Oberelbe (VVO) an. Folgende Kennzahlen geben einen ersten Überblick:

- Netzlänge: 134 km Breitspur (1450 mm)
- Mitarbeiter: 1825 (DVB gesamt)
- Triebfahrzeuge: 197 + 4 (inklusive Cargotram)
- Wagen: 0
- Fahrgäste: 151.2 Mio. p. a. (DVB gesamt)
- Trassenkilometer: 13.6 Mio. km p. a. (Zugkilometer)

(Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2012)

Im Bereich technischer Störungen wurden die Daten der DVB-Netzleitstelle (NLS) herangezogen. Ziel war es, aus den zu digitalisierenden Störungsmeldungen relevante Muster des Störungsauftritts und der Störungshäufigkeit zu erkennen. Dazu lagen Meldungen über technische Störungen an den Systemen elektrische Weiche, Fahrsignalanlage, Bahnübergangsanlage und Fahrstrom vor, welche auf den Zeitpunkt der Störungsmeldungen und die Aufteilung auf die Anlagentypen analysiert wurden.

Schliesslich wurden in 2010 automatisch erfasste Meldungen aus dem Rechnergestützten Betriebsleitsystem (RBL) auf betriebliche Störungsmuster hinsichtlich signifikanter Ereignisse und deren Dauer analysiert.

Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau SVZ

Die Städtischen Verkehrsbetriebe Zwickau wurden am 01.07.1991 gegründet. Sie bieten Stadtbahn- und Busverkehr in der Stadt Zwickau an. Seit Mai 1999 besteht in die Innenstadt ein Train-Tram-System, bei dem die regelspurige Vogtlandbahn als Stadtbahn dreischienig ins Stadtzentrum eingebunden ist (Schranil, 2008). Seit Anfang 2008 erfolgt die SVZ-Betriebsführung durch die Rhenus-Veniro-Gruppe. Für den Praxispartner SVZ geben folgende Kenngrößen einen ersten Einblick:

- Netzlänge: 19.2 km Meterspur, davon 1.1 km Dreischienenstrecke
- Mitarbeiter: 199 (SVZ gesamt)
- Triebfahrzeuge: 35¹⁴
- Wagen: 0
- Fahrgäste: 9.9 Mio. p. a. (SVZ gesamt)
- Trassenkilometer: 1.1 Mio. km p. a. (Zugkilometer)

(Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2012)

Analysen von Störungen der SVZ bildeten als eine Art Pretest den Ausgangspunkt der hier vorliegenden Störungsforschung, da das Netz mit vier Stadtbahnlinien überschaubar ist und der Autor mit den örtlichen Verhältnissen eng vertraut ist. Somit konnten die notwendigen Auswertungsschritte anschaulich erprobt und an realen Daten kalibriert werden. Diese Fallstudie wurde wegen dem erforderlichen Mindeststichprobenumfang später auf die Jahre 2009 bis 2011 ausgedehnt. Es handelt sich jeweils um Mitschriften der Betriebsleitstelle (intern ebenfalls „BLS“ genannt, relevant ist hier das Leitstellenjournal), welche teilweise noch zu digitalisieren waren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden technische wie betriebliche Störungen codiert, klassifiziert und auf Muster in der Ereignisdauer analysiert.

Die Stadtbahnfallstudien sind in Tabelle 9 (Seite 50) zusammengestellt. Deutlich sichtbar ist der Zuwachs an (dokumentierten) Ereignissen, wenn von der manuellen Erfassung (SVZ) auf die automatisierte Erfassung (DVB) übergegangen wird. Die Datenlage entspricht dann wegen der Einbeziehung von Kleinereignissen eher dem realen Geschehen im Bahnsystem. Detaillierte Ergebnisse aller Fallstudien sind im Kapitel 5.2 aufbereitet.

¹⁴ Die Triebwagen wurden zwischenzeitlich auf 34 reduziert. Darüber hinaus verfügen die SVZ über zwei historische Triebwagen nebst Beiwagen, einen Arbeitswagen und einen antriebslosen Schneepflug.

3.3 Stochastikinversion und Quantilbetrachtung

3.3.1 Dichte, Verteilung und Quantile

Die im vorangegangenen Kapitel 3.2 beschriebenen Fallstudien erfordern den Umgang mit einer grösseren Anzahl von Felddaten. Statistische Analysen spielen bei der Auswertung dieser Daten eine zentrale Rolle. Daher wird dieses Kapitel einige elementare Grundlagen der angewandten Statistik für die Bahnbetriebsforschung aufbereiten und an ausgewählten Beispielen plausibilisieren. Dabei steht die Methodik im Vordergrund; detaillierte statistische Ergebnisse für die jeweiligen Fallstudien sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Zum Einstieg möge der ErZu-Code 12 (hier Triebfahrzeugstörung) der SBB aus dem Jahr 2011 gezeigt werden. Von Interesse sind dabei die grundlegenden statistischen Zusammenhänge, die sich ebenso an beliebigen anderen Störungstypen zeigen liessen.

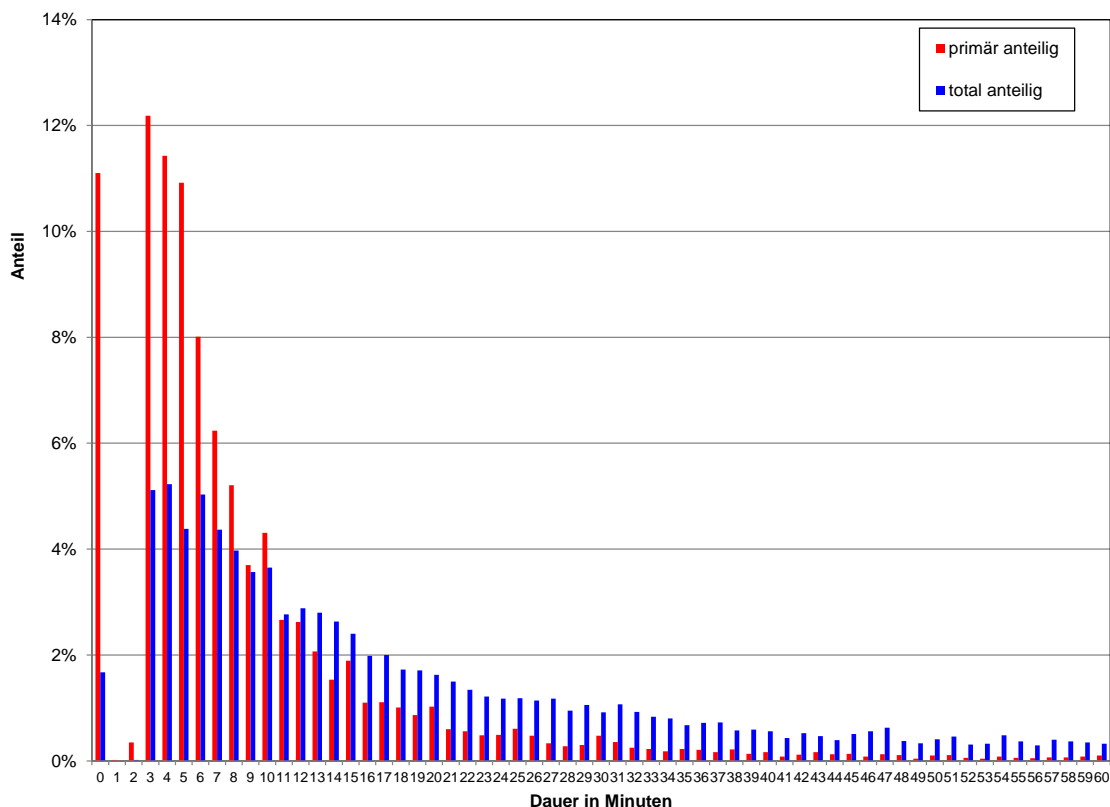


Abbildung 16: Primär- und Totalverspätungen als Dichtefunktion (eigene Darstellung)

Die zugrunde liegende Erfassung unterscheidet Primärverspätung und Sekundärverspätung; deren Summe ergibt die Totalverspätung (siehe auch Kapitel 3.2.4). Eine erste Annäherung zur Beschreibung der Störungssituation bietet die statistische **Dichtefunktion**: Über der Zeitachse wird die Anzahl von Ereignissen aufgetragen, die diese Dauer aufwiesen. Dabei sind Primärverspätung und Totalverspätung von Interesse, da erstere hier einen Rückschluss auf die technische Störungsdauer und letztere einen Eindruck der gesamten betrieblichen Auswirkungen ermöglicht. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Ereignisarten sicherzustellen, wird der relative Anteil der

jeweiligen Verspätungen dargestellt (Abbildung 16). Bezogen auf die Verspätungen gibt es eine grosse Anzahl recht kleiner Ereignisse und eine kleine Anzahl von Ereignissen mit grösserer Dauer. Dieser Befund darf als Gemeinsamkeit der Fallstudien vorweg genommen werden. Weiterhin gibt es unterhalb der Erfassungsgrenze eine mehr oder minder stark ausgeprägte Anzahl dennoch dokumentierter Ereignisse. Dies ist von der Erfassungsmethodik nicht ganz konsequent, beruht aber auf Ereignissen, welche im konkreten Fall der Zugverkehrsleiter in die Datenbank aufnimmt, damit sie auch ohne zeitliche Erfassungsrelevanz wenigstens dokumentiert sind. Auch dieser Befund wird sich in den anderen Fallstudien wiederholen. Bei den vorhandenen Taktfamilien (z. B. 30-min-Takt, 60-min-Takt) besteht bei betrieblichen Störungsdaten ein lokales Offset. Dieses rührt aus der Überlegung, stark verspätete Fahrten erst in der nächsten (Takt-) Fahrplanlage weiterzuführen. Weiterhin entspricht ein ausgefallener Zuglauf aus Fahrgastsicht einer Verspätung um eine Taktzeit, was beim Zuweisen einer Verspätung zu einem Zugausfall diesen Effekt verstärkt. Diese Eigenarten der betriebstechnologischen Dichteverteilung verunmöglichen standardisierte Tests auf statistische Verteilungen, tangieren weitere Analyseschritte jedoch nicht.

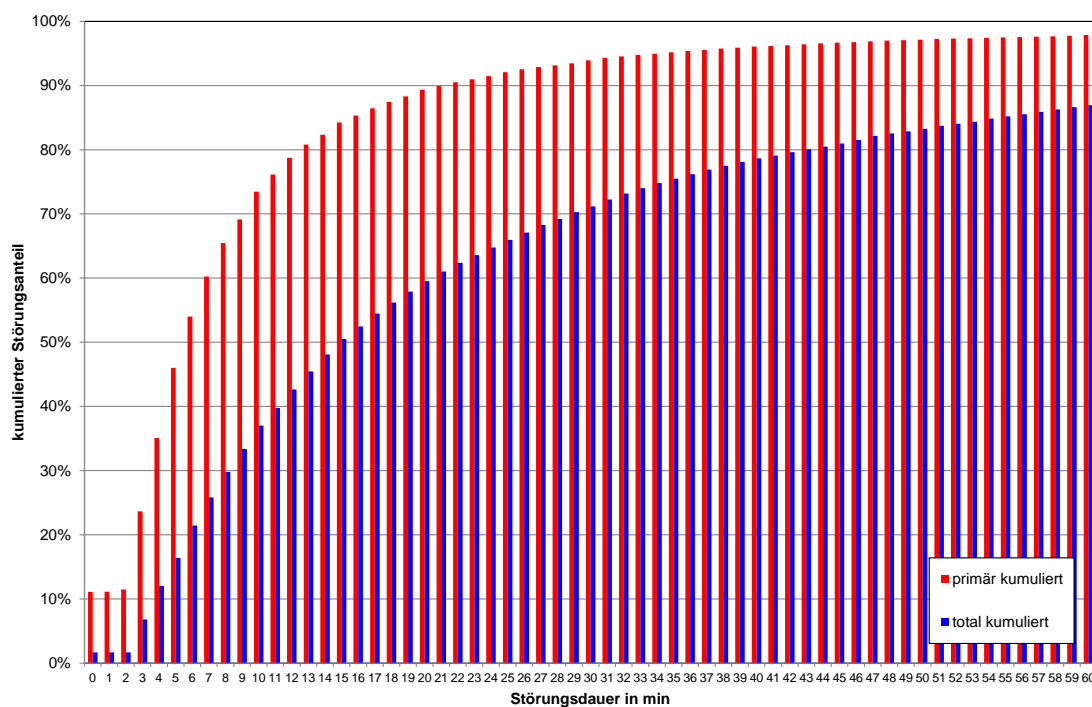


Abbildung 17: Primär- und Totalverspätungen als Verteilung (eigene Darstellung)

Hierzu wird nun auf die **Verteilfunktion** übergegangen. Diese entsteht durch Kumulierung der Dichtefunktion über die Zeitachse, was mathematisch identisch mit der Integration der Dichtefunktion ist. Daraus ergibt sich die obige Darstellung für die 2011er SBB-Triebfahrzeugstörungen. Im Gegensatz zur Dichte (Abbildung 16) bietet jene Verteilfunktion (Abbildung 17) die Möglichkeit des direkten Ablesens von Unterschreitungswahrscheinlichkeiten. Beispielsweise wird mit 80 % Sicherheit eine Primärverspätung von 13 Minuten erreicht oder unterschritten. Dies entspricht einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von rund $100\% - 80\% = 20\%$. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit beschreibt jene Zeit, welche mit gewisser Wahrscheinlichkeit unterschritten

oder maximal erreicht wird. Hier ist das die Störungsdauer. Die Betrachtung derartiger Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ist für die weitere Störungsprognose zentral und wird mehrfach wieder aufzugreifen sein. Statistisch spricht man hierbei vom **Quantil**. Auch das **Percentil** ist als Begriff üblich. Zwischen den statistischen Grössen besteht folgender Zusammenhang:

- Quantil (Unterschreitungswahrscheinlichkeit) 0.00 ... 1.00
- Percentil (Unterschreitungswahrscheinlichkeit) 0 % ... 100 %
- Überschreitungswahrscheinlichkeit 1.00 ... 0.00

In diesem Kontext ist weiterhin der Median von Interesse. Er kennzeichnet denjenigen Wert, der in der Hälfte der Fälle unterschritten, sonst überschritten, wird. Er ist lagestabil und unabhängig vom Betrag der oberen oder unteren Ausreisser; dies unterscheidet ihn vom Mittelwert. Die Lagestabilität gilt analog auch für die Quantile bzw. Percentile. Sie werden von der Existenz der oberen bzw. unteren Ausreisser nicht beeinflusst, da diese in die Wertermittlung nicht einfließen¹⁵.

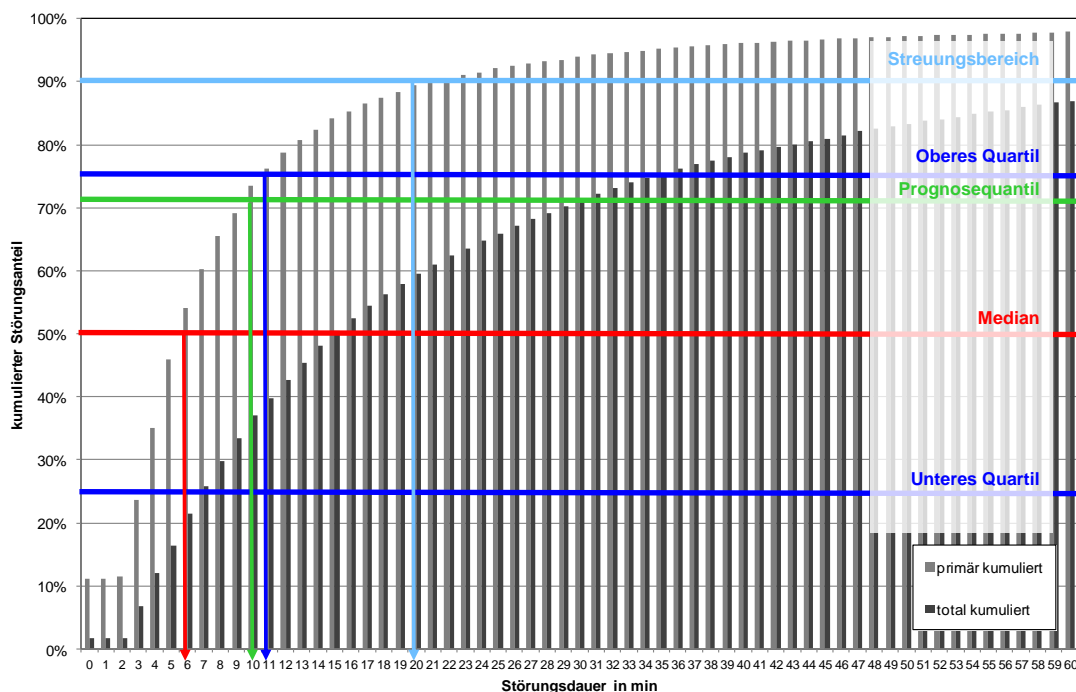


Abbildung 18: Diverse Quantile mit zugeordneten Zeiten (eigene Darstellung)

Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Lage verschiedener Quantile einer Zufallsgrösse, hier exemplarisch für die Daten des ErZu-Code 12 der SBB. Für die statistische Störungsprognose wird im Weiteren mit Quantilen gearbeitet. Gelegentlich findet sich auch die Bezeichnung oberes bzw. unteres Quartil. Dies sind die 0.75er bzw. 0.25er Quantile. Weiterhin wird der Bereich der oberen 10 % aller Werte gelegentlich (willkürlich) als Streuungsbereich bezeichnet.

¹⁵ Beispiel: Von 100 Werten soll das 0.95-Quantil ermittelt werden. Dieser Wert entspricht dem sechstgrössten Wert, wenn man die Werte nach der Grösse ordnet. Die fünf grössten Werte werden in der Betrachtung „abgeschnitten“ und beeinflussen das Ergebnis nicht weiter. Diese entfallen für die weiteren Betrachtungen auch, sollten sie Ausreisser gewesen sein.

3.3.2 Berechnungen mittels adaptierten Exponentialverteilungen

Grundsätzlich ist für jede Klasse von Störereignissen eine tabellarische oder grafische Ermittlung von Dichte und Verteilung möglich. Das Erzeugen entsprechender Diagramme oder Tabellen ist jedoch zeitaufwendig und nur bedingt methodisch notwendig. Gewünscht ist vielmehr eine rein rechnerische Ermittlung des Störungsquantils. Die nachfolgenden statistischen Überlegungen legen eine exponential verteilte Störungsdauer (z. B. betriebliche Fahrplanabweichung) zu Grunde. Wegen Streuungen und der beschriebenen lokalen Maxima der Dichteverteilung fällt ein mathematischer Nachweis dieser Annahme schwer. Theoretisch wäre darüber hinaus eine Gammaverteilung als Verallgemeinerung der Exponentialverteilung denkbar. Diese würde die Erfassungsschwelle von vornherein einbeziehen. Für die mathematische Handhabung ist die Gammafunktion aber äusserst unpraktisch. Erfasste Werte unterhalb der Erfassungsgrenze können vielmehr auch in Form einer Transformation der Exponentialverteilung hinsichtlich Zeit und Wahrscheinlichkeit erfolgen, weshalb im Folgenden die Exponentialverteilung als Sonderform der Gammaverteilung verwendet und für den Einzelfall kalibriert wird. Dies bietet gleichzeitig den Vorteil, über die jeweilige Kalibrierung einen Abgleich zwischen stochastischer Verteilung und beobachteter Stichprobe vorzunehmen. Vergleiche der nach der im Folgenden beschriebenen Methode regressierten Quantile mit den aus Felddaten ermittelten Quantilen bestätigen die Plausibilität dieses Ansatzes (Schranil, et al., 2011), da die berechneten Quantile in der grossen Mehrzahl der Fälle nur minimal von den real beobachteten Quantilen abweichen (siehe auch Tabelle 10). Aus der Dichte der Exponentialverteilung folgt für die prognostizierte Dauer b mit der Sicherheit s :

$$\int_0^b a \cdot e^{-ax} dx = s \quad (5)$$

Dieses Integral wird nun aufgelöst und umgeformt.

$$\begin{aligned} \left[a \cdot e^{-ax} \cdot \frac{1}{-a} \right]_0^b &= s \\ [-e^{-ax}]_0^b &= s \\ -e^{-ab} + 1 &= s \\ e^{-ab} &= 1 - s \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} -a \cdot b &= \ln(1 - s) \\ b &= -\frac{\ln(1-s)}{a} \quad \text{mit } a = \frac{1}{EX} \\ \underline{b} &= -\ln(1 - s) \cdot EX \end{aligned} \quad (7)$$

Abschliessend ist eine Kompensation der unvollständig erfassten Daten unterhalb der eigentlichen Erfassungsgrenze erforderlich. Dabei ist der oben errechnete Wert um die Erfassungsgrenze zu vergrössern und die Prognose- oder Unterschreitungssicherheit um den Anteil der Werte unterhalb dieser Erfassungsgrenze zu verkleinern. Somit folgt als unterschrittene Störungsdauer der quasi exponential verteilten klassifizierten Störungen:

$$b_{\text{trans}} = -\ln(1 - s + s_{\text{Erf}}) \cdot EX_{\text{Erf}} + t_{\text{Erf}} \quad (8)$$

mit	b_{trans}	zeitliches Störungsquantil	in min
	EX_{Erf}	Erwartungswert (erfasster Mittelwert) der Störungsdauer	in min
	s	Unterschreitungssicherheit ¹⁶	in 0 ... 1
	s_{Erf}	Anteil erfasster Werte unter Störungserfassungsgrenze	in 0 ... 1
	t_{Erf}	Störungserfassungsgrenze	in min

Dieser Ansatz ermöglicht die rechnerische Betrachtung aller relevanten Ereigniscodes. Dies sind Störungsarten, welche in Häufigkeit und/oder Ausmass aufgefallen sind („Distance“ über 5 %, siehe Kapitel 5.1). Datengrundlage: ErZu-Codes der SBB aus 2009, 93141 Datensätze.

Code	Ressource	Anzahl	s	Prognose (min)	Fehler (min)
45	Betrieb	27871	0,80	56	2
62	Infrastruktur	110	0,80	5	-4
12	Fahrzeug	13494	0,90	19	-1
13	Fahrzeug	8929	0,90	27	0
1	Personal	9792	0,80	20	-1
69	Infrastruktur	165	0,90	12	2
61	Infrastruktur	6167	0,90	11	0
88	Information	7874	0,90	3	3
4	Betrieb	8150	0,90	49	2
41	Betrieb	7820	0,80	17	2
89	Betrieb	2208	0,80	10	0
85	Infrastruktur	44	0,80	3	-5
83	Fahrzeug	517	0,90	14	3
s. o.	TOP 13, >5%	93141	0,90	41	-5

Tabelle 10: Berechnete Störungsquantile diverser ErZu-Codes 2009 (eigene Darstellung in (Schranil, et al., 2011))

Allenfalls bei seltenen Fehlern mit geringer Felddatenmenge ergeben sich grössere Abweichungen zwischen berechnetem Quantil und in den Daten berechneten Quantilen (siehe Tabelle 10). Fasst man andererseits diese 13 Ereignisarten zusammen, so ist das berechnete Quantil der Fahrplanabweichungen mit 5 Minuten Fehler vergleichsweise weit neben der Realität angesiedelt. Dies wiederum begründet die Notwendigkeit einer detaillierten Klassifizierung als Vorstufe einer realistischen Störungsprognose.

3.3.3 Berechnungen mittels Normalverteilung

Trotz ihrer Kalibrierbarkeit eignen sich die adaptierten Exponentialverteilungen (siehe Kapitel 3.3.2) bei einigen Ereignisklassen nicht für die Quantilermittlung; sie bewirken zu grosse Unterschiede zwischen den gemessenen und den berechneten Quantilen. Bei gering streuenden (technischen) Störungsdauern ist die Normalverteilung eine stochastisch geeignete Regressionsverteilung. Zentraler Parameter für das Streuen einer Zufallsgrösse ist der Variationskoeffizient VX . Er bezieht die Standardabweichung auf den Mittelwert und liefert somit eine dimensionslose Grösse als Ergebnis.

¹⁶ Diese Unterschreitungswahrscheinlichkeit s entspricht den stochastischen Störungsquantilen Q_1 bzw. Q_5 für die betriebliche bzw. technische Störungsprognose in dieser Arbeit.

$$VX = \frac{\sigma}{\mu} \quad (9)$$

Ausschliesslich für $VX \ll 1$ kommt die Normalverteilung in Frage (Nachtigall, 2005). Basierend auf der angewandten Statistik ist sie bis zu $VX = 0.30$ zielführend, bei der Bahnbetriebsforschung mit eher stark streuenden Ereignisdauern erwies sie sich auch bis $VX = 0.50$ als anwendbar, da der Prognosefehler zwischen gemessenen und berechneten Quantilen vertretbar klein bleibt. Die Normalverteilung als bekannteste Form symmetrischer Verteilungen ist lediglich für den Standardfall (0-1-Verteilung) in Form des $\Phi(z)$ tabelliert. Daher wird eine Standardisierung erforderlich:

$$\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) = \Phi(z) = s \quad (10)$$

mit $z = \frac{b-\mu}{\sigma}$

Beispielsweise folgt aus der Standardisierung für eine Unterschreitungssicherheit $s = \Phi(z) = 0.80 \rightarrow z = 0.845$. Erst mit diesem standardisierten z wird ein Weiterarbeiten möglich; einschlägige Tabellenkalkulationen leisten die Standardisierung eigenständig. Für das Störungsquantil der Normalverteilung folgt nunmehr:

$$b_{\text{trans}} = z \cdot \sigma_{\text{Erf}} + EX_{\text{Erf}} \quad (11)$$

mit	b, b_{trans}	zeitliches Störungsquantil	in min
	EX_{Erf}	Erwartungswert (erfasster Mittelwert) der Störungsdauer	in min
	s	Unterschreitungssicherheit	in 0 ... 1
	VX	Variationskoeffizient der Störungsklasse	in 0 ... 1
	z	Standardisierung der Normalverteilung	-
	μ	Mittelwert (Messwert) der Störungsdauer	in min
	σ_{Erf}	Standardabweichung (Messwert) der Störungsdauer	in min
	$\Phi(z)$	kumulierte Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung	

Für jede Störungsklasse ist eine geeignete Verteilung auf Grundlage des Variationskoeffizienten auszuwählen (siehe Tabelle 11) und bei der Exponentialverteilung entsprechend zu kalibrieren.

	Exponentialverteilung	Normalverteilung
Kalibrierung	<ul style="list-style-type: none"> Erfassungsgrenze und Anteil unterhalb dokumentierter Ereignisse 	<ul style="list-style-type: none"> keine
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> Mittelwert 	<ul style="list-style-type: none"> Mittelwert Standardabweichung
Berechnung	$b_{\text{trans}} = -\ln(1 - s + s_{\text{Erf}}) \cdot EX_{\text{Erf}} + t_{\text{Erf}}$	$b_{\text{trans}} = z \cdot \sigma_{\text{Erf}} + EX_{\text{Erf}}$
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> meiste Ereignisklassen (Kalibrierung!) 	<ul style="list-style-type: none"> bei sehr kleinem Variationskoeffizienten
Störungsprognose	<ul style="list-style-type: none"> betriebliche Beeinträchtigung technische Störungsdauer 	<ul style="list-style-type: none"> technische Störungsdauer

Tabelle 11: Exponential- und Normalverteilung für die Störungsprognose (eigene Darstellung)

Die Erfahrung der bisherigen Bahnbetriebsforschung zeigt, dass auf Grund der sonst recht grossen Variationskoeffizienten nur wenige (meist technische) Störungsklassen ein Anwendungsfall der Normalverteilung sind.

3.3.4 Umkehrung der Inversion

In der bisherigen Betrachtung wurde zu einer gegebenen Unterschreitungswahrscheinlichkeit die zugehörige Störungsdauer gesucht. Diese wird mit der gegebenen Wahrscheinlichkeit unterschritten oder maximal erreicht. Dieser Ansatz lässt sich nochmals umkehren. Daraus resultiert die stochastische Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit die vorgegebene Ereignisdauer unterschritten oder maximal erreicht wird. Im Kontext der Prognosegranularität wird dies noch eine Rolle spielen. An dieser Stelle wird das zugehörige Formelwerk erarbeitet. Für die Exponentialverteilung bildet Gleichung (6) aus Kapitel 3.3.2 den Ausgangspunkt, wodurch extrem wenig Rechenaufwand verbleibt.

$$e^{-ab} = 1 - s \quad \rightarrow \quad s = 1 - e^{-ab} \quad (12)$$

Die Wahrscheinlichkeits- und Zeittransformation ist auch in dieser Betrachtung durchzuführen. Dann ist die maximale Wahrscheinlichkeit für das Erreichen einer noch zu definierenden Zeitgrenze berechenbar.

$$s_{\text{grenz}} = 1 - e^{-\left(\frac{t_{\text{grenz}} - t_{\text{Erf}}}{EX_{\text{Erf}}}\right)} + s_{\text{Erf}} \quad (13)$$

Analog ist diese Wahrscheinlichkeit als Prognosesicherheit auch bei der Modellierung mittels standardisierter Normalverteilung ermittelbar.

$$z_{\text{grenz}} = \frac{t_{\text{grenz}} - EX_{\text{Erf}}}{\sigma_{\text{Erf}}} \quad \text{für technische Störungsdauer mit } VX \ll 1 \quad (14)$$

mit $s_{\text{grenz}} = \Phi(z_{\text{grenz}})$

mit	EX_{Erf}	Erwartungswert (erfasster Mittelwert) der Störungsdauer	in min
	s_{Erf}	Anteil erfasster Werte unter Störungserfassungsgrenze	in 0 ... 1
	s_{grenz}	maximale Wahrscheinlichkeit für Erreichen der Zeitgrenze	in 0 ... 1
	t_{Erf}	Störungserfassungsgrenze	in min
	t_{grenz}	Zeitgrenze für abweichende Störungsbetrachtung	in min
	z	Standardisierung der Normalverteilung	-

Aufgrund der Vielzahl statistischer Kenngrößen bietet sich nunmehr eine Systematisierung verwendeten der Begrifflichkeiten in zwei Koordinatensystemen an. Hierbei ist zu beachten, dass ausschliesslich beim Umgang mit der Exponentialverteilung die unvollständig erfassten Datensätze unterhalb der Erfassungsgrenze von der Wahrscheinlichkeit und der Ereignisdauer zu kompensieren sind. Mathematisch ist dies eine Transformation des ursprünglichen Koordinatensystems. Die stochastische Modellbildung berücksichtigt diese Transformation vorerst nicht, sie wird erst im Nachgang durchgeführt. Dies entspricht einer Erweiterung der Betrachtung nach links unten in folgender Abbildung 19.

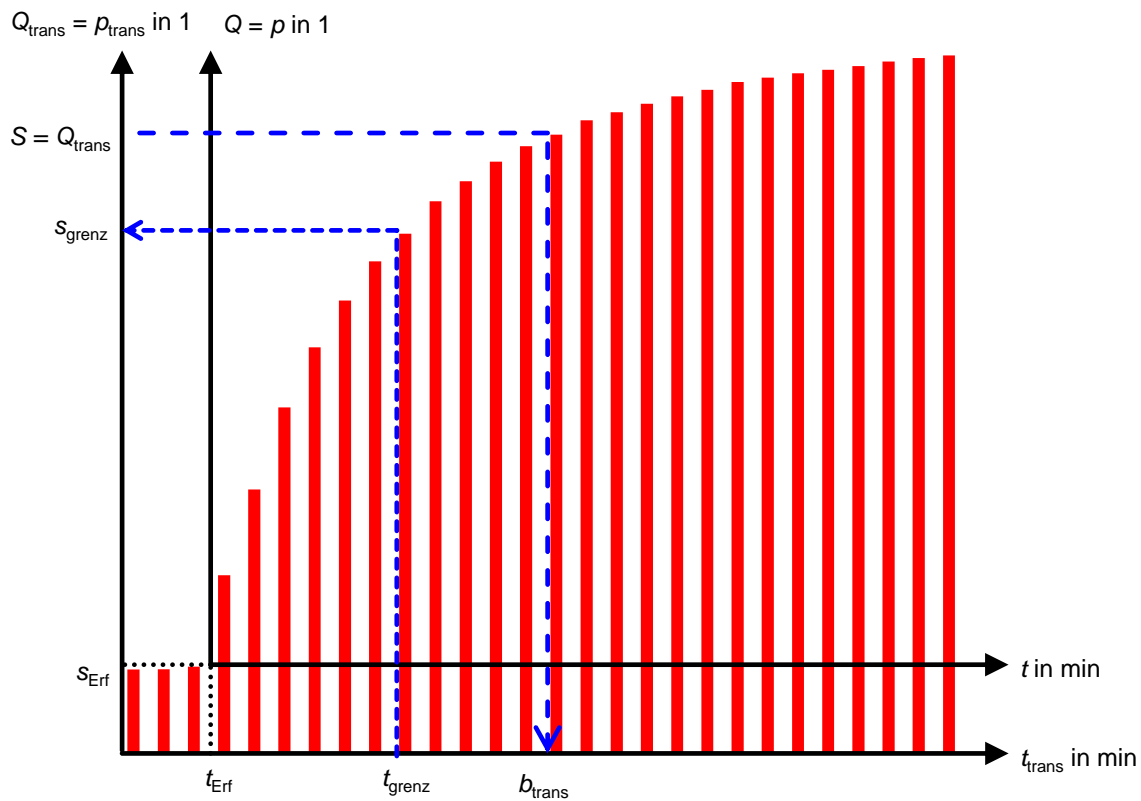


Abbildung 19: Systematisierung der stochastischen Kenngrößen (eigene Darstellung)

Die Stochastikinversion setzt in der Visualisierung der Abbildung 19 an der Ordinate des äusseren Koordinatensystems an, impliziert auf die Ordinate des inneren Systems, dessen Abszisse und schliesslich auf die Abszisse des äusseren Koordinatensystems, welches den Felddaten aus der Stichprobe entspricht. Für die Störungsprognose wird überwiegend diese Logik genutzt. Die in diesem Kapitel vorgestellte Umkehrung des Ansatzes verwendet die gleiche Logik, geht hingegen in umgekehrter Reihenfolge vor. Dies hat untergeordnet jedoch ebenso Relevanz für die Störungsprognose in der Bahnproduktion (siehe Kapitel 7.1.3).

3.4 Methoden der Variantenevaluation

3.4.1 Parameterbewertung mittels ABC-Analyse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Evaluation verschiedener Varianten für später zu diskutierende Fragestellungen. Hierbei stehen einzig die dazu geeigneten Methoden im Fokus, noch nicht deren Anwendung zur Problemlösung. Nach einer kurzen Vorstellung der ABC-Analyse werden diverse Einzelbewertungen quantifiziert und zusammengeführt. Ausführungen zur standardisierten Bewertung runden das Kapitel ab.

Für die Störungsprognose müssen in verschiedenen Kontexten Parameter bewertet werden. Nicht in jedem Fall sind die zu bewertenden Parameter quantifizierbar, was eine möglichst objektive Bewertung deutlich erschwert. Da oftmals dennoch eine Analyse derartiger Parameter erforderlich ist, sind die Parameter möglichst eindeutig und leicht differenzierbar zu evaluieren. Hierzu bietet sich ein Instrument aus der Betriebswirtschaftslehre bzw. Logistik an, die ABC-Analyse. Der zu evaluierende Parameter wird in drei Klassen A, B und C unterteilt, welche sich an der Erfüllung eines bestimmten Kriteriums orientieren. Beispielsweise kann das die prozessuale Standardisierung von Entstörungskonzepten betreffen. Die A-Klasse erfüllt den Parameter (hier beispielhaft die Standardisierung) am besten. Die C-Klasse schneidet am schlechtesten ab, während die B-Klasse für mittelmässige Fälle dazwischen liegt. Diese Einteilung hat den Vorteil, dass in aller Regel recht plausibel in zwei diametrale Klassen A und C unterschieden werden kann und für mittlere Ausprägungen genau eine Klasse relevant bleibt.

Im Beispiel der Standardisierung von Entstörkonzepten wurden mithilfe der ABC-Analyse folgende Klassen gebildet:

- A) bestehende Detailprozesse
- B) bestehende Grobkonzepte
- C) Massnahmen zu eruieren

Anhand dieser Einteilung wird es möglich, Störereignisarten hinsichtlich der Standardisierung der Intervention zu klassifizieren. Diese beispielhafte Klassifizierung wird bei der Frage nach der Prognosefähigkeit von Störereignissen eine Rolle spielen.

Selbstverständlich ist es möglich, eine feinere Unterteilung als jene in drei Klassen einzuführen oder aus der ABC-Analyse abzuleiten. Die feingliedrigere Unterteilung erschwert jedoch die eindeutige Zuordnung zu einer Evaluationsklasse.

3.4.2 Zusammenführen von Bewertungen

Zunächst liefert die ABC-Analyse lediglich die Zuordnung eines Parameters zu einer Klasse A, B oder C. Für die Zusammenführung mehrerer Parameterbewertungen Bewertungskriterien bietet sich nun eine Quantifizierung der Einzelbewertungen an, um im Folgenden eine Gesamtbewertung herzuleiten. Dabei wird dem Wesen der bestehenden Einstufung entsprochen. Die Klasse A erhält die höchste Bewertung, Klasse C die niedrigste und die mittlere Klasse B entsprechend eine mittlere quantitative Bewertung; die konkrete Quantifizierung ist dabei zweitrangig. Wichtig ist, dass die Klasse B betragsmässig mittig zwischen A und C liegt, da spätere Verrechnungen sonst von vornherein verzerrt würden.

In dieser Arbeit wird folgende Quantifizierung vorgenommen: Klasse A wird vergeben, wenn ein zu bewertender Parameter extrem gut erfüllt wird. Daher wird diese Klasse mit 1.0 quantifiziert. Demgegenüber schneidet Klasse C sehr schlecht ab, was sich in der Quantifizierung mit 0.0 widerspiegelt. Klasse B sollte mittig dazwischen liegen und wird mit 0.5 quantifiziert. Somit ergibt sich als Zuordnung zu den Klassen:

- Klasse A → 1.0
- Klasse B → 0.5
- Klasse C → 0.0

Solang die Quantifizierung einem Vielfachen dieser exemplarischen Quantifizierung entspricht, führt die anschliessende Verrechnung zu identischen Endergebnissen der Variantenevaluation und daher zur gleichen Gesamtbewertung. Wird nunmehr die Bewertung mehrerer Parameter zusammengefasst, sind die obigen Zahlen der Klassenquantifizierung zu verknüpfen. Dazu stehen wiederum verschiedene gängige Alternativen zur Auswahl:

- additive Verknüpfung
- multiplikative Verknüpfung
- geometrische Verknüpfung

Für die **additive Verknüpfung** werden die Parameterklassifizierungen addiert, dies bietet sich bei unabhängigen Parametern an. Hier können sich verschiedene Bewertungen jedoch derart gegeneinander ausgleichen, dass deren Unterschiedlichkeit im Ergebnis nicht mehr sichtbar ist. Eine geeignete Wichtung kann zwar Abhilfe schaffen, sollte im Einzelfall aber gut begründet sein. Auch die Ermittlung des Durchschnitts der Parameterbewertungen ist möglich, führt qualitativ aber auf die Ergebnisse der additiven Verknüpfung (kalibriert auf die maximal mögliche Bewertung). Dennoch ist bei der additiven Verknüpfung die schlechte Bewertung eines Parameters recht gut kompensierbar, was gegebenenfalls nicht erwünscht ist, falls eine geringe Bewertung eine komplette Variante ausscheiden lassen soll.

Bei der **multiplikativen Verknüpfung** werden die Quantifizierungen der Parameter miteinander multipliziert, was insbesondere bei abhängigen Parametern von Interesse ist. Dabei wirkt sich die B- oder C-Bewertung unmittelbar auf die Gesamtbewertung aus; eine einzelne Teilbewertung 0

beeinflusst Gesamtergebnis und erübrigt die weiteren Teilbewertungen. Dies entspricht der möglichen Forderung, dass keine C-Bewertung auftreten darf, was eine sehr strikte Anforderung ist. Für die Bewertung von (Handlungs-) Alternativen in der Bahnproduktion ist diese Verknüpfung folglich eher ungeeignet.

Eine Alternative ist die **geometrische Addition**, auch als pythagoreische Addition bezeichnet. Zur Visualisierung kann man sich vorstellen, dass die einzelnen Bewertungsparameter als linear unabhängige Vektoren interpretiert werden und der Betrag des resultierenden Gesamtvektors die Gesamtbewertung symbolisiert. Zur Referenzierung dieser Gesamtbewertung auf das bestmögliche Ergebnis wird der Betrag der Gesamtbewertung anschliessend auf den Maximalbetrag normiert. Dieser entspricht der Anzahl bewerteter Parameter, da jeder Parameter (siehe oben) maximal mit 1.0 bewertet werden kann. Es resultiert:

$$\text{Bewertung} = \frac{\sqrt{\text{Einzelbewertung I}^2 + \text{Einzelbewertung II}^2 + \dots + \text{Einzelbewertung n}^2}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Die geometrische Addition bietet den Vorteil, dass eine einfache Kompensation diverser Parameterklassen, z. B. einmal A substituiert zweimal B, *nicht* möglich ist. Für die Bestimmung der Prognosefähigkeitszahl und der Prognosekennzahl (siehe Kapitel 5.3.2) wird diese Rechenart von zentraler Bedeutung sein.

Verknüpfung	additiv	multiplikativ	geometrisch
Geometrieanalogie	Streckenlänge	Volumen des Quaders	Raumdiagonallänge

Tabelle 12: Geometrische Analogie der Verknüpfung dreier quantifizierter Einzelbewertungen (eigene Darstellung)

Zusammenfassend gibt Tabelle 12 einen Überblick über die Geometrieanalogie der verschiedenen Verknüpfungen von beispielhaft exakt drei quantifizierten Parametern.

3.4.3 Standardisierte Bewertung

Die standardisierte Bewertung hat besondere Relevanz für die Auswahl von Dispositionsalternativen (siehe Kapitel 6.1.3), weshalb an dieser Stelle beispielhaft darauf verwiesen wird (vgl. (Schranil, et al., 2012)). Diese Bewertungsform bietet die Möglichkeit, nach verschiedenen Dimensionen einer Zielfunktion aus definierten Kriterien aufzustellen und auf Grundlage mehrerer Einzelbewertungen eine qualifizierte Gesamtbewertung zu generieren sowie Alternativen besonders transparent zu evaluieren.

Im beispielhaften Ereignisfall gibt es eine Reihe verschiedener hier noch nicht zu thematisierender betrieblicher Handlungsoptionen. Diese liegen etwa zwischen dem blossen Abwarten und dem Einrichten von Busnotverkehr. Von Interesse im Sinne einer Bewertung sind die Folgen bei der Umsetzung dieser Optionen. Dazu sind zunächst Zieldimensionen zu bilden, welche von einer dispositiven Handlung beeinflusst werden könnten. Im Anwendungsbeispiel der Disposition sind dies folgende **Dimensionen**:

- betriebliche Kosten (z. B. Personal, Trassengebühren, ...)
- betriebliche Aktivität (z. B. Fahrplanänderung, Endkundeninformation, ...)
- Wirkung auf Regelbetrieb (z. B. Stabilisierung durch Ersatzzug)
- Wirkung auf Fahrgast (z. B. Unzufriedenheit wegen Anschlussbruch)

In einem nächsten Schritt sind diese Dimensionen einer **Wichtung** zu unterziehen; es entsteht eine **Zielfunktion**. Hierbei sind gesamt 100 % auf die einzelnen (Ziel-) Dimensionen aufzuteilen. Dahinter liegt die Frage, wie wichtig die einzelnen Dimensionen sind. Dies kann als Gleichbehandlung der Dimensionen, im nachfolgenden Beispiel mit je 25 % erfolgen. Es hat allerdings als zielführend erwiesen, eine Hauptdimension mit 50 %, eine erste Nebendimension mit 30 % und die verbliebenen Dimensionen mit je 10 % zu wichten, um die Dominanz je einer der Dimensionen hälftig zu quantifizieren. Die nachstehende Tabelle 13 führt dies am Dispositionsbeispiel spaltenweise in mehreren Varianten aus:

	Fokus: Alle	Fokus: Kosten	Fokus: Aktivität	Fokus: Regelbetrieb	Fokus: Fahrgast
Kosten	25 %	50%	10%	10%	10%
Aktivität	25%	30%	50%	30%	10%
Regelbetrieb	25%	10%	30%	50%	30%
Fahrgast	25%	10%	10%	10%	50%
	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 13: Varianten von Wichtungen für Zielfunktionen am Beispiel der Disposition (eigene Darstellung)

Fortfolgend ist der Einfluss einer jeder Handlungsoption (im Beispiel: Dispositionsvariante) auf die Dimensionen der Zielfunktion zu bewerten. Zur Quantifizierung der einzelnen Aspekte wird hier eine dreiteilige ABC-Skala verwendet. So ist beispielsweise ein zusätzlicher Sonderzug von betrieblichen Kosten und Aufwand betrachtet hoch und damit negativ einzustufen (C-Klasse). Für den Fahrgast ist eine solche Massnahme hingegen äusserst attraktiv, also positiv (A-Klasse). Die Wirkung auf den Regelbetrieb kann wegen Kapazitätsproblemen destabilisierend sein (C-Klasse).

Um die Kompensation einer negativen **Einzelbewertung** durch eine einzige Positivbewertung auszuschliessen und somit positiv bzw. neutral bewertete Aspekte gegenüber solchen mit negativen Bewertungen herauszufiltern, werden negative Bewertungen durch stärkere Wichtung leicht dominant ausgestattet. Hierzu wird konkret eine um 10 % leicht verstärkte Wichtung vorgenommen, woraufhin die negative Bewertung -1.1 statt -1.0 beträgt. Dies genügt bereits, damit jene in einer Dimension schlecht bewertete Handlungsoption zwar herabgestuft, aber nicht gänzlich ausgeschlossen wird. Im Dispositionsbeispiel gilt folgende Skale für die Einzelbewertungen:

- positiver Einfluss, geringer Aufwand, stabilisierend → 1.0
- neutral, mittlerer Aufwand → 0.0
- negativer Einfluss, hoher Aufwand, destabilisierend → -1.1

Gemäss der Zielfunktion ist abschliessend die Gesamtbewertung einer jeden Massnahme durchzuführen, dies entspricht dem methodischen Prinzip einer nun gewichteten additiven Verknüpfung.

$$\text{Bewertung} = \sum_{i=1}^{\text{Dimensionen}} \text{Einzelbewertung} \cdot \text{Wichtung} \quad (16)$$

Aus den quantifizierten Einzelbewertungen ist mit diesen Überlegungen eine standardisierte Bewertung für jede (Dispositions-) Massnahme errechenbar. Dieses Vorgehen wird später in Kapitel 6.1.3 für die Evaluation von Dispositionsalternativen angewendet, ohne erneut auf die methodischen Grundlagen einzugehen.

3.5 Zwischenfazit zum Kapitel 3

Die Ansätze des vorliegenden vordergründig theoretischen Kapitels sind für die weitere Bearbeitung der Forschungsfrage von zentraler Bedeutung. Die Ressourcenorientierung nebst ihren beiden Betrachtungsweisen wird an mehreren Stellen der Bahnbetriebsforschung benötigt, so auch direkt anschliessend für die Prozessanalysen im Störfall. Dazu sind sowohl die Daten betrieblicher Ereignisse als auch technische Störungsdaten der vorgestellten Forschungspartner zu betrachten. Eine wichtige Rolle spielen statistische Auswertungen und Regressionen, um relevante Ereignisklassen identifizieren und analysieren zu können. Schliesslich wird die Varianten-evaluation im Kontext des Prognoseprozesses mehrfach Verwendung finden.

4 Analyse von Störungsarten

4.1 Prozessanalyse der Bahnproduktion

4.1.1 Generischer Störungsablauf

Das vorliegende Kapitel 4 widmet sich der Analyse von Störungsarten, bevor in Kapitel 5 konkrete Störungsdaten analysiert werden. Zunächst werden nun in Kapitel 4.1 der generische Störungsfall beschrieben, prognoserelevante Zeiten abgeleitet und nebst Aussagen zur Datenlage funktionale Anforderungen an die spätere Störungsprognose abgeleitet. Fortfolgend werden die beiden Analysevarianten Bottom-Up-Betrachtung und Top-Down-Betrachtung hinsichtlich des Analyseansatzes, der Klassifizierungsregeln und der Klassifizierungsschemata in Kapitel 4.2 bzw. 4.3 detailliert.

Das Störungsgeschehen in Bahnsystemen lässt sich analytisch in einheitliche Phasen einteilen. Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der systematischen Erfassung und Auswertung betrieblicher und technischer Störungsdaten. In Anknüpfung an die Systematik von Störereignissen aus Kapitel 2.3.1 interessiert zunächst der allgemeine zeitliche Ablauf von Störungen des Bahnbetriebs. Dabei ist die Verknüpfung zwischen den technischen und betrieblichen Ereignissen zu studieren. Weiterhin sind daraus die prognoserelevanten Zeiten abzuleiten und an der Datenlage zu spiegeln. Zur detaillierten Analyse von Störungsverläufen bedarf es der folgenden Unterscheidung von Betriebszuständen:

- **Regelbetrieb**
Fahrbetrieb auf Grundlage der an den Endkunden publizierten Informationen.
- **Chaosphase** (Abklärungsphase)
Phase der Eruiierung von Ursache und Wirkung einer Störung.
- **geplanter Betrieb**
Der Störung angepasster kurzfristig umgeplanter Fahrbetrieb.

Zentral ist hierbei die Abgrenzung dieser Betriebszustände. Vor und nach der Störung herrscht der Regelbetrieb als ungestörter Betrieb vor und bildet den Ausgangspunkt der Betrachtungen. In diesen Regelbetrieb fällt ebenso die Zeitspanne zwischen Störungsbeginn, z. B. durch den Ausfall einer Komponente, und der Offenbarung dieser Störung. Während dieser Zeit ist der Fehler noch nicht bekannt und es wird irrtümlich vom ungestörten Zustand ausgegangen. Abbildung 20 zeigt

die temporalen Zusammenhänge der Störungsabschnitte über die Zeitachse als generischen Störungsablauf:

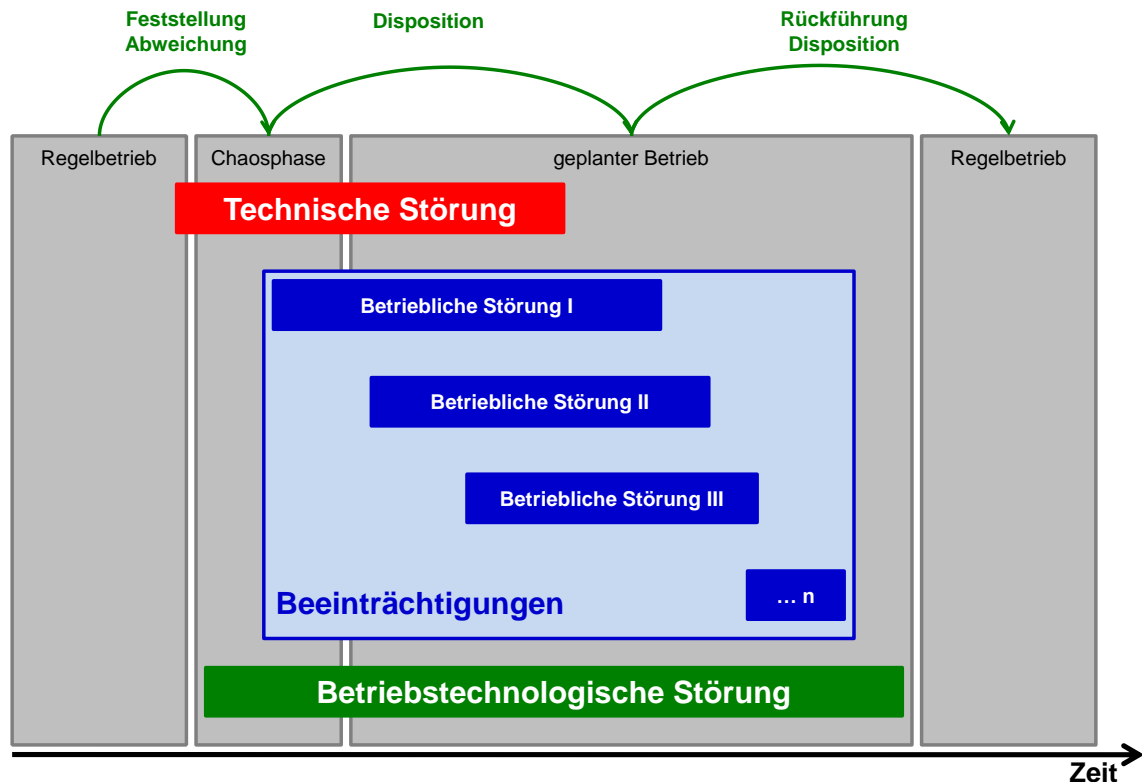


Abbildung 20: Generischer Störungsablauf in temporaler Verflechtung (Schranil, et al., 2011)

Der Regelbetrieb endet mit dem Wirksamwerden einer Störung. Mit dieser Offenbarung beginnt die technische Störungsdauer. Sie dauert an, bis die betroffene Ressource alle (auch redundanten) Funktionalitäten wieder erfüllen kann. Dabei ist es möglich, dass die Wiederherstellung in mehreren Teilschritten erfolgt. Beispielsweise kann eine defekte Weiche in einer Endlage verriegelt und somit befahren werden, obwohl die technische Störung noch nicht beendet ist. Unter der Thematik der Intervention (siehe Kapitel 6.2) sind die entsprechenden technischen Teilprozesse der Entstörung zu führen.

Die betrieblichen Auswirkungen von Störungen zeigen sich in einer Abweichung der realen von der geplanten Weg-Zeit-Linie und reichen als Zeitspanne vom Wirksamwerden der Abweichung bis zum Wiedererreichen der geplanten Weg-Zeit-Linie. Dies kann gegebenenfalls auch in eine genügend grosse Wendezeit am Ende des eigentlichen Zuglaufs fallen. Bis eine offenbarte technische Störung zu betrieblichen Auswirkungen führt, kann erneut einige Zeit verstreichen, dies hängt vom Betriebsprogramm ab. Abhängig von diesem Betriebsprogramm sind mehr oder weniger viele Züge mit einer Zusatzverspätung beaufschlagt. Das Auftreten weiterer Verspätungen als betriebliches Störungsmerkmal reicht zumindest bei dichten Betriebsprogrammen zeitlich über das technische Störungsende hinaus. Da im Betriebsprogramm zwischen den Zügen eine Zeitlücke (im Sinne von Puffer) grösser der minimalen technischen Zugfolgezeit besteht, baut sich die störungsbedingt auftretende Abweichung der Einzelzüge gegen Ende der betrieblichen Störung

hin ab. Es ist daher möglich, die Zeitspanne zwischen dem ersten Auftreten und dem Abklingen der letzten Abweichung zu eruieren.

Selbst nach Abklingen der Fahrplanabweichungen sind nicht zwangsläufig alle Ressourcen am vorgesehenen Ort; möglicherweise wurden Fahrzeug- oder Personaleinsätze modifiziert. Die Rückführung erfordert dispositive Eingriffe, beispielweise das „Netzaufräumen“ mittels Dienst- bzw. Überführungsfahrten. Erst wenn sich alle Ressourcen wieder am ursprünglich geplanten Ort befinden, ist das betriebstechnologische Störungsende erreicht. Die betriebstechnologischen Zusammenhänge stellt Abbildung 21 in der kausalen Verflechtung dar.

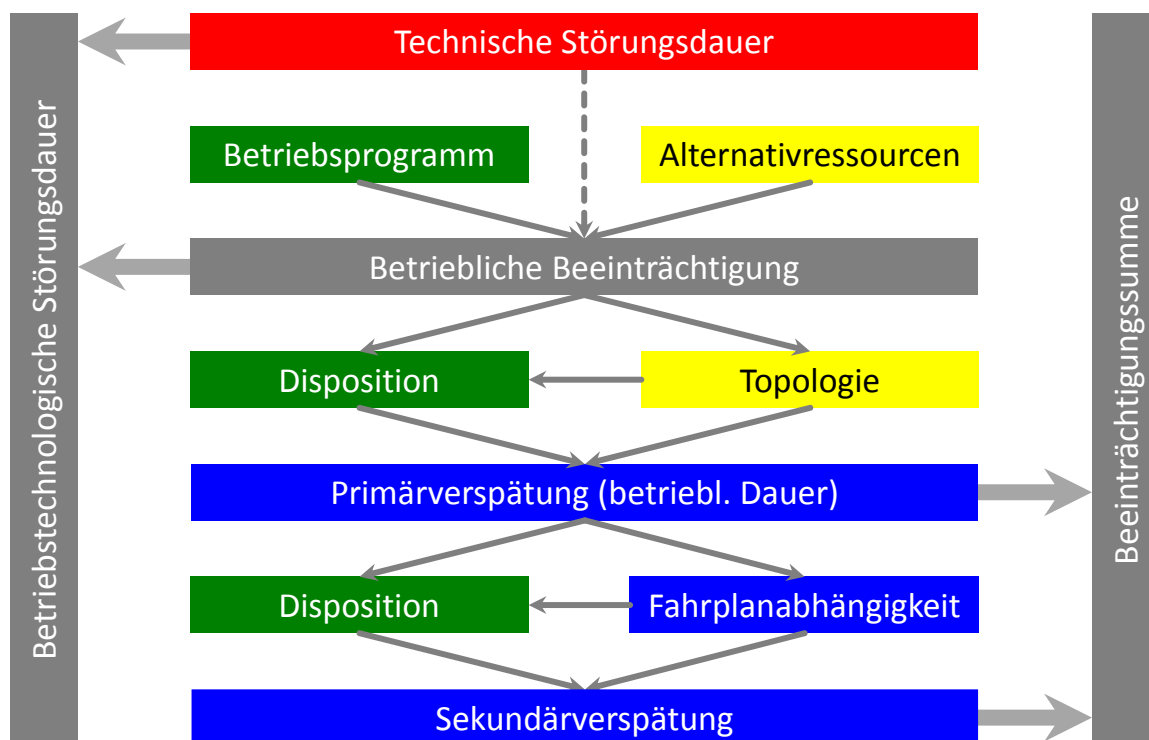


Abbildung 21: Generischer Störungsablauf in kausaler Verflechtung (Schranil, et al., 2013)

Das Ziel der technischen Entstörung (Intervention) ist die rasche Wiederherstellung des regulären Systemzustands. Die betriebliche Entstörung (Disposition) verfolgt zwar das Ziel der Rückkehr in den Regelbetrieb, jedoch kann mit erster Priorität eine mehr oder weniger zeitlich ausgedehnte Phase eines modifizierten geplanten Betriebs sinnvoll sein. Störungen provozieren in der Regel eine geringere (Rest-) Leistungsfähigkeit des Bahnsystems, wodurch nicht immer das ursprüngliche geplante Betriebsprogramm produzierbar ist. Betrieblich gesehen stellt sich der ursprünglich geplante Regelbetrieb erst nach Ende der betriebstechnologischen Störung wieder ein. Somit gibt es für Beginn und Ende einer Störung technische, betriebliche und betriebstechnologische Aspekte, welche je nach Betrachtungsart die Größe der gemeinhin als „Störungsdauer“ bezeichneten Dauer beeinflussen. Daraufhin ist klar zwischen diesen Bezeichnungen zu unterscheiden; für den Endkunden ist die betriebliche Störungsdauer am relevantesten, den technischen Support interessiert eher die technische Störungsdauer und für die Bahnproduktion ist die betriebstechnologische Störungsdauer relevant.

4.1.2 Prognoserelevante Anforderungen und Zeiten

Die im Kapitel 2.1 diskutierten Systemaspekte der Bahnsysteme erlauben die Prognose von technischen wie betrieblichen Störungsdauern. Sie erfordern diese Prognose insbesondere auf Grund der in Bezug zu anderen Verkehrssystemen anspruchsvolleren Produktionsweise. Bevor ein Prognoseprozess aufgestellt werden kann, sind konkrete funktionale Voraussetzungen für die Störungsprognose anzusetzen. Die Voraussetzungen zur Realisierung einer Störungsprognose lassen sich in drei Teilprozesse zerlegen:

- **Vorbetrachtung** Bestimmen der wichtigsten Rahmenbedingungen (z. B. Störungsdefinition)
- **Diagnose** Auseinandersetzen mit dem realen Störungsgeschehen (z. B. Störungsmonitoring)
- **Prognose** Beitrag zur Beherrschung eingetretener Ereignisse (z. B. Umgang mit Streuung)

Diese Teilprozesse bauen sequentiell aufeinander auf. Dabei gilt die Sequenzstruktur ebenso für die Systematik der einzelnen Prognoseaspekte. Die Vorbetrachtungen beginnen mit der Beantwortung der Frage nach dem Wesen eines als Störung bewerteten Ereignisses. Erst darauf aufbauend lässt sich ein prognoserelevantes Klassifizierungsschema ableiten. Abschliessend ist in diesen Vorbetrachtungen die Frage der relevanten Prognosegrößen zu beantworten.

In der Störungsforschung gibt es verschiedene denkbare Lesarten von Störungsdauern. Wenn man an dieser Stelle den generischen Störungsablauf aus Abbildung 20 in Betracht zieht, ergeben sich vier Zeitspannen, die als „Störungsdauer“ aufgefasst werden (Schranil, et al., 2011):

- **technische Störungsdauer**
Zeit zwischen Eintritt eines technischen Fehlers und dessen [vollständiger] Behebung
- **betriebliche Störungsdauer**
Fahrplanabweichung des jeweiligen Zuges
- **Beeinträchtigungssumme**
Summe der (primären und sekundären) Fahrplanabweichungen aus Störungsfall
- **betriebstechnologische Störungsdauer**
Zeitspanne, bis der innerbetrieblich reguläre Ablauf wieder erreicht wird

Eine jede Störung kann eine technische *und* eine betriebliche Störungsdauer aufweisen, welche in der Regel nicht identisch sind. Die technische Störung endet mit der Wiederherstellung aller Funktionalitäten einer Ressource, die betriebliche Störungsdauer fokussiert auf die operativen Auswirkungen des Ereignisses. Wie bereits ausgeführt wurde, ist es ausdrücklich möglich, betriebliche Störungen (und damit auch betriebliche Störungsdauern) zu beobachten, ohne dass eine technische Störung bzw. eine technische Störungsdauer zu verzeichnen wäre, beispielsweise bei rein prozessualen Aspekten der Bahnproduktion.

Darüber hinaus ist es prinzipiell denkbar, die Dauer, während der einige Züge zusätzliche Abweichungen erhalten oder mit diesen verkehren, als eine Form der (aggregierten) betrieblichen Störungsdauer zu interpretieren. Da dies sehr stark vom aktuellen Betriebsprogramm¹⁷ abhängt, sind der Aussagegehalt und die Vergleichbarkeit dieser Form der Störungsbetrachtung äusserst eingeschränkt und es wird von dieser Betrachtungsweise abgesehen. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die Beeinträchtigungssumme als Summe aller detektierten Fahrplanabweichungen ebenfalls stark vom Betriebsprogramm abhängt. Zum Abschätzen der Folgen verschiedener Dispositionskonzepte kann diese Grösse sinnvoll sein; für die Störungsprognose im Kontext des Abweichungsmanagements ist die Beeinträchtigungssumme jedoch ungeeignet. Die betriebstechnologische Störungsdauer hat innerbetrieblich durchaus eine Aussage (z. B. Einsatz eines Ersatzzuges für sechs Stunden Einsatzzeit). Im Sinne der Betrachtung für die Prognose der Dauer von Störungen des Bahnbetriebs aus Kundensicht ist dieser Aspekt hingegen irrelevant. Für die Störungsprognose genügt im Folgenden eine Beschränkung auf die technischen und die betrieblichen Ereignisdauern, da diese Grössen eine Aussage über die Dauer des zugrunde liegenden Ereignisses (technische Störungsdauer) beziehungsweise die zu erwartende Abweichung auf Ebene des Einzelzuges (betriebliche Störungsdauer) liefern und somit innerbetrieblich wie für den Endkunden eine Entscheidungsunterstützung bereitstellen können.

Vorbetrachtung	Diagnose	Prognose
Störungsdefinition	Störungsmonitoring	Umgang mit Streuung und Unsicherheit
Klassifizierungsschema	Störungsklassifizierung	singuläre Detaillierung
Relevante Prognosegrössen	Anforderungen an Störungsquantile	Bewertung von Alternativen

Tabelle 14: Anforderungen und Voraussetzungen der Störungsprognose (Schranil, et al., 2013)

Aus der Störungsdefinition (vgl. Tabelle 14) der Vorbetrachtung folgt das Störungsmonitoring im Diagnoseprozess. Hierbei werden auftretende Ereignisse beobachtet und analysiert. Dort auftretende Störungen sind entsprechend dem Klassifizierungsschema aus den Vorbetrachtungen zu clustern. Mit diesem Vorgehen lassen sich im Sinne der Störungskritikalität relevante Ereignisse herausfiltern. Die eigentliche Störungsprognose arbeitet mit Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Form von Quantilen. Dabei sind Überreaktionen mit zu hohen Kosten ebenso zu vermeiden wie Unterreaktionen mit untragbaren Einbussen für die Endkunden.

Die Störungsprognose muss stets mit Streuungen und verbleibenden Unsicherheiten umgehen. Dies gilt besonders beim Eintritt eines Ereignisses, da zu diesem Zeitpunkt meist nur wenige Informationen vorliegen. Erst nach und nach treffen detaillierte Informationen ein und erlauben die Detaillierung der Prognose, welche ihrerseits als Iteration zu führen ist (siehe auch Kapitel 7.2). Für die zentralen Folgeprozesse der Störungsprognose in Form der technischen Störungsbe-

¹⁷ z. B. Länge des Zuglaufs, Grösse und Aufteilung von Pufferzeiten

bung (Intervention), betrieblichen Störungsbehebung (Disposition) sowie der betriebsinternen wie endkundenbezogenen Ereigniskommunikation sind jeweils verschiedene Alternativvarianten zu bewerten.

Die voran beschriebenen Aspekte stellen in der dargelegten dreiteiligen Struktur die wichtigsten Voraussetzungen der Störungsprognose dar. In dieser Struktur resultiert eine dreispaltige Darstellung (Tabelle 14), wobei neben den Spalten- vor allem Zeilenbezüge wie im Text beschrieben bestehen. Erst die Verflechtung jener Aspekte ermöglicht das Erreichen einer Prognosefähigkeit von Bahnstörungen. Für die relevanten Prognosegrößen resultiert auch aus dieser Betrachtung die bereits ausgeführte Beschränkung auf die technische und die betriebliche Störungsdauer.

4.1.3 Datenlage für das Störungsmonitoring

Im Zuge des Betriebsmanagements werden systematisch Betriebsdaten gesammelt. Hieran sollte sich stets eine ebenso systematische Auswertung hinsichtlich Schwachstellen im jeweiligen Bahnsystem anschliessen. Bereits fundierte Informationen an die Endkunden erfordern eine möglichst genaue Informationslage, welche ebenso aus dem Störungsmonitoring resultiert. Weiterhin lassen sich die hierdurch ermittelten Daten auch für die Betriebsplanung nutzen, indem direkt aus erlebten Störereignissen gelernt wird. Zudem können Analysen und Statistiken aus den Felddaten generiert werden. Das Störungsmonitoring leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Analyse der bestehenden Situation im jeweiligen Bahnsystem.

Die Fokussierung der Analysen auf die technische und betriebliche Störungsdauer separiert die Arten der Datenbanken. Somit bestehen folgende grundsätzliche zwei Arten von Störungsdatenbanken, deren Verknüpfung eine dritte Art generiert:

- rein technische Störungsdatenbanken
- rein betriebliche Störungsdatenbanken
- kombinierte betriebliche und technische Störungsdatenbanken

Nachstehende Tabelle 15 gibt einen Überblick über die analysierten Datenbanken der Forschungspartner dieser Arbeit:

	Vollbahn	Stadtbahn
betriebliche Störungen	SBB ErZu BLS ErZu DB VU / Internet	DVB Betriebsleitstelle
kombinierte Datenbank	CBC FDL (Fahrdienstleiter)	SVZ Leitstellenjournal
technische Störungen	SBB SIP (Infrastrukturportal)	DVB Netzleitstelle

Tabelle 15: Analyisierte Störungsdatenbanken der Forschungspartner (eigene Darstellung)

Die technischen Störungsdauern werden eher auf Seiten der Infrastrukturbetreiber bzw. Verkehrsunternehmen (Fahrzeugbetreiber) analysiert, die betrieblichen Störungsdauern fallen in der Bahnbetriebsführung an. Dies kann leicht zu Missverständnissen führen, da im Zweifelsfall beide Seiten von einer identisch klassifizierten Störung sprechen, jedoch Unterschiedliches meinen: Die „Triebfahrzeugstörung“ aus Sicht der Verkehrsunternehmung und aus Sicht der Bahnbetriebsführung haben entsprechend einen abweichenden Analysefokus. Die Betrachtung als Störung endet betrieblich mit der Behebung der eingetretenen Fahrplanabweichung, technisch endet dieses Störereignis jedoch erst mit der Fehlerbehebung.

Entsprechend den systematischen Unterschieden zwischen Vollbahn und Stadtbahn (siehe auch Kapitel 2.1.2) erfolgt die Bahnbetriebsführung in Vollbahnen näher am Infrastrukturunternehmen, jedoch losgelöst von den rein technischen Fragestellungen bezüglich der Infrastrukturkomponenten (vgl. Kapitel 2.3.2). Bei Stadtbahnen hingegen findet die Bahnbetriebsführung näher am Verkehrsunternehmen, jedoch auch hier losgelöst von den rein technischen Fragestellungen, statt. Dies verstärkt die beschriebenen Sichtweisen. Dementsprechend resultieren zwischen Netz und Betrieb verschiedenartige Datenbanken, welche entweder rein technische oder rein betriebliche Aspekte widerspiegeln. Eine Verknüpfung beider Betrachtungsweisen wäre für ein optimales Beheben eingetretener Störungen zwar sinnvoll, findet bislang aber allenfalls über Verweise zwischen technischen und betrieblichen Störfallnummern statt (z. B. Alarm- und Ereignisassistenz ALEA der SBB mit Referenz auf die zugehörige betriebliche Fallnummer bei den Ereignissen im Zugverkehr ErZu). Eine in diesem Sinn positive Ausnahme bilden die in den Pretests untersuchten Fallstudien kleinerer Betreiber. Auf Grund der manuellen Datenerfassung sind darin sowohl technische als auch betriebliche Störereignisse abgebildet, jedoch überwiegend aus technischer oder betrieblicher Perspektive.

Die Analysen in der Bahnpraxis zeigen, dass bestehende Klassifizierungsschemata im Vollbahnbereich aus organisatorischen Gründen von Infrastrukturunternehmen erstellt werden, da diese für die Bahnbetriebsführung verantwortlich sind. Dies bewirkt allerdings eine gewisse Infrastukturlastigkeit der Codierung, ohne dass dort ein Störungsschwerpunkt liegt. Beispielsweise sind rein betriebliche Aspekte in den Codelisten unterrepräsentiert. Gleichzeitig sinkt sowohl bei der Vollbahn als auch bei der Stadtbahn im Fall von Fahrzeugstörungen meist die Klassifizierungstiefe, was die Prognose tendenziell erschwert. Dieser Umstand liegt in der Logik der Betriebsführung begründet, die sich jeweils auf die funktionsfähigen Ressourcen beschränkt und somit gestörte Fahrzeuge weniger thematisiert. Sind die Verspätungsursachen nicht bekannt, wird meist die Wirkung codiert, z. B. „Verspätung ab Vorbahn“ oder „verspätete Übergabe aus dem Ausland“. Einen Ausweg können neben der detaillierten Prüfung des Einzelfalls Fehlerbaumanalysen (FTA – Fault Tree Analysis) gemäss (Deutsches Institut für Normung, 1981) bilden, welche als Systemanalyse die einzelne Störung vom Top-Ereignis im Sinne einer eingetretenen Störung zur Ursache zurückverfolgen (Kapitel 2.4.3).

4.1.4 Motivationen und deren Hierarchie

Je detaillierter die Klassifizierung gleichartiger Störereignisse erfolgt, desto präziser wird die Störungsprognose ausfallen. In diesem Sinne determiniert die Klassifizierung bereits die Prognosemöglichkeiten, bevor die eigentliche Datensammlung beginnt. Andererseits steigt mit zunehmender Detaillierung der Klassifizierungsaufwand und es sinkt die Anzahl der dokumentierten Ereignisse einer Klasse. Dies wirkt sich negativ auf die Prognosefähigkeit derartiger Ereignisse aus. Daher ist eine Abwägung von Klassifizierungstiefe, Aufwand und Prognosefähigkeit erforderlich. Systematisiert man daraufhin die Gründe, weshalb ein Abweichungsmanagement im Sinne von Störungsanalysen im Bahnbetrieb durchgeführt werden sollte, ergeben sich vier grundsätzliche Stossrichtungen, welche nachfolgend in einer Hierarchie eingeordnet werden:

- Betriebsmanagement (Betrieb am Laufen halten)
- Kundeninformation (gegenüber Endkunden kommunizieren)
- Betriebsplanung (Überführung operativer Erkenntnisse in die Planung)
- Analyse und Statistik (Aufzeigen der Situation bzw. deren Progression)

Bei diesen Stossrichtungen bestehen unterschiedliche Zeithorizonte. Während Betriebsmanagement und Kundeninformation eher das operative Geschäft betreffen, zielen die Betriebsplanung teilweise sowie Analyse und Statistik vollständig auf strategische Fragestellungen der Bahnproduktion (Abbildung 22). Die Art der Datenbank (technische und/oder betriebliche Betrachtung) spielt hierbei keine wesentliche Rolle, auch wenn die strategischen Auswertungsmöglichkeiten bei kombinierten betrieblichen und technischen Datensätzen steigen.

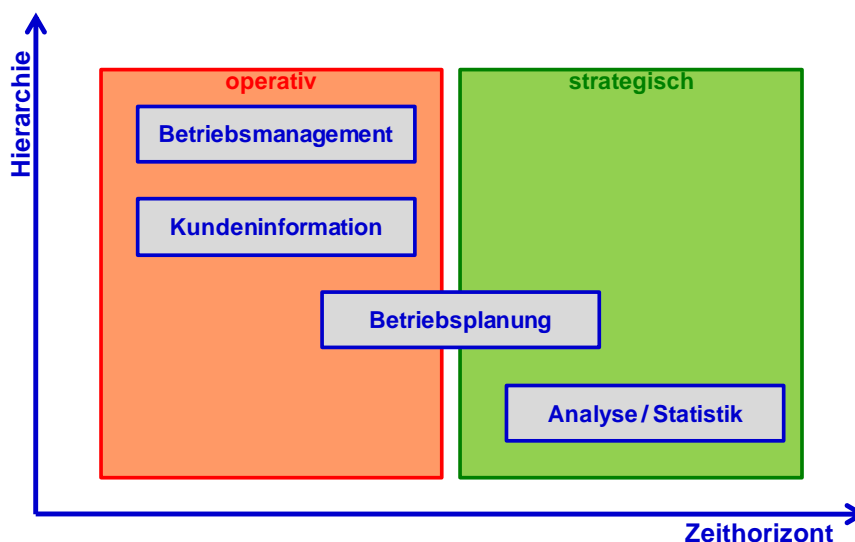


Abbildung 22: Hierarchie der Motivationsrichtungen des Störungsmonitorings (Schranil, et al., 2011)

Soll eine Hierarchie aufgezeigt werden, so muss betont sein, dass das Störungsmonitoring nicht primär den Fragestellungen aus Analyse und Statistik dient, sondern die Weiterentwicklung der Bahnproduktion unterstützen soll (siehe Abbildung 22, hierarchisch wichtige Punkte stehen oben). Es wäre daher nicht angemessen, Störungsmonitoring bzw. Abweichungsmanagement ausschliesslich zu Zwecken der statistischen Kennwertbildung zu betreiben, da dies etwaige Probleme im betrachteten Bahnsystem lediglich beschreiben statt lösen würde. Die Zielrichtung muss es vielmehr sein, aus erlebten Störungen des Bahnbetriebs geeignete Schlüsse für die Bahnbetriebsführung in ähnlichen Situationen zu ziehen. Damit lässt sich der Überraschungseffekt beim Auftreten von Störereignissen minimieren, wodurch die Handlungsfähigkeit maximiert wird. Bei den noch aufzuzeigenden zwei generellen Arten der Prognosebildung im Störfall im Kapitel 7 trägt dieses Störungsmonitoring zum Lernen aus Vergangenheitsdaten bei.

4.2 Analyse mittels Bottom-Up-Betrachtung

4.2.1 Analyseansatz der Bottom-Up-Betrachtung

Die Bottom-Up-Betrachtung analysiert ein Störereignis von der Störungsursache hin zur Störungswirkung. Konkret bedeutet dies eine Fokussierung auf die eher technische Ursachenseite der Ereignisse, während die Auswirkungen im Sinn von Abweichungen bzw. Verspätungen erst im Nachgang dem jeweiligen Ereignis zugeordnet werden. Eintretene Störungen werden hierzu einer Ereignisklasse zugewiesen. Diese Klasse basiert auf den Ressourcen der Bahnproduktion sowie deren Systemen, Subsystemen und Komponenten.

Bei der Bottom-Up-Betrachtung (siehe auch Kapitel 3.1.2) ist eine *eindeutige* Zuordnung der Störung zu einer Ereignisklasse notwendig, um unnötigen Interpretationsbedarf sowie Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Im Fall technischer Störereignisse ist das meist recht gut möglich. Bei rein betrieblichen Aspekten kann es – beispielsweise mit Fokus auf einen kompletten Zuglauf – zur Überlagerung mehrerer Einflüsse kommen, die dann kumulativ zu behandeln sind, aber für sich Einzelfälle im Sinne von Einzelstörungen darstellen.

Für die Störungsprognose ist die Bottom-Up-Betrachtung zentral, da die Störungsursachen im Mittelpunkt stehen und erst darauf aufbauend eine Annäherung an die erforderliche Intervention, die Störungsdauer sowie die betrieblichen Auswirkungen erfolgt. Im Folgenden ist darzulegen, nach welchen Kriterien eine Bottom-Up-Klassifizierung zu erstellen ist und wie ein derartiges Klassifizierungsschema auszusehen hat.

4.2.2 Klassifizierungsregeln der Bottom-Up-Betrachtung

Um Störereignisse einer Ereignisklasse zuordnen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit fünf Regeln zum Erstellen einer Bottom-Up-Klassifizierung von Störereignissen definiert. Die Nummerierung widerspiegelt dabei sowohl die Hierarchie als auch mit Einschränkungen die Priorisierung. Dies sind im Einzelnen:

1. Zuordnung zu einer Ressource
2. Zuordnung zu einem System
3. Zuordnung zu einem Subsystem
4. Zuordnung zu einer Komponente
5. Zuordnung einer Fehler-/Schadensart

Es ist dabei legitim, auf eine Klassifizierung der dritten oder vierten Ebene zu verzichten, wenn das die unzureichende Informationslage bzw. der sonst hohe Klassifizierungsaufwand erfordern. Als Kompensation sollten jedoch weitere Informationen in der fünften Ebene abgelegt werden.

Nun zu den einzelnen Klassifizierungsebenen: An erster Stelle der Bottom-Up-Betrachtung steht die Zuordnung der gestörten **Ressource**. Diese rekrutiert sich aus den Ressourcen der Bahnproduktion: Fahrzeug, Infrastruktur, Information, Personal, Betrieb. Dahinein zählen nicht nur beschädigte oder ausgefallene Ressourcen, sondern auch (temporär) nicht nutzbare Ressourcen, da diese Unterscheidung für die Mustererkennung im Störungsgeschehen nicht relevant wäre. Beispielsweise zählt ein Zugfolgekonflikt zur Ressource Infrastruktur, da jene dem hinteren Zug vorausliegende Infrastruktur nicht befahren werden darf. Hierbei ist unerheblich, ob in diesem Abschnitt eine technische Störung vorliegt oder schlicht eine Belegung besteht. Die Nichtnutzbarkeit ist somit hinreichend für die Klassifizierung zu einer Ressource.

Ressourcenspezifisch folgen in der zweiten Klassifizierungsebene die **Systeme**, welche relevant für die Störungsprognose sind. Auf dieser zweiten Klassifizierungsebene soll ausdrücklich noch nicht ins (technische) Detail gegangen werden. Vielmehr wird abgegrenzt, in welchen grundsätzlichen Bereichen Störungen der jeweiligen Ressourcen auftreten können, da hier bereits Störungsmuster zu erwarten sind. Für die Ressource Fahrzeug sind dies beispielsweise Energieanlagen¹⁸, Leittechnik und Mechanik.

Es kann darüber hinaus sinnvoll sein, die Systeme detailliert in **Subsysteme** aufzugliedern oder die gestörte **Komponente** zu eruieren. Hierbei ist die Frage zu klären, welchen Fokus die konkrete Datenhaltung hat. Für die operative Betriebsführung bietet sich eine derart feine Untergliederung nicht mehr an, da der Erkenntniszugewinn den Klassifizierungsaufwand nicht rechtfertigt, es sei denn, eine stark verbesserte Prognosequalität wäre zu erwarten. Wird die Datenhaltung der technischen Intervention mit jener der betrieblichen Disposition verknüpft, ist zu dokumentieren, worin genau die Störungsursache liegt. In diesem Szenario wird die Dokumentation von Subsystemen und Komponenten sinnvoll, was im Sinne des Data Warehousing zumindest in Erwägung zu ziehen ist.

Sowohl technisch als auch betrieblich ist darüber hinaus die konkrete **Fehler- bzw. Schadensart** von Interesse, da sie basierend auf dem Schadensbild bereits Hinweise auf die Störungswirkung geben kann. Dieser Art der Dokumentation ist folglich bei mässiger Datengranularität der Vorrang gegenüber der Erfassung von Subsystem und Komponenten einzuräumen.

Erfolgt die Bottom-Up-Betrachtung im Rahmen des Betriebsmonitorings, sind weitere allgemeine Informationen als Art „Ereignisstempel“ neben den Klassifizierungsdaten zu erfassen. Dazu gehören Datum und Uhrzeit des Ereignisses, Ereignisort (Strecke, Streckenkilometer, Betriebsstelle) sowie Zugnummer des betroffenen Zuges und die UIC-Fahrzeugnummer des gestörten Fahrzeuges (betrifft Ressource Fahrzeug).

¹⁸ Bei traktionslosen Schienenfahrzeugen entfällt das Traktionssystem.

4.2.3 Klassifizierungsschema der Bottom-Up-Betrachtung

Basierend auf den Klassifizierungsregeln (Kapitel 4.2.2) lässt sich nunmehr ein Klassifizierungsschema ableiten. Der Schwerpunkt bezüglich der Klassenanzahl liegt dabei auf den Ressourcen Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb. Die übrigen Klassenarten teilen sich etwa hälftig in Ereignisse der Ressourcen Information und Personal auf (siehe Tabelle 16). Die Ressourcen, Systeme und Subsysteme sind vollständig angegeben und widerspiegeln die erste bis dritte Gliederungsebene. Auf die Darstellung der Komponenten (vierte Gliederungsebene) wurde verzichtet. Diese sind für das konkrete Bahnsystem in Abhängigkeit der verwendeten Betriebsmittel systemspezifisch zu eruieren und für die Bahnbetriebsführung wenig bis nicht relevant. Auf eine allgemeine Störungskategorie wie beispielsweise „unbekannter Fehler“ wurde ebenfalls bewusst verzichtet, da derartige Klassen auch aus Gründen der Bequemlichkeit zu unscharfen Codierungen führen.

Ressource	System	Subsysteme	Beispiel
F Fahrzeug	FE Energieanlagen	FEH Hilfsbetriebe	<i>Klimaanlagenausfall</i>
		FEL Leistungsübertragung	<i>Getriebeschaden</i>
		FEP Pantograf	<i>Schleifleistenbruch</i>
		FET Traktionssystem	<i>Stromrichter-teilausfall</i>
	FL Leittechnik	FLD Datenbus	<i>Kabelbruch</i>
		FLF Fahrzeugleitgerät	<i>Zugtaufe misslingt</i>
		FLS Software	<i>Rechnerneustart erforderlich</i>
	FM Mechanik	FMB Bremssystem	<i>Bremse nicht lösbar</i>
		FMF Fahrwerk	<i>Fremdkörper im Drehgestell</i>
FMN Neigetechnik		<i>Ausfall Neigetechnik</i>	
FMT Türen		<i>Türstörung</i>	
D Information	DF Fahrdienstdaten (sicherheitsrelevant)	DFK Datenkonsistenz DFV Datenverfügbarkeit	<i>Fahrplan nicht fahrbar</i> <i>EBULA nicht lesbar</i>
	DP Fahrplandaten (Endkunde)	DPA unterperiodische Anpassung Fahrplan DPB geändertes Betriebsprogramm	<i>Pseudoverspätung ggü. Jahresfahrplan</i> <i>kurzfristiger Krisenfahrplan</i>
I Infrastruktur	IA Fahrgastanlagen	IAB Bahnsteig, Zuwegung	<i>Bahnsteigumbau</i>
	IE Bahnenergieversorgung	IEF Fahrleitung	<i>Fahrleitungsschaden</i>
		IET Tankstelle	<i>Wintereinfluss</i>
		IEU Unterwerk (inkl. Übertragungsnetz)	<i>Unterwerksausfall</i>
	IF Fahrweg (inkl. Lichtraumprofil)	IFB Gleisbelegung	<i>Zugfolgekonflikt</i>
		IFG Gleis (technisch)	<i>Schienenbruch</i>
		IFI Ingenieurbauwerke	<i>Erdbeben</i>
		IFW Weiche	<i>Ausfall Weichenantrieb</i>
IL Leit- und Sicherungstechnik	ILF Betriebsführungsinstrumente	<i>Stellwerksausfall</i>	
	ILG Gleisfreimeldung, Blockstörung	<i>Dauerbelegung</i>	
	ILS Signalisation, BÜ	<i>Lampendefekt</i>	
	ILZ Zugbeeinflussung und -kontrolle	<i>dauerhaftes Ansprechen</i>	
	P Personal	PD Dispositionspersonal	PDF Fehldisposition
PDP Personal fehlt			<i>Personalmangel</i>
PF Fahrpersonal		PFF Personalfehler	<i>Kuppelfehler</i>
		PFP Personal fehlt	<i>Personalmangel</i>
B Betrieb	BE Einbruchsverspätung	BEB Verspätung im benachbarten Bahnnetz	<i>Ereignis im Ausland</i>
		BEN Netzaufnahmefähigkeit	<i>Netzüberlastung</i>
	BF Betriebsführung (eigenes Netz)	BFE Entgleisung, Kollision	<i>Rangierunfall</i>
		BFH Halteplatz überfahren	<i>Fahrt über Haltsignal</i>
		BFV diverse Verzögerungen	<i>schleichende Verspätung</i>
	BG Endkunden - Verlader	BGA Verzögerung bei Abfertigung	<i>Unterwegsbehandlung</i>
		BGL Verzögerung bei Ladevorgang	<i>Ladeverzögerung</i>
	BP Endkunden - Fahrgäste	BPA Anschlussgewährung	<i>letzte Verbindung am Tag</i>
BPF Fahrgastwechsel		<i>Reisegruppe</i>	

Tabelle 16: Klassifizierungsschema der Bottom-Up-Betrachtung (eigene Darstellung)

Im vorangegangenen Kapitel 4.2.2 wurde bereits auf die Rolle der fünften Gliederungsebene „Fehler-/Schadensart“ hingewiesen, welche die Ebene Subsystem und/oder Komponente substituieren kann. Die Fehlerart kann dabei gemäss ABC-Analyse (siehe Kapitel 3.4.1) wie folgt klassifiziert werden:

- Störung einer redundanten Ressourcenkomponente (nicht betriebsrelevant)
- verminderte Funktionalitäten der Ressource (betriebsrelevant)
- keine Einsatzfähigkeit der Ressource (höchst betriebsrelevant)

Bei der Schadensart sind mit steigendem Betriebseinfluss zu klassifizieren:

- flüchtiger Fehler (nicht betriebsrelevant)
- singulärer Fehler (betriebsrelevant)
- schleichender Fehler (betriebsrelevant)

Die Klassifizierung nach Betriebseinfluss im Zuge dieser Arbeit folgt der Tatsache, dass einige kleinere Fehler über Toleranzen innerhalb der Bahnproduktion kompensiert werden und insofern nicht betriebsrelevant sind. Beispiel für einen derartig flüchtigen Fehler ist das einmalige kurzzeitige Überschreiten der Haltezeit an einer Unterwegsstation, was über die Fahrzeitreserve abgefangen werden kann. Singuläre Fehler, die nicht flüchtig sind, können entsprechend nicht kompensiert werden. Dazu gehören Triebfahrzeugstörungen, die zwar durch ein wiederholtes Aufrüsten zu beheben sind, dadurch aber Verspätung verursachen und Betriebsrelevanz besitzen. Im Gegensatz dazu kann derselbe Defekt während der Wendezeit möglicherweise kompensiert werden und aus dem sonst singulären Fehler verbleibt ein flüchtiger Fehler. Schleichende Fehler sind, sobald sie die Reserven innerhalb des Betriebsprogramms überschreiten, stets betriebsrelevant und zwar während der gesamten (verbleibenden) kommerziellen Fahrt. Dazu zählt die Fahrt mit aus technischen Gründen reduzierter Geschwindigkeit.

In der praktischen Bahnbetriebsführung bestehen teilweise eingeführte Datenerfassungssysteme, welche nicht spontan adaptiert werden können. In diesen Fällen empfiehlt es sich, die bestehenden Störungscode in das Bottom-Up-Schema auf Hierarchiestufe 1 und 2 (siehe Kapitel 4.2.2) einzupflegen und somit zu „übersetzen“. Beispielsweise entspricht die „Verspätung durch übergebende EVU“ (ErZu 45) der SBB exakt der Ressource Betrieb, System Einbruchsverspätung, Subsystem Verspätung in benachbartem Bahnnetz, singulärer Fehler innerhalb des Bottom-Up-Betrachtung.

Für die Störungsprognose ist die Bottom-Up-Betrachtung wegen ihrer Ursachenzentrierung von besonderer Relevanz. Mögliche Herausforderungen bestehen aber in der Unvollständigkeit der Datenbanken oder fehlenden Detailinformationen am Störungsanfang, welche erst im Laufe des Ereignisses konkretisiert werden können. Nur mit tiefgründiger Codierung – dies entspricht einer detaillierten Störungsdiagnose – gelingt eine zuverlässige Störungsprognose.

4.3 Analyse mittels Top-Down-Betrachtung

4.3.1 Analyseansatz der Top-Down-Betrachtung

Die Top-Down-Betrachtung (siehe auch Kapitel 3.1.3) untersucht die betrieblichen Auswirkungen im Sinn der zeitlichen Wirkung von Bahnstörungen. Insofern entspricht die Top-Down-Betrachtung der Wahrnehmung des Endkunden, also des Fahrgasts bzw. Verladers. Für beide ist eine Abweichung vom geplanten Betrieb zwar unangenehm und bisweilen ärgerlich, aber die kausalen Zusammenhänge dahinter interessieren allenfalls am Rand. Die im Störfall eingesetzte ausserplanmässige Ressource ist demnach die Zeit des Endkunden. Die betriebliche und technische Ursachenanalyse tritt in den Hintergrund und ist somit nicht Gegenstand dieser Betrachtungsweise. Dahingegen werden sich die zeitlichen Störungsfolgen klassifiziert und quantifiziert.

Im betriebstechnologischen Kontext genügt der Zeitbetrag eines Ereignisses allein bzw. dessen Monetarisierung nicht. Eine Verzögerung von beispielhaft 10 Minuten zieht in einem dicht befahrenen S-Bahn-Netz andere betriebliche Folgen nach sich als im ländlichen Regionalverkehr mit Ein- oder Zweistundentakt. Bei fixen zeitlichen Eckpunkten (Termine) des Endkunden entstehen im Fall grösserer Taktfolgen tendenziell grössere Übergangszeiten zwischen der Ankunft am Bestimmungsort und dem Terminbeginn, was indirekt eine grosszügigere Toleranz gegenüber Abweichungen in der Bahnproduktion zur Folge hat. Dass der Endkunde die gleiche Verzögerung im unterschiedlichen Betriebskontext verschieden wahrnimmt, ist daher zu postulieren.

Als Konsequenz folgt daraus, dass die regelmässige Zeitdauer zwischen zwei Zugfahrten (Takt) einen Einfluss auf die Klassifizierungsregeln der Top-Down-Betrachtung (siehe Kapitel 4.3.2) haben sollte. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Klassifizierungsrelevanz auf der diskretisierten Minutenebene liegt und nicht zielführend auf Sekunden- oder 10-Sekunden-Schritte auszudehnen ist. Im Unterschied zur Störungsklassifizierung kann dies für das Monitoring der Betriebsführung sinnvoll sein und wird beispielsweise beim RBL (Rechnergestütztes Betriebsleitsystem) von Stadtbahnen teilweise auch in 10-Sekunden-Schritten gehandhabt. Auf der anderen Seite genügt für die Top-Down-Betrachtung die Abweichungsbetrachtung auf Stunden- oder Viertelstundenebene wegen der zu groben Auflösung der Felddaten ebenfalls nicht. Im Folgenden ist aufzuzeigen, wie auf Minutengranularität und abhängig vom Betriebsprogramm (Streckentakt) im Sinne der Top-Down-Klassifizierung Klassengrenzen gesetzt werden sollten.

4.3.2 Klassifizierungsregeln der Top-Down-Betrachtung

Analog zur Bottom-Up-Betrachtung lassen sich für die Top-Down-Betrachtung Regeln der Klassifizierung von Störereignissen aufstellen. Diese werden für die eindeutige Klassifizierung von Störereignissen benötigt und basieren auf dem Unterschied der realen Weg-Zeit-Linie gegenüber der im Fahrplan vorgesehenen Fahrlage. Dazu sind wiederum Intervallgrenzen zwischen den

einzelnen Störungsklassen abzuleiten. Die Top-Down-Betrachtung wird insbesondere für die Analyse der Knotenpünktlichkeit (vgl. Kapitel 3.2.3 bzw. 5.2) und für die Kalibrierung der Prognosegenauigkeit (siehe Kapitel 7.2.3) verwendet. Folgende Klassifizierungsregeln wurden aufgestellt:

1. Diskretisierung der Abweichung auf Zeigersprung
2. Pünktlichkeitsgrenze bahnsystemabhängig übernehmen (Normen/Richtlinien)
3. viertelste, halbe, ganze, doppelte Taktzeit als nächsthöhere Intervallgrenzen
4. Klassengrenze nach Regel 2 und 3 mit jeweils rund doppeltem Betrag
5. bei Taktfolge < 15 Minuten Klassifizierung von 10-min-Takt verwenden
6. bei Taktfolge > 60 Minuten Klassifizierung von 60-min-Takt verwenden

Den Ausgangspunkt der Top-Down-Klassifizierung bildet die Fahrplanabweichung, welche im Kontext der Störungsprognose in ganzen Minuten angegeben wird und dazu entsprechend zu runden ist (siehe Kapitel 3.2.3). Bei dieser **Diskretisierung** werden die Sekunden quasi abgeschnitten, was bei Verzögerung einem Abrunden und bei Verfrühung einem Aufrunden auf ganze Minuten entspricht.

Die erste Klassengrenze ist nun die **Pünktlichkeitsgrenze** im jeweiligen Bahnsystem. Da Abweichungen von der geplanten Bahnproduktion unterhalb dieses Grenzwertes als pünktlich gelten, ergo unkritisch sind, hat es wenig Mehrwert, diese Fälle in weitere Cluster zu unterteilen. Zudem kann nicht sichergestellt werden, dass die entsprechenden Daten unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze in den Datenbanken der Bahnbetreiber vollständig hinterlegt sind. Ein einheitliches Verspätungskriterium, beispielsweise in Anlehnung an (UIC 450-2, 2009), wäre mit Sicherheit hilfreich, ist aber mittelfristig und systemübergreifend kaum einföhrbar.

Die mit aufsteigender Abweichung nächsten Klassengrenzen ergeben sich aus der viertelsten, halben, ganzen und doppelten **Taktzeit**. Massgebend ist hierbei der Streckentakt, der durchaus in Überlagerung mehrerer in grösseren Takten verkehrenden Linien entstehen kann. Die resultierende Klassenvergrösserung bei grösseren Abweichungen nutzt den Umstand der quasi exponential verteilten (betrieblichen) Störungsdauer, wonach viele kleine gegenüber wenigen grossen Abweichungen dominieren (siehe auch Kapitel 3.3.2).

Nun ist allerdings zu beachten, dass bei gewissen Taktfamilien die viertelste Taktzeit nur knapp über der Pünktlichkeitsgrenze liegt und folglich eine sehr schmale Klassenbreite resultieren würde. Dies trifft beispielhaft auf den 10-Minuten-Takt mit Pünktlichkeitsgrenze 2 Minuten (Zeigersprung!) zu, wo die resultierende Klasse der viertelsten Taktzeit 3:00 ... 3:59 Minuten umfassen würde. Wegen der zu schmalen Klassenbreite entfällt die viertelste Taktzeit bei allen Taktarten unter 15 Minuten.

Um bei **Taktvariationen** im dichten Verkehr nicht fortlaufend heterogene Klassifizierungsschemata zu generieren, wird bei allen Taktarten unterhalb des Viertelstundentakts die Top-Down-Klassifizierung verwendet. Dies entspricht in guter Näherung dem Agglomerationsverkehr. Bei grossen Takten oberhalb des Stundentakts wird die Klassifizierung des 60-Minuten-Takts weiter-

verwendet, da sonst zu breite Klassen entstehen. Dies entspricht dem Anwendungsfall des Regionalverkehrs.

Bei Verfrühung sind die Klassengrenzen der Verzögerung symmetrisch fortzusetzen. Um bei stark schwankenden Takten über den Tag eine Vergleichbarkeit zu behalten und Übersichtlichkeit zu erzielen, empfiehlt es sich, das Klassifizierungsschema des dichtesten Taktes ganztägig anzuwenden (z. B. bei 10-Minuten-Takt im Berufsverkehr und 30-Minuten-Takt in der Schwachverkehrszeit das Klassifizierungsschema des 10-Minuten-Takts).

4.3.3 Klassifizierungsschema der Top-Down-Betrachtung

Da die Top-Down-Betrachtung auf die Wirkungsseite der Störung fokussiert, ist sie eher für die Klassifizierung betrieblicher Störungen zu verwenden. Auf Grund der einheitlichen Klassifizierung bei kleinen und recht grossen Takten, ergeben sich drei Bereiche mit charakteristischen Bahnanwendungen:

- < 15-Minuten-Takt Klassifizierung 10-min-Takt (Agglomerationsverkehr)
- 15 ... 60-Minuten-Takt Klassifizierung taktabhängig (Vollbahnverkehr)
- > 60-Minuten-Takt Klassifizierung 60-min-Takt (Regionalverkehr)

Somit lässt sich für jede Takt- und Betriebsart basierend auf den Klassifizierungsregeln (siehe auch Kapitel 4.3.2) eine Top-Down-Klassifizierung ableiten. Für gebräuchliche Taktarten ist dies im Folgenden angegeben (Tabelle 17). Für andere Takte sind die Klassifizierungsregeln zur Ermittlung der Klassengrenzen zu nutzen.

Cluster \ Art	Regionalverkehr		Vollbahnverkehr			Agglomerationsverkehr		
	120	90	60	30	15	12	10	5
T1 (> doppelte Taktzeit)	> 121:00	> 121:00	> 121:00	> 61:00	> 31:00	> 21:00	> 21:00	> 21:00
T2 (doppelte Taktzeit)	61:00 - 120:59	61:00 - 120:59	61:00 - 120:59	31:00 - 60:59	16:00 - 30:59	11:00 - 20:59	11:00 - 20:59	11:00 - 20:59
T3 (ganze Taktzeit)	31:00 - 60:69	31:00 - 60:69	31:00 - 60:69	16:00 - 30:59	9:00 - 15:59	6:00 - 10:59	6:00 - 10:59	6:00 - 10:59
T4 (halbe Taktzeit)	16:00 - 30:59	16:00 - 30:59	16:00 - 30:59	9:00 - 15:59	5:00 - 8:59	3:00 - 5:59	3:00 - 5:59	3:00 - 5:59
T5 (viertelste Taktzeit)	6:00 - 15:59	6:00 - 15:59	6:00 - 15:59	3:00 - 8:59	3:00 - 4:59			
T6 (Pünktlichkeitsgrenze*)	0:00 - 5:59	0:00 - 5:59	0:00 - 5:59	0:00 - 2:59	0:00 - 2:59	0:00 - 2:59	0:00 - 2:59	0:00 - 2:59

* Pünktlichkeitsgrenze beispielhaft

Tabelle 17: Klassifizierungsschema der Top-Down-Betrachtung (eigene Darstellung)

Die moderne Bahnproduktion setzt auf regelmässige Zwischenzugzeiten (Takten), welche ein Klassifizierungsmerkmal der hier vorgestellten Top-Down-Betrachtung darstellen. Vereinzelt bestehen jedoch Bahnanwendungen, bei denen diese Gesetzmässigkeit nicht vorhanden ist. In derartigen Fällen ist die mittlere fahrplanmässige Zugfolgezeit der Strecke zu ermitteln (mittlerer Streckentakt) und basierend darauf das Klassifizierungsschema anzuwenden. Daher ist beispielsweise der 28-32-Minuten-Takt analog zum reinen Halbstundentakt zu analysieren.

5 Analysen von Störungsdaten

5.1 Distance zur Eruiierung relevanter Ereignisklassen

5.1.1 Analyse des Störungseintritts als Risiko

Dieses Kapitel befasst sich mit den Analysen der Störungsdaten aus den Fallstudien gemäss der Klassifizierung der Störungsarten im vorigen Kapitel. Dazu wird in Kapitel 5.1 eine Methodik zur Ermittlung kritischer Störereignisse aus Datenbanken vorgestellt, welche in Kapitel 5.2 auf die Fallstudien angewendet wird. Für die relevanten Ereignisklassen zeigt schliesslich Kapitel 5.3 die Auswahl von Quantilen für die Störungsprognose im weiteren Verlauf dieser Arbeit. Somit können gleichwohl relevante Störereignisklassen eruiert als auch im Sinne der Forschungsfragen analysiert werden. Kapitel 5.3 bietet darauf aufbauend eine weitere Vorstufe zum Prognoseprozess.

Im Interesse der wissenschaftlichen Analyse von technischen oder betrieblichen Störereignissen der Bahnproduktion bietet sich eine abstrakte Betrachtung der Thematik an. Hierbei interessiert der einzelne Störungsfall nur im Hintergrund, es stehen vielmehr generelle Zusammenhänge und Ereignismuster im Fokus der Betrachtung. In diesem Kontext stellen Bahnbetriebsstörungen ein Risiko dar, welches mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit auftreten *kann*. Es bietet sich daher eine Analyse im Sinne von (CENELEC, 2012) nach Häufigkeit und Ausmass an, welche für die Störungsforschung aufgegriffen und weiterentwickelt wird.

Ausgangspunkt dieser Analyse bilden klassifizierte Störereignisse, die im Sinne der Bottom-Up-Betrachtung kategorisiert sind. Innerhalb dieser Störungsklassen gibt es Ereignisse, welche fortfolgend als kritisch interpretiert werden, da sie vergleichsweise oft und mit grosser Störungsdauer auftreten. Für die Kritikalität sind im Verständnis von EN 50126 zwei Aspekte relevant:

- Störungen mit grosser **Häufigkeit**
- Störungen mit grossem **Ausmass**

In diesem Zusammenhang wird die Häufigkeit auf den Eintritt des Störereignisses bezogen, das Ausmass entspricht der Störungsdauer. Dabei sind sowohl technische als auch betriebliche Störungen analysierbar. Bei betrieblichen Ereignissen ist als Bezugspunkt sowohl die primäre Abweichung als auch die Gesamtabweichung geeignet, jedoch immer konsistent anzuwenden. Ein Rückschluss von betrieblichen auf rein technische Aspekte ist nur bedingt möglich. Eine An-

näherung kann die Primärverspätung liefern, da sie bei Fahrzeug- und teilweise auch bei Infrastrukturereignissen einen direkten Rückschluss von der technischen Nichtverfügbarkeit auf die betriebshemmenden Zustände bewirkt. Sollte ein Rückschluss von betrieblichen auf technische Störungen und ihre Dauer beabsichtigt werden, ist folglich die Primärabweichung zu bevorzugen. Teilweise erlaubt die Datenlage allerdings ausschliesslich die Auswertung einzelner abweichender Fahrplanlagen, ohne jeweilige Zuordnung zu einem mehrere Fahrplanabweichungen auslösenden Störfall.

5.1.2 Begriff der (Disturbance) Distance

Die Kritikalität einer Störereignisklasse wird mithilfe der nun vorzustellenden Distance ermittelt. Sie ist eine eindimensionale Abbildung der Parameter Störungshäufigkeit sowie Störungsausmass in einer Zahl oder zunächst zweidimensional in einem Diagramm. Kritisch sind in diesem Sinn extrem häufige Störungen mit extrem grossem Ausmass (Schranil, et al., 2011). Für Aussagen über die Kritikalität einer Ereignisklasse sind beide Aspekte von Interesse. Kriterium für die Häufigkeit sind die eröffneten Meldungen in der jeweiligen Störungsklasse (z. B. ein Code einer Ereignisdatenbank). Für das Ausmass sind die aufgetretene Verspätung bzw. die jeweilige technische Störungsdauer relevant. Es gilt hierbei, kritische Ereignisklassen herauszufiltern. Häufige Störungen mit grossem Ausmass sind dabei zweifelsfrei kritisch. Aber auch Ereignisse mit grosser Häufigkeit (z. B. Einbruchsverspätungen aus anderem Bahnnetz) *oder* grossem Ausmass (z. B. Entgleisung in Bahnhofszufahrt) sind kritisch und daher ab einer Betrachtungsgrenze zu thematisieren. Aus diesen Überlegungen ist nun eine zweidimensionale grafische Darstellung ableitbar:

- Abszisse: relative Häufigkeit der Fälle einer Störungsklasse
- Ordinate: relativer Anteil der Verspätungen einer Störungsklasse

Diese Darstellungsform ist sowohl für die kausale Störungsklasse der Bottom-Up-Betrachtung (siehe Kapitel 3.1.2) als auch für Zuggattungen, Zugnummern oder Betriebsstellen gangbar und daher methodisch zentral für die Störungsdatenanalysen. Der Abstand der jeweils abgetragenen Störungsklasse vom Koordinatenursprung wird dabei als (Disturbance) „Distance“ bezeichnet. Er bietet einerseits eine Einordnung von Ereignisklassen hinsichtlich Häufigkeit und Ausmass und andererseits den Ansatz zur Ermittlung der Kritikalität von Störereignisklassen. Ereignisklassen unterhalb einer Betrachtungsgrenze können als unkritisch identifiziert werden. Die Einführung von mehreren Distancegrenzen, beispielweise 5 % Betrachtungsgrenze sowie 10 %, 15 % und 20 % als weitere Betrachtungsgrenzen, ermöglicht eine Sortierung der Störereignisse in Schwereklassen. Die Besonderheit dieses Ansatzes liegt in der Einführung ellipsenförmiger Klassengrenzen für die Störungsschwere. Hierdurch werden ebenfalls Störereignisklassen aufgezeigt, welche nur in Häufigkeit *oder* Ausmass auffällig sind.

An einem SBB-Beispiel soll dies nun exemplarisch gezeigt werden. In den 2011er ErZu-Daten in Abbildung 23 dominiert die bereits nicht mehr dargestellte Ereignisklasse „Verspätung durch übergebende EVU“ mit einer relativen Häufigkeit von 25.00 % und einem Ausmass der Primärverspätungen von 49.62 % (Totalverspätungen: 33.06 %). Dahinter folgen mit absteigendem Abstand („Distance“) vom Koordinatenursprung „Triebfahrzeugstörung“, „Einsatz Rollmaterial“ und „Lokpersonal“. Die jeweils ellipsenförmig eingezeichneten Ablesehilfen (unterste Linie ist dabei Betrachtungsgrenze) entsprechen Isodistanzen bezüglich des Koordinatenursprungs und daher Isolinien der Störungskritikalität bezüglich Störungshäufigkeit und -ausmass. In Abbildung 23 und den weiteren Fallstudienresultaten sind die zugehörigen Ressourcen einheitlich farbcodiert:

- rot: Ressource Fahrzeug
- gelb: Ressource Infrastruktur
- grün: Ressource Information
- braun: Ressource Personal
- blau: Ressource Betrieb
- schwarz: Ereignisse unterhalb der Betrachtungsgrenze

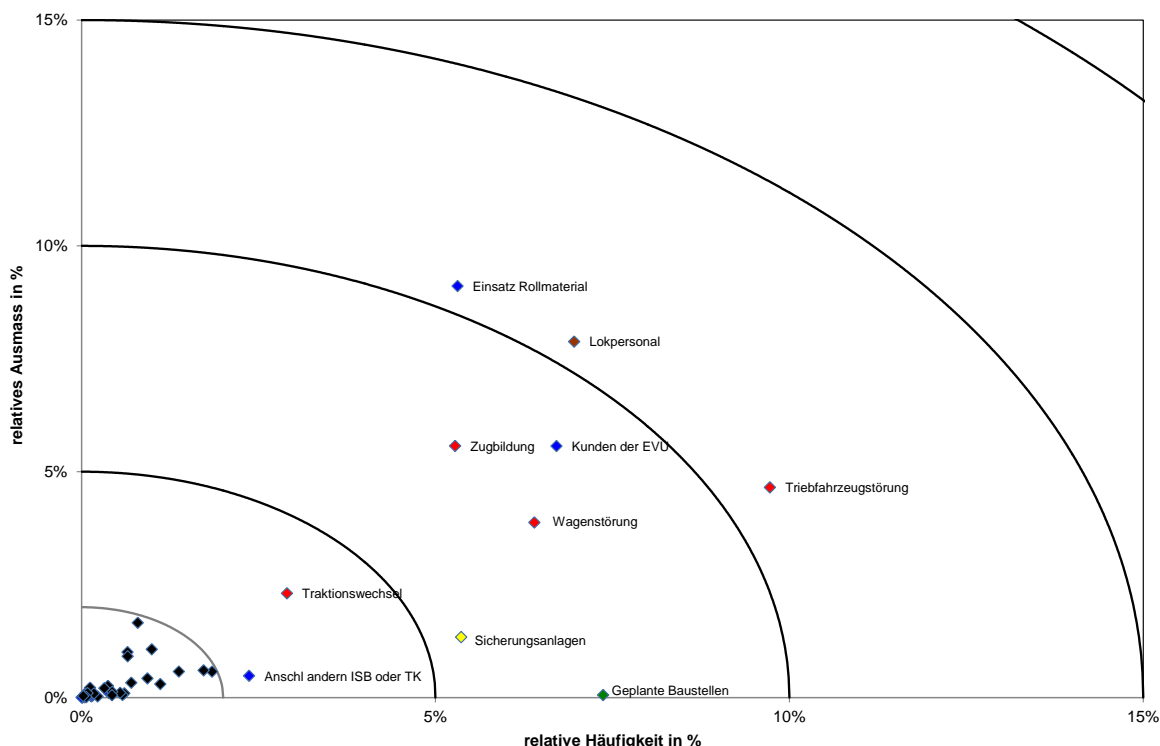


Abbildung 23: Distance Gesamtverkehr der SBB (2011, $\epsilon = 0.02$, eigene Darstellung, geschnittene Achsen)

In Diagrammen analog zu Abbildung 23 können vom Koordinatenursprung startend drei generelle Sektoren beschrieben werden: nahe der Ordinate, nahe der Hauptdiagonale und nahe der Abszisse. Ereignisklassen, welche nahe der Ordinate liegen, fallen durch geringe Häufigkeit, aber grosses Störungsausmass auf. Dies sind beispielsweise grössere Infrastrukturstörungen (z. B. Erdbeben). Entlang der Hauptdiagonale sind hinsichtlich Häufigkeit und Ausmass gleich kritische Ereignisse zu finden. Dies sind bevorzugt Fahrzeugstörungen. Ereignisse mit gegenüber dem

Ausmass überproportionaler Häufigkeit finden sich nahe der Abszisse wieder, beispielsweise sind dies Ereignisse der Ressourcen Information und rein prozessuale Betriebsaspekte. Eine scharfe Grenze der Sektoren ist auch basierend auf den Ausnahmen kaum zu identifizieren.

Ein direkter Zahlenvergleich zwischen verschiedenen Fallstudien ist jedoch problematisch, da die Grundgesamtheiten der Anteile von Häufigkeit und Ausmass der jeweiligen Störungserfassungen nicht identisch sind. Häufigkeit und Ausmass von Abweichungen werden bisher zur Ermittlung der Distance gleichberechtigt behandelt. Zur Bewertung der Kritikalität einer Störereignisklasse als Disjunktion von Häufigkeit und Ausmass entspricht damit eine relative Häufigkeit von 10 % (Beispiel) äquivalent einem Abweichungsanteil von 10 % (Beispiel). Eine Wichtung der Parameter Häufigkeit und Ausmass wäre problemlos implementierbar.

5.1.3 Eindimensionales Ranking der Störungsschwere (Kritikalität)

Die grafische Darstellung der Distance gibt einen Überblick über die Kritikalität diverser Störungsklassen. Daraus leitet sich die Absicht ab, die Distance als Verknüpfung der Parameter Häufigkeit und Ausmass auch direkt rechnerisch darzustellen. Diese Berechnung beruht auf der Abstandsberechnung des jeweiligen Datenpunktes vom Koordinatenursprung und liefert als Betrag eine eindimensionale Abbildung der Störungsschwere, basierend auf Häufigkeit und Ausmass.

Da beide Parameter einzeln oder auch gemeinsam die Distance beeinflussen können, entsteht eine Oder-Verknüpfung der Kriterien Störungsausmass und Störungshäufigkeit. Daraufhin fallen in Häufigkeit *oder* Ausmass relevante Ereignisklassen gleichermassen auf. Für die Berechnung der Distance klassifizierter Störereignisse gilt demnach:

$$d = \sqrt{\left(\frac{n}{N}\right)^2 + \left(\frac{v}{\sum V}\right)^2} \geq \varepsilon \quad (17)$$

mit	d	Distance	in %
	n	Anzahl klassifizierter Störungswerte	-
	N	Grundgesamtheit der Störungswerte	-
	v	Verspätungsminuten der Störungswerte	in min
	V	Grundgesamtheit der Verspätungsminuten	in min
	ε	Betrachtungsgrenze des Störungsausmasses	in %

Auf Grund dieser Berechnungsmethode ist die Summe aller Distancewerte nicht 100 %. Sollte dies beabsichtigt sein, wäre eine Normierung vorzunehmen. Die Betrachtungsgrenze ε sollte stets über der theoretisch mittleren Anzahl der Störungen je Störungsklassen liegen (Anzahl Störungsfälle bezogen auf Anzahl Störungsklassen entspricht Mittelwert), um unterdurchschnittlich vertretene Klassen von vornherein herauszufiltern.

Des Weiteren ermöglicht die rechnerisch ermittelte Distance ein Ranking verschiedenen Störungsklassen. Dieses kann wiederum Verwendung finden, um vorhandene Störungsklassen nach

Störungsschwere („Kritikalität“) zu ordnen und aufzuzeigen, welche Arten von Ereignissen für weitere Analysen betrachtungsrelevant sind. Tabelle 18 zeigt dies erneut exemplarisch an den ErZu-Daten der SBB aus dem Jahr 2011.

ErZu-Code	ErZu-Beschreibung	Ressource	Häufigkeit	Ausmass primär	Ausmass total	Distance
45	Versp durch übergebende EVU	Betrieb	25.00%	49.62%	33.06%	55.56%
12	Triebfahrzeugstörung	Fahrzeug	9.73%	4.65%	7.88%	10.78%
2	Einsatz Rollmaterial	Betrieb	5.31%	9.11%	6.01%	10.55%
1	Lokpersonal	Personal	6.96%	7.88%	5.70%	10.51%
41	Kunden der EVU	Betrieb	6.71%	5.57%	4.65%	8.72%
4	Zugbildung	Fahrzeug	5.28%	5.57%	4.36%	7.67%
13	Wagenstörung	Fahrzeug	6.40%	3.88%	4.65%	7.48%
88	Geplante Baustellen	Information	7.37%	0.06%	8.74%	7.37%
61	Sicherungsanlagen	Infrastruktur	5.36%	1.34%	4.22%	5.53%
3	Traktionswechsel	Fahrzeug	2.90%	2.31%	1.66%	3.71%
47	Anschl andern ISB oder TK	Betrieb	2.37%	0.48%	0.62%	2.42%
40	Versp ab anderen ISB (Inland)	Betrieb	1.84%	0.57%	1.21%	1.93%
5	Unreg. am Wagen / Ladegut	Fahrzeug	0.79%	1.65%	1.36%	1.84%
89	Übriges Externes/Verschiedenes	Betrieb	1.72%	0.60%	2.23%	1.83%
49	Übrige Versp. Betrieb EVU	Betrieb	1.37%	0.58%	0.66%	1.49%
34	Spezielle Kundenmassnahmen EVU	Betrieb	0.99%	1.07%	0.83%	1.46%
59	Übriges BF	Betrieb	0.65%	1.01%	0.69%	1.20%
51	Disposition	Information	1.11%	0.30%	0.53%	1.15%
46	Annahme and. ISB	Betrieb	0.65%	0.91%	1.62%	1.12%
42	Blaulichtorganisationen / Zoll	Betrieb	0.93%	0.42%	0.45%	1.02%

Tabelle 18: ErZu-Codes der SBB geordnet nach Distance (2011, $\epsilon = 1.00\%$ Distance, eigene Darstellung)

In Tabelle 18 entspricht „Ausmass primär“ dem Ranking entsprechend der Primärverspätung und „Ausmass total“ dem Ranking gemäss der Totalverspätung. In beiden betrieblichen Lesarten dominiert die „Verspätung durch übergebende EVU“ das Abweichungsgeschehen.

Die konkrete Grösse der Distance leitet sich somit aus der Häufigkeit von Ereignissen einer Störungsklasse und den Auswirkungen auf das Betriebsprogramm (betrieblich) oder – je nach Analysefokus – dem Anteil an Gesamtstörungen (technisch) ab.

5.2 Fallstudienenergebnisse

5.2.1 Ergebnisse der Fallstudien zur Knotenpünktlichkeit

Störungen im Bahnnetz beeinflussen die netzweite Pünktlichkeitssituation. Dies zeigt sich auch in den Knotenpunkten. Bei der Darstellung der Fallstudienenergebnisse wird daher zunächst auf jene in Top-Down-Betrachtung entstandene Knotenpünktlichkeit eingegangen, danach folgen die in Bottom-Up-Betrachtung erstellten Fallstudien mit den Forschungspartnern. Die Darstellung der Fallstudienenergebnisse folgt der methodischen Logik jener in Kapitel 3.2 vorgestellten Fallstudien. Dadurch wird ein überwiegend statistisches Abbild des realen Störungsgeschehens geschaffen.

Die Messung der Knotenpünktlichkeiten folgte jeweils in Minutengranularität mit dem Kriterium des Zeigersprungs. Bei den automatisch generierten Daten der Betreiber entfällt dieser Schritt. In beiden Fällen wurden die Felddaten nun abgefragt, wie oft welcher (ganzzahlige) Abweichungswert aufgetreten ist. Dies erfolgt bezogen auf die Grundgesamtheit der Stichprobe. Daraus entsteht die (relative) Dichtefunktion (siehe Kapitel 3.3.1) für die jeweilige Stichprobe am jeweiligen Betriebspunkt. Durch Addition dieser Anteile entsteht die Verteilfunktion. Gemäss der Top-Down-Klassifizierung (siehe Kapitel 4.3.2) können Klassen abgeleitet werden; die Einteilung dieser Klassen hängt von der Pünktlichkeitsgrenze im Bahnsystem und dem Streckentakt ab. Für die im Rahmen der Arbeit als Felddaten manuell durch Messung an ausgewählten Tagen erhobenen Fallstudien werden nachfolgend die zugehörigen Diagramme gezeigt. Weitere Aussagen zur Anlage der Fallstudien finden sich im Methodikteil unter Kapitel 3.2.3.

Zürich HB (Messung)

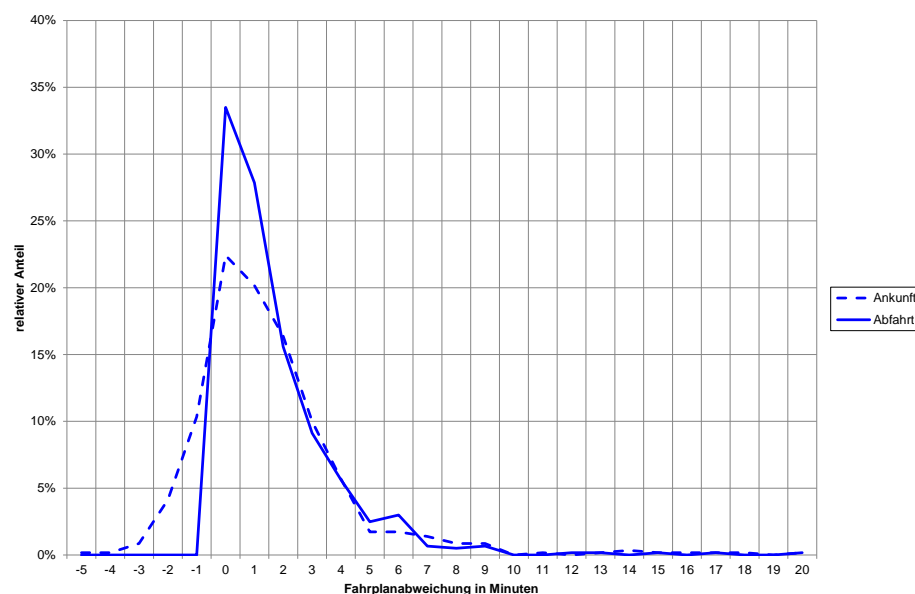


Abbildung 24: Dichtefunktion der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)

Bei den Messungen und den automatischen Felddaten aus der SBB-Bahnproduktion zeigt sich eine eher geringe Spannweite innerhalb der Mehrzahl der Abweichungen. Die im Fahrplan vorge-

sehene minutengenaue Fahrplanlage wird insbesondere innerhalb der Hauptverkehrszeit (Messung monatlich im 8-Uhr-Knoten ca. 07:45 – 08:15 Uhr, Felddaten ganztägig) seltener erreicht. Demnach dominiert die hohe Präzision der Bahnproduktion Schweiz die Daten.

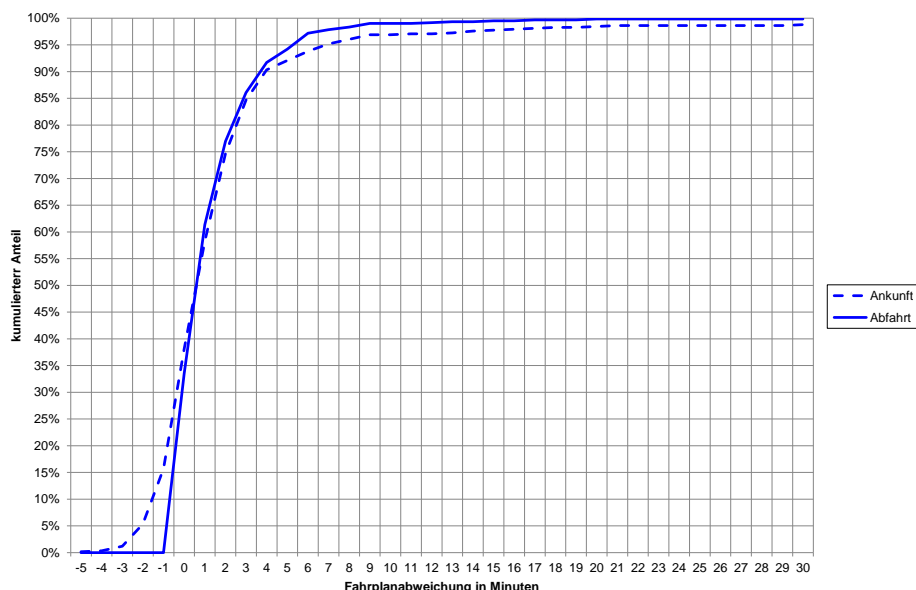


Abbildung 25: Verteilfunktion der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)

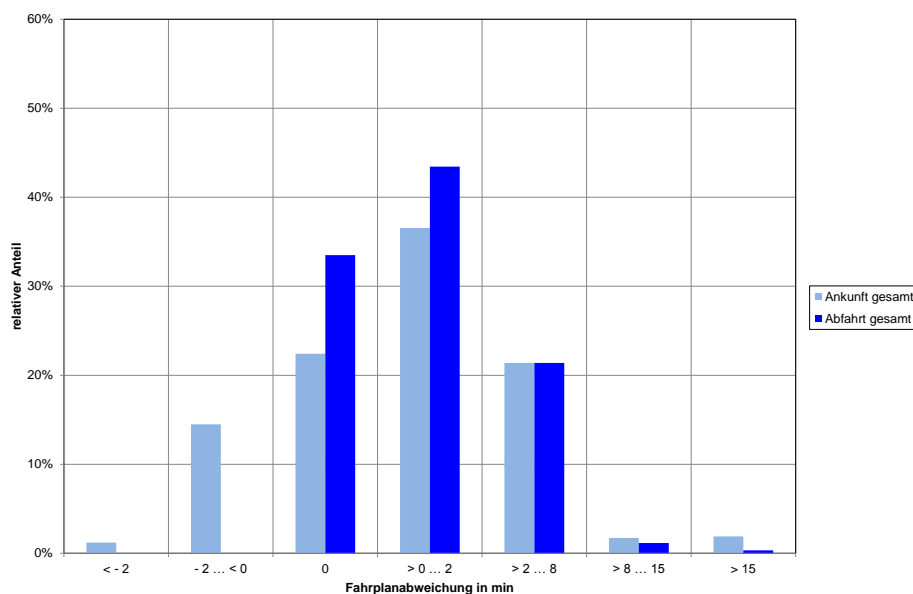


Abbildung 26: Top-Down-Klassen der Messungen in Zürich HB (10/2010 – 04/2013, eigene Messung)

Bei den automatischen Erfassungen der SBB (siehe auch Anhang 5) zeigen sich einige verfrühte Abfahrten. Zum Teil folgen diese einzig aus der Erfassungsmethodik: Vom Zeitpunkt des Haltfalls am Ausfahrtssignal wird die mutmassliche Abfahrt am Halteplatz des Zuges zurückgerechnet. Hat ein ausfahrender Zug nun stärker beschleunigt als im Modell hinterlegt, entsteht eine (scheinbar) verfrühte Abfahrt in der Datenbank. Dieser Effekt tritt bei allen derartig konzipierten Erfassungen auf und begründet die eigenen Messungen am Bahnsteig im Rahmen dieser Arbeit, auch wenn dort die Stichprobengrösse deutlich kleiner ist als bei den automatischen Erfassungen.

Dresden Hbf

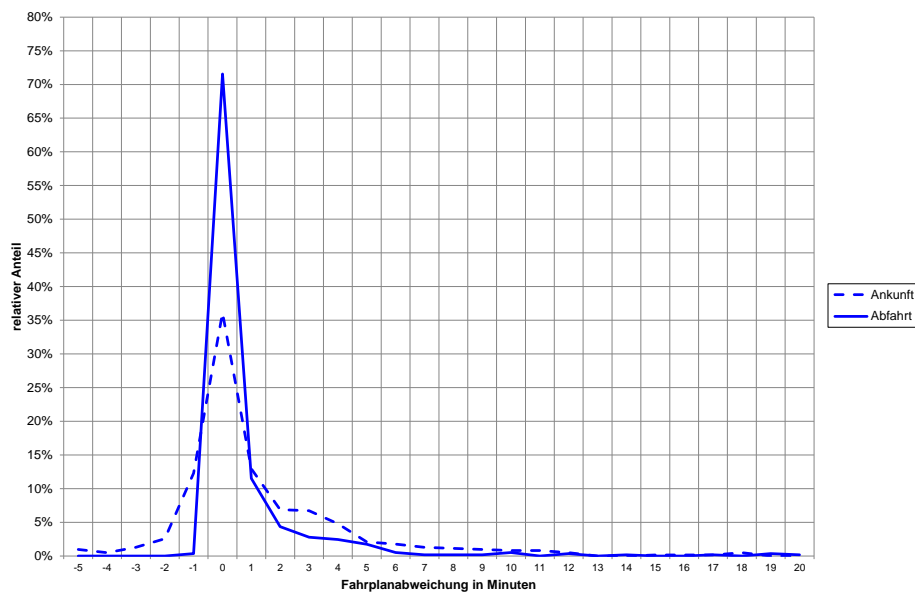


Abbildung 27: Dichtefunktion der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)

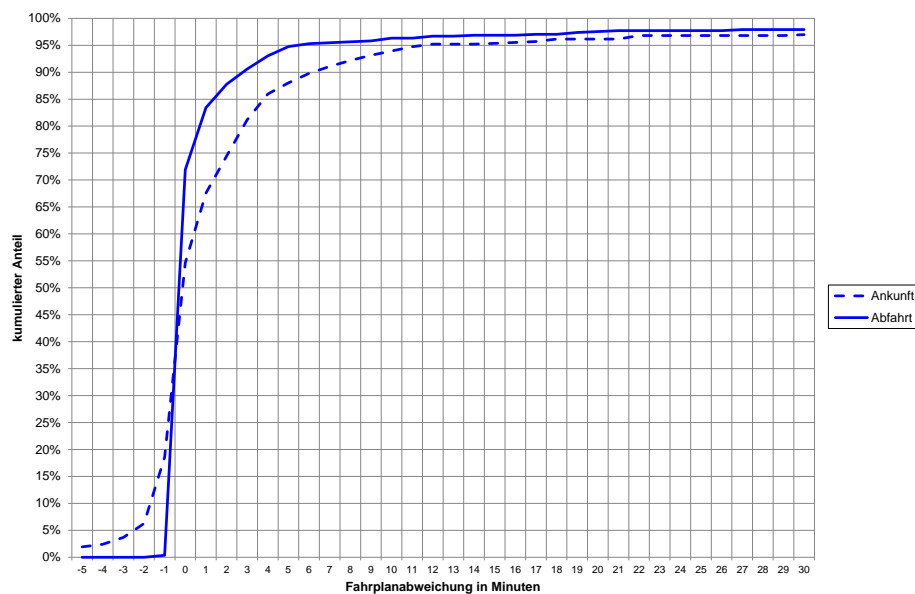


Abbildung 28: Verteilfunktion der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)

Die Auswertungen für Dresden Hbf (siehe Abbildung 27 / Abbildung 28 / Abbildung 29) zeigen eine Vielzahl von abfahrenden Zugfahrten innerhalb der regulären Fahrplanminute. Dies wird vom dort beginnenden Regionalverkehr ausgelöst. Die gegenüber den SBB weitere Fassung der Pünktlichkeit (5:59 min statt 2:59 min) trägt dazu bei, dass Verspätungen recht selten auftreten. Einige Ausreißer vom Fernverkehr (inklusive internationale Nachtzüge) und Witterungseinflüsse aus dem Winter 2010/2011 verbreitern den Zeitbereich der Ankünfte/Abfahrten (vereinzelt auch starke Ankunftsverfrühungen durch Fahrplanreserven). Die Messungen fanden etwa monatlich von 07:45 – 09:15 Uhr statt.

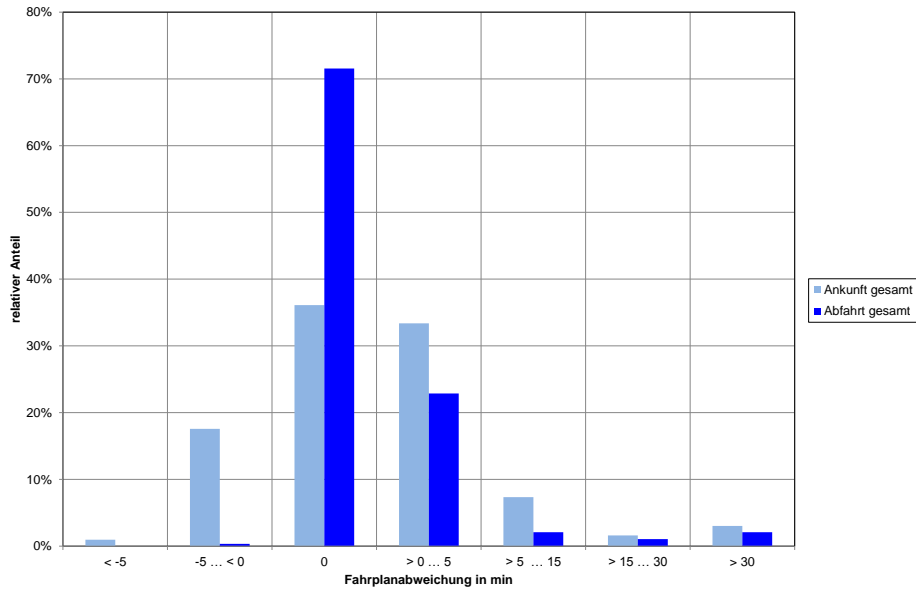


Abbildung 29: Top-Down-Klassen der Messungen in Dresden Hbf (12/2010 – 12/2012, eigene Messung)

Dresden Postplatz

Die stärkere Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (MIV, Fahrt auf Sicht) im Stadtbahnbereich prägt die Knotenpünktlichkeit (vgl. Abbildung 30 / Abbildung 31 / Abbildung 32). Verfrühungen bis zwei Minuten sind hier betrieblich akzeptiert und in den Messungen sichtbar. Pünktlich gelten Fahrten in der Fahrlage von -2 bis +2 Minuten (Zeigersprung).

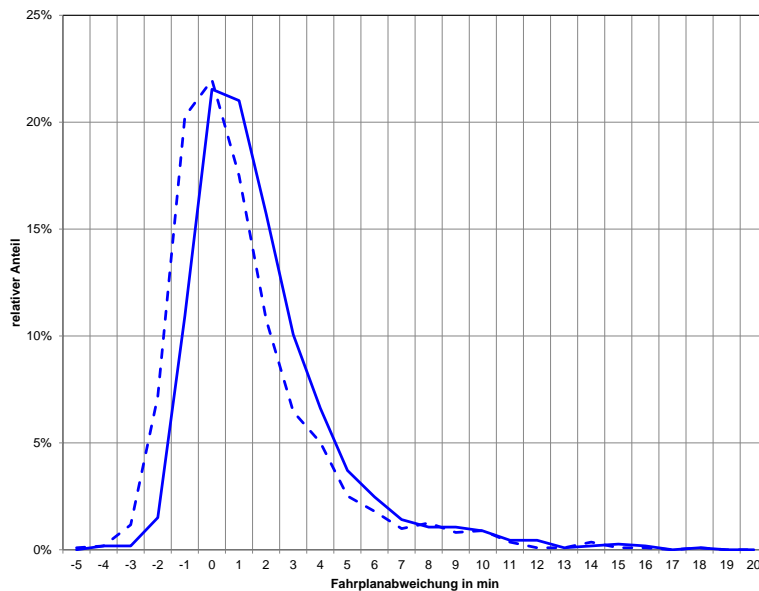


Abbildung 30: Dichtefunktion der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)

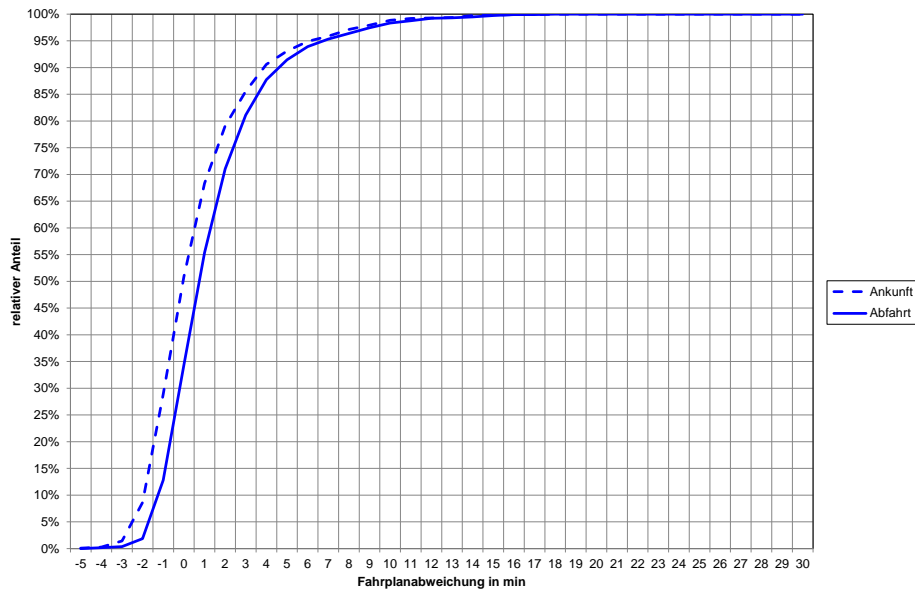


Abbildung 31: Verteilfunktion der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)

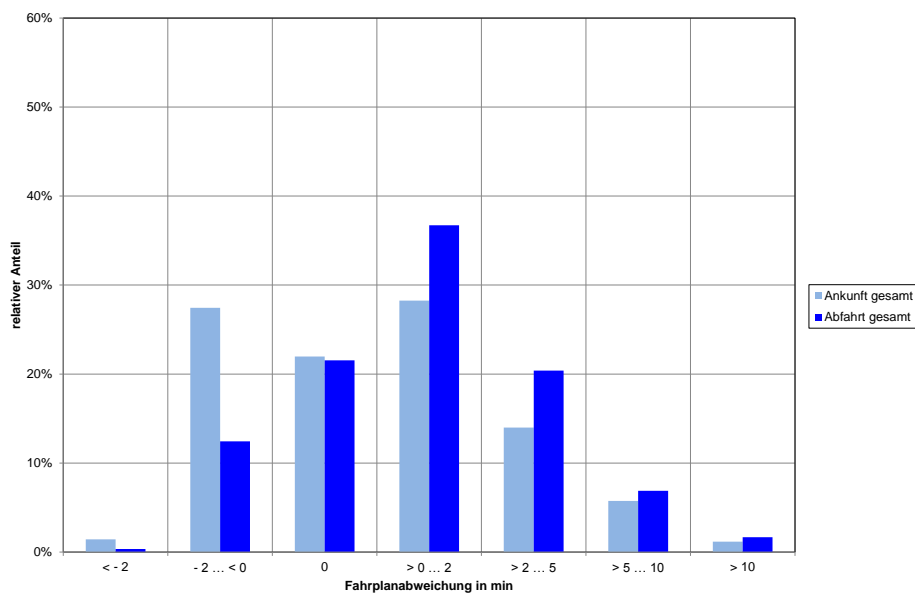


Abbildung 32: Top-Down-Klassen der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)

Anschliessend werden nun die Fahrrichtungen getrennt in die Datenauswertung einbezogen (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34). Bei den stadtauswärtigen Fahrten (grün) fanden bereits innerstädtische Konflikte statt, so dass hier die Verspätungsanfälligkeit grösser ausfällt als bei den stadteinwärtigen Fahrten (rot). Die Messungen fanden etwa monatlich im Nachmittagsverkehr ca. 16 bis 17 Uhr statt.

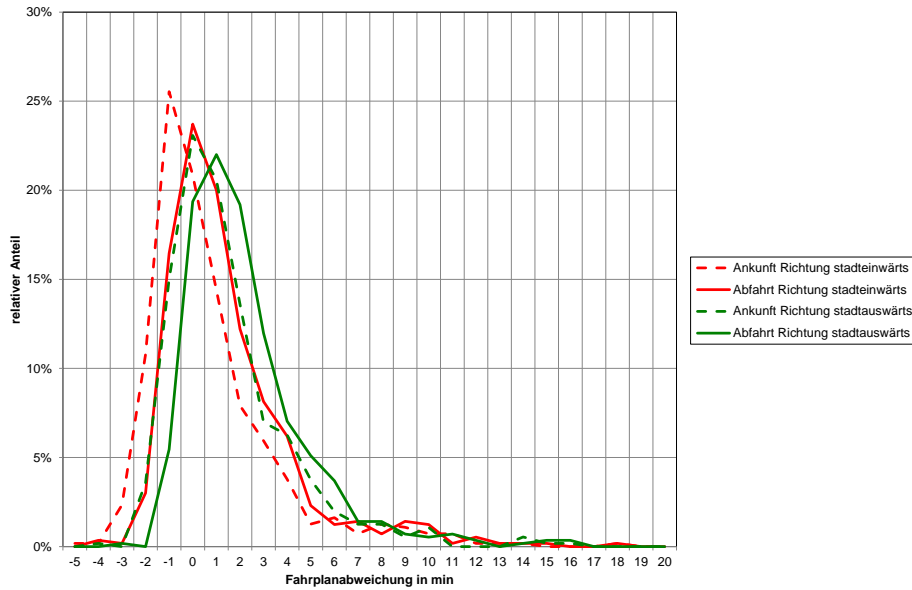


Abbildung 33: Dichtefunktion nach Fahrtrichtung der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)

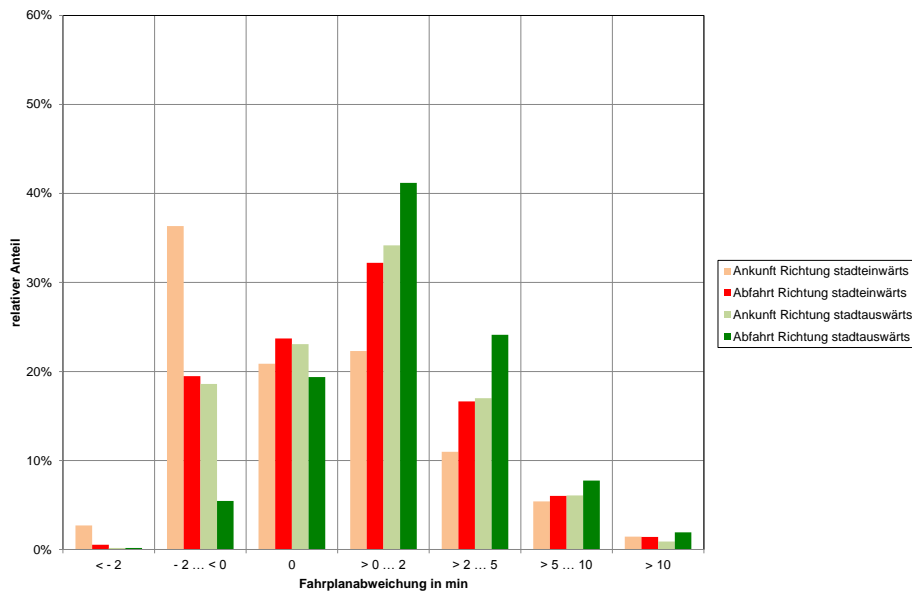


Abbildung 34: Top-Down-Klassen nach Fahrtrichtung der Messungen in Dresden Postplatz (10/2010 – 12/2011, eigene Messung)

Abschliessend werden die Fallstudienresultate der Knotenpunkt-pünktlichkeit kompakt dargestellt. Die Erhebungen der jeweiligen Bahnbetreiber beruhen hierbei auf einer breiteren Datenlage als die eigenen Messungen. Entsprechende Diagramme befinden sich im Anhang 5. Für die weiteren Betrachtungen werden über alle Fallstudien einheitliche Quantile gelegt (Abbildung 35). Beispielhaft ausgewählt wurden: 0.50 (Median), 0.67 (2/3 der Abfahrten/Ankünfte weisen Abweichungen kleiner oder gleich diesem Wert auf), 0.80 (80 % der Abweichungen kleiner gleich diesem Wert), 0.90 (Abschneiden der oberen 10 % als „Ausreisser“).

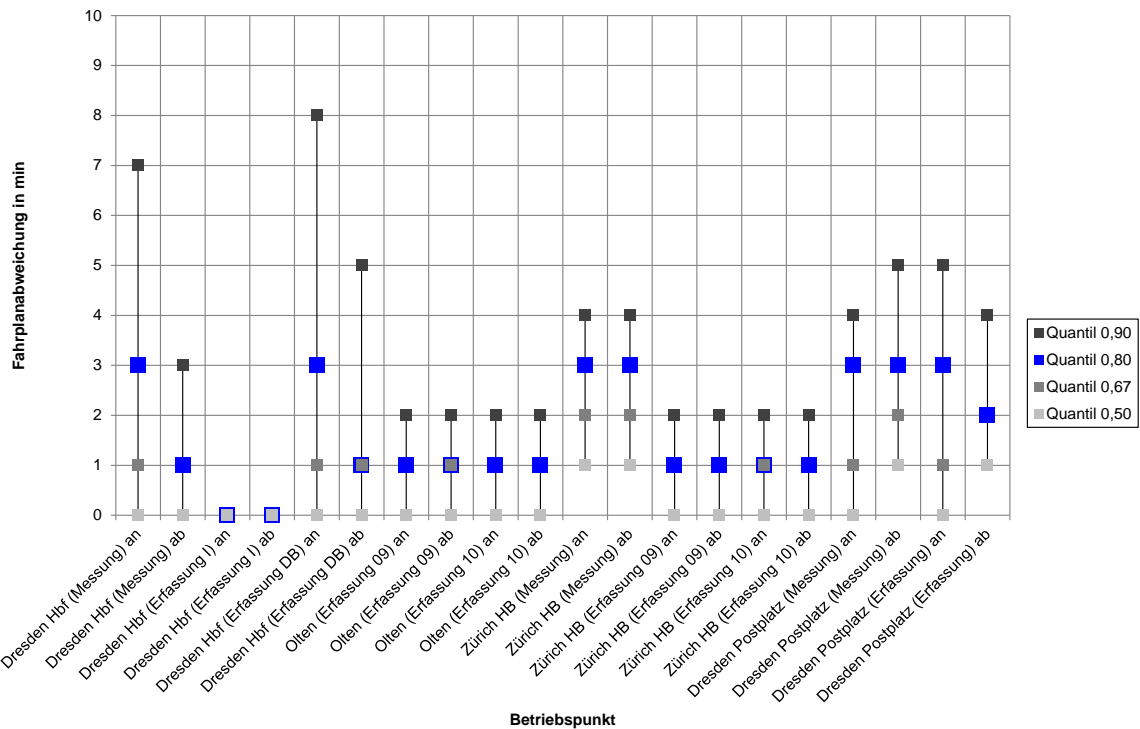


Abbildung 35: Ausgewählte Quantile der Knotenpünktlichkeit (eigene Darstellung)

In Abbildung 35 sind links die Untersuchungen aus dem Vollbahnbereich, rechts die Untersuchungen aus dem Stadtbahnbereich abgebildet. Ankünfte und Abfahrten sind jeweils separat ausgewiesen. „Messungen“ erfolgten im Rahmen dieser Arbeit selbstständig, „Erfassungen“ stammen vom jeweiligen Bahnbetreiber. Eine Ausnahme bildet die „Erfassung I“ in Dresden Hbf, hier wurden die auf der Bahnhomepage veröffentlichten Abweichungen der DB mitgelesen (05/2011 bis 04/2012 je 24 Stunden pro Monat). Diese waren seinerzeit auf 5-Minuten-Schritte diskretisiert ($< 5 \text{ min} \rightarrow$ „pünktlich“ bzw. „wenige Minuten später“ / $5 \dots < 10 \text{ min} \rightarrow$ „ca. 5 min später“ / $10 \dots < 15 \text{ min} \rightarrow$ „ca. 10 min später“ usw.).

Generell glätten sich die Fahrplanabweichungen über den gesamten Betriebstag. Daher fallen die Quantile der Erfassungen geringer aus als die Quantile innerhalb der Messungen in der Hauptverkehrszeit (HVZ). Im Jahresvergleich treten keine nennenswerten Veränderungen auf (siehe Olten 2009/2010 und Zürich 2009/2010), weshalb diese Reihe nicht vertieft wurde. Mitunter werden Knoten auch zum Verspätungsabbau genutzt, indem durchfahrende Züge zur kommerziellen Aufenthaltszeit einen Zeitzuschlag erhalten. Dies wird ersichtlich, indem beispielsweise die Ankunft in Dresden Hbf stärker streut als die Abfahrt. Mit diesen Ergebnissen kann ein erster Eindruck vom Betriebsgeschehen gewonnen werden. Es lässt sich die Frage beantworten, mit welcher Wahrscheinlichkeit (z. B. 80 %) ein Zug im jeweiligen Knoten eine gewisse Abweichung erhält und ob diese grösser oder kleiner der jeweiligen Pünktlichkeitsgrenze ausfällt. Auch die Umkehrung ist möglich: Möchte man beispielsweise bei der Ankunftszeit in Zürich HB zu 90 % sicher gehen, sollte man der Fahrplanankunft zwei Minuten Abweichung aufschlagen.

5.2.2 Ergebnisse der Fallstudien mit den Praxispartnern

Die folgenden Fallstudienresultate gliedern sich in Fallstudien im Bereich Vollbahn und solche im Bereich Stadtbahn. Eine kurze Beschreibung der wichtigsten Befunde rundet die Darstellung jeweils ab. Folgende Aspekte sind hier dargestellt:

- Ressourcenanteil von Codes, Meldungen, Verspätungen bzw. Ressourcenzuordnung
- Distance der Störungsklassen (Codierungslisten im Anhang 6)
- ausgewählte weitere Datenauswertungen

Fallstudien im Bereich Vollbahn

Schweizerische Bundesbahnen SBB

Für die SBB-Fallstudien konnten die betrieblichen ErZu-Daten für 2009 und 2011 sowie die technischen SIP-Daten für 2011 ausgewertet werden (siehe auch Kapitel 0). Abbildung 36 zeigt für die ErZu-Daten 2011 die Aufteilung der Codes, Meldungen und Verspätungen nach Ressourcen. Bei den Codes dominiert die Infrastruktur, was in der organisatorischen Zuteilung der Betriebsführung zur Infrastruktur begründet liegt. Bei Meldungen und Verspätungen dominieren die prozessualen Betriebsaspekte. Zugfolgekonflikte durch verspätete vorausfahrende Züge werden dem jeweiligen Fall innerhalb der Totalverspätung zugeordnet und nicht separat ausgewiesen.

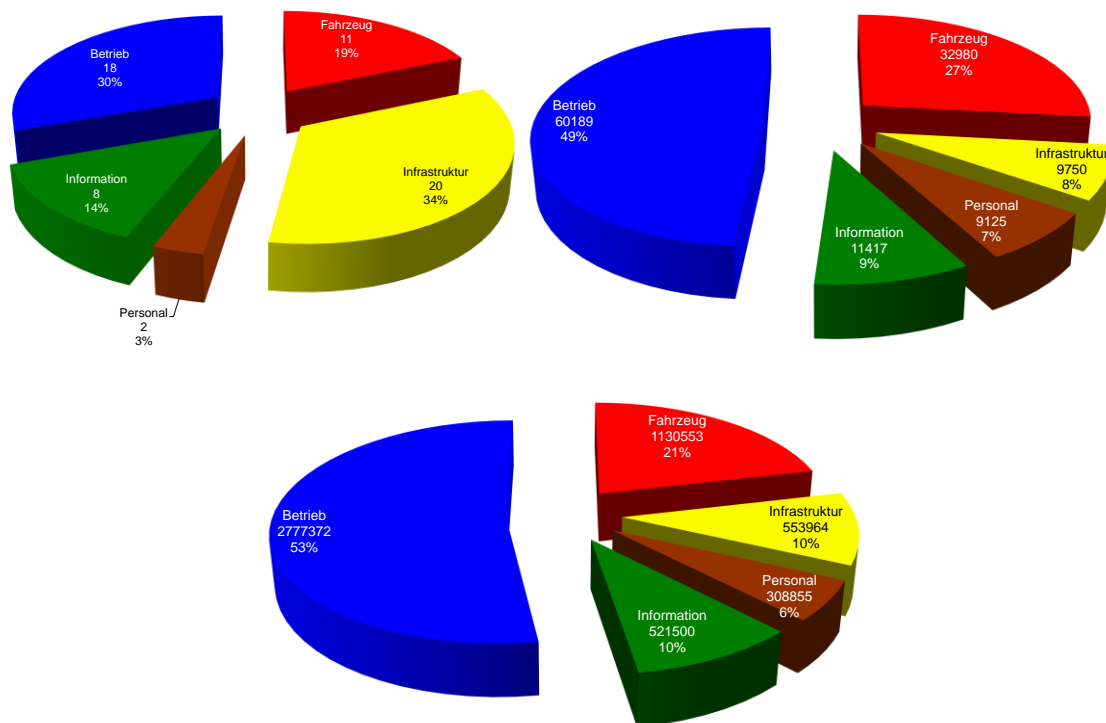


Abbildung 36: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der ErZu-Daten 2011 (eigene Darstellung)

Die Distance der ErZu-Codes ist bereits in Abbildung 23 (Seite 84) dargestellt. Das Abweichungsgeschehen in der SBB-Bahnproduktion wird demnach massgeblich von einbrechenden Verspätungen aus Nachbarnetzen des Auslands geprägt; dies spricht im Umkehrschluss für die hohe Präzision der Bahnproduktion im Inland. Eine Distance-Auswertung technischer Störungen befindet sich im Kapitel Intervention 6.2.3 und wird daher an dieser Stelle nicht diskutiert. Mithilfe der Distance-Ermittlung ist im Sinne der Kritikalität von Ereignissen methodisch konsistent ableitbar, welche Arten von Störereignissen einer tiefer gehenden Analyse zu unterziehen sind. Dies wird auch bei den folgenden Fallstudien so gehandhabt. Insbesondere die Ereignisklassen¹⁹ mit einer Distance > 5 % werden im Sinne der Störungsprognose vertieft in Kapitel 7.2.3 betrachtet.

Teilweise interessiert hingegen, welche Betriebsstellen besonders störungsauffällig sind. Hierbei werden die in der jeweiligen Störungsdatenbank hinterlegten Ortszuordnungen analysiert. Im Beispiel der SBB-ErZu-Daten aus 2011 ist dies im nachfolgenden Diagramm ersichtlich (Abbildung 37). Hierbei zeigt sich die Auffälligkeit der Grenzbahnhöfe (bzw. grenznahe Stationen), welche blau markiert sind gegenüber den verkehrintensiven Knoten (rot markiert) im Inland, was wiederholt die Anfälligkeit der Betriebslage gegenüber einbrechenden Verspätungen unterstreicht.

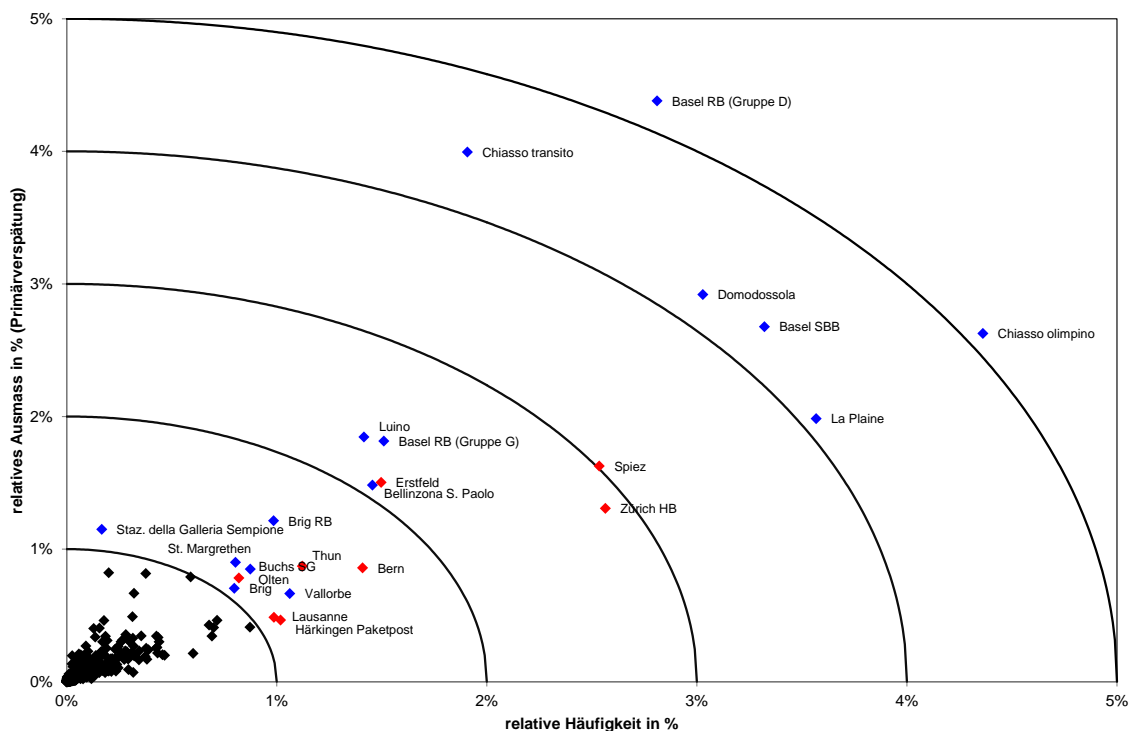


Abbildung 37: Distance der Betriebsstellen nach ErZu-Daten 2011 bezüglich Totalverspätung ($\epsilon = 0.01$, eigene Darstellung)

¹⁹ Die Betrachtungsgrenze von Störereignisklassen beträgt 5 %, bei Betrachtung von einzelnen Betriebsstellen wegen der grösseren Grundgesamtheit jedoch nur 1 %.

Deutsche Bahn DB

Bei der DB Netz im Regionalbereich Südost konnten für 2010 und 2011 Abweichungsdaten ausgewertet werden. Zugrunde liegt die VU-Datenbank (Verspätungsursache) mit Zusatzverspätungen ab 90 Sekunden, darin sind alle hinzukommenden Fahrplanabweichungen ab diesem 90-Sekunden-Grenzwert erfasst und codiert. Hierbei wurden Ereignisse der Kategorie „Zugfolge“ im Interesse der Vergleichbarkeit mit den schweizerischen Fallstudien herausgefiltert (dort „Sekundärverspätung“ ohne eigene Störungsklasse).

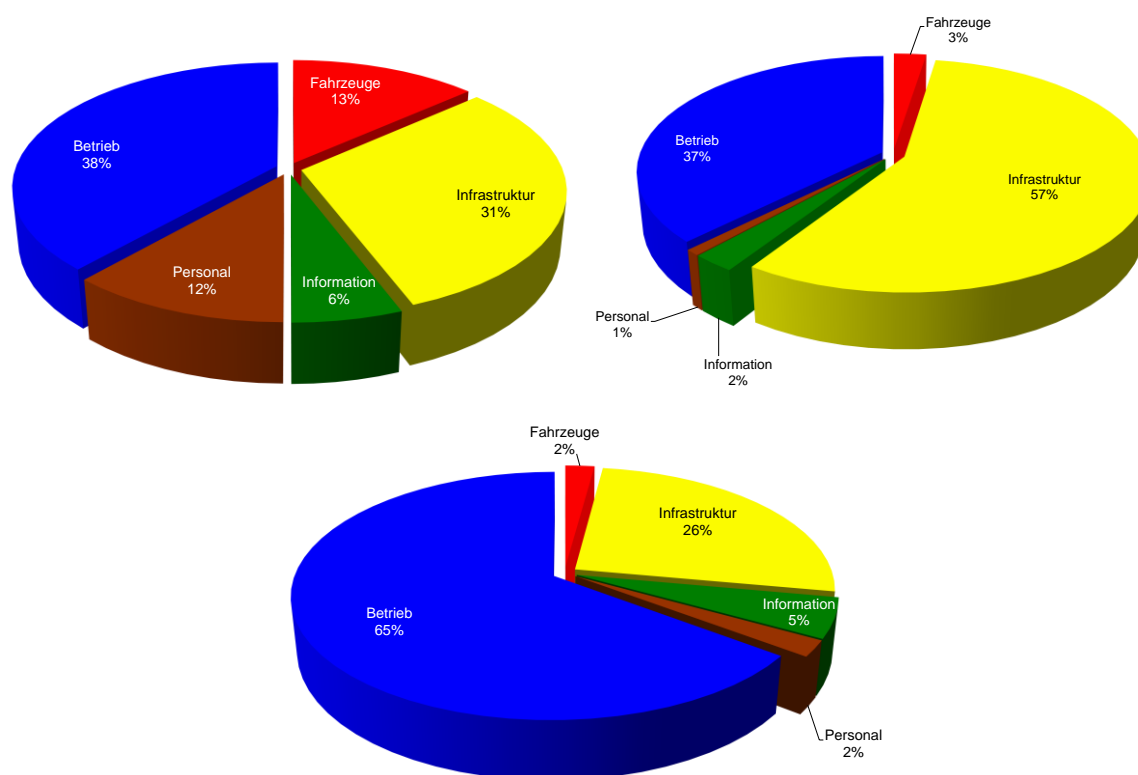


Abbildung 38: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Zusatzverspätungen (unten) der DB-Daten 2011 (eigene Darstellung)

In der VU-Erfassung dominiert bei den Verspätungscodes (Abbildung 38) die Ressource Betrieb, dies passt recht gut zum beobachteten prozessualen Abweichungsgeschehen im Bahnbetrieb. Auf Seite der Meldungen zeigen sich hingegen zahlreiche Infrastrukturreignisse, welche offensichtlich nur unterproportional auf die Betriebsführung durchschlagen.

Die Analyse der Distance (Abbildung 39) wurde hinsichtlich Gesamtverkehr und reinem Personenverkehr aufgetrennt. Bauarbeiten sowie prozessuale Betriebsaspekte prägen das Abweichungsgeschehen. Triebfahrzeugdefekte sind von der Häufigkeit her vergleichsweise selten, führen aber im Ausmass zu Betrachtungsrelevanz. Teilweise existieren Abweichungen ohne begründende Meldung des Verkehrsunternehmens („keine Meldung EVU“) bzw. auf deren Wunsch hin, z. B. im Zuge der Betriebstechnologie („Antrag EVU“). Die Distance als Ausdruck der Kritikalität der Anschlussgewährung („Anschluss“) sinkt erwartungsgemäss ab, wenn statt dem Personenverkehr der gesamte Verkehr analysiert wird (Distance > 15 % → < 10 %).

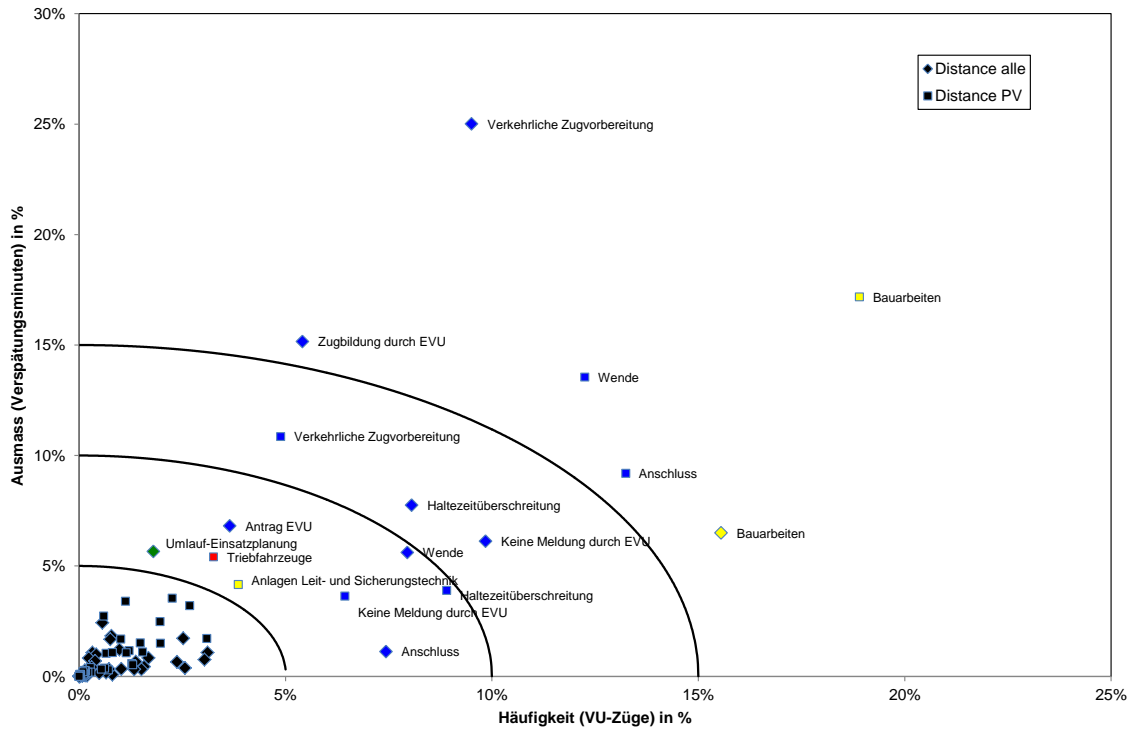


Abbildung 39: Distance Gesamt-/ Personenverkehr zu Störungsart in DB-Daten 2011 ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

Für die Betriebsstellen der 2010er Daten wurde ebenso eine Distancebetrachtung durchgeführt. Hauptbahnhöfe mit tendenziell mehr Verkehr sind rot markiert und eher abweichungsanfällig.

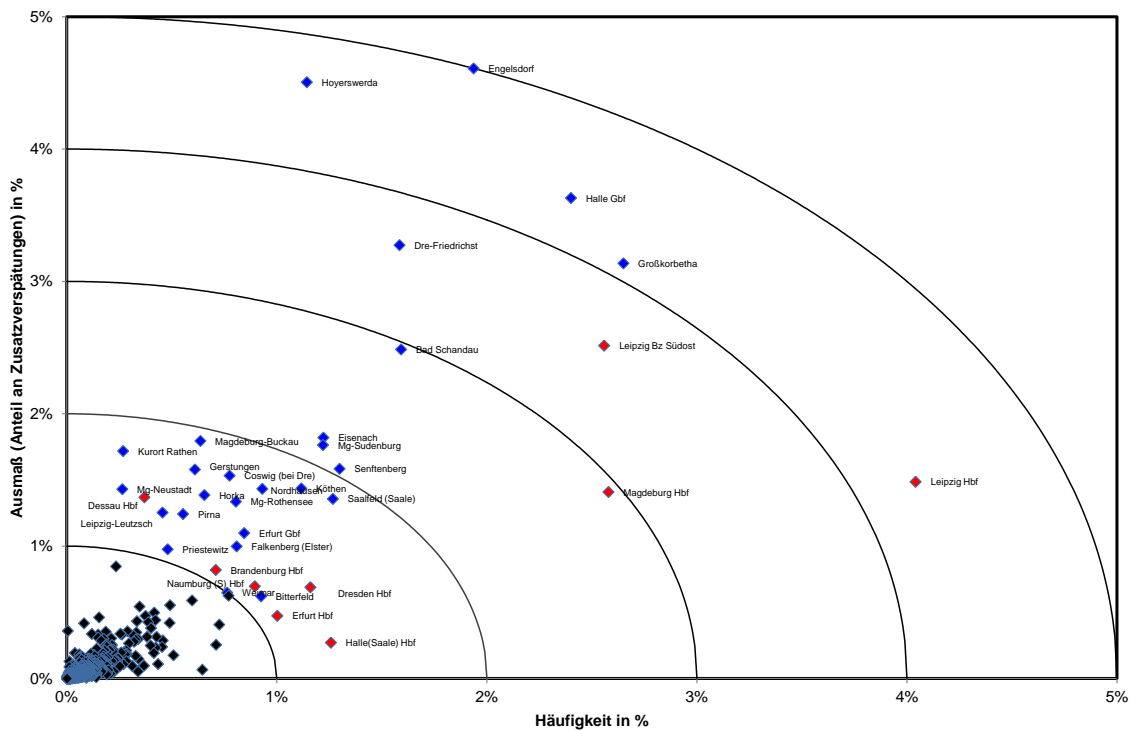


Abbildung 40: Distance der Betriebsstellen in DB-Daten 2010 bezüglich Zusatzverspätungen ($\epsilon = 0.01$)

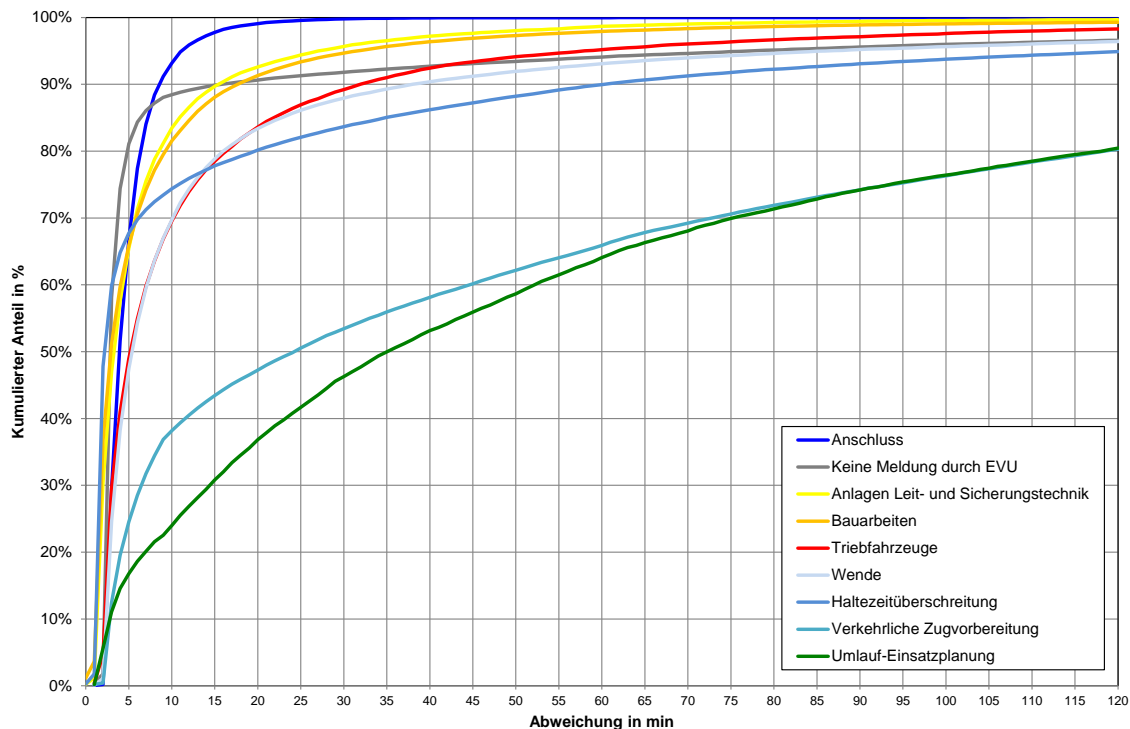


Abbildung 41: Verteilfunktion ausgewählter VU-Ereignisklassen 2011 (eigene Darstellung)

Jene Störereignisklassen mit einer Distance > 5 % wurden auf ihre Verteilfunktion hin analysiert (Abbildung 41). Somit sind die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten einer gewissen Abweichung bezogen auf den einzelnen Zuglauf direkt ablesbar. Verkehrliche Zugvorbereitung und Umlauf-/Einsatzplanung streuen dabei eher stark (überwiegend Güterverkehr), Anschlussbeziehungen (Personenverkehr) variieren eher weniger. So ist die Abweichung durch eine Anschlussgewährung beispielsweise mit 80 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit maximal sieben Minuten gross.

Als Pendant zu den dargestellten Betreiberdaten wurden in einer weiteren Fallstudie von Mai 2011 bis April 2012 stichprobenartig einmal monatlich die auf der DB-Homepage kommunizierten Pünktlichkeiten der Züge mitgelesen und ausgewertet. Hierzu wurden die Hauptbahnhöfe der 30 bevölkerungsreichsten Städte Deutschlands herangezogen. Tabelle 19 gibt einen Überblick über jene Städte nebst den betrachteten Stationen (IBNR entspricht der stationsbezogenen deutschlandweiten Identifikationsnummern). Weiterhin sind Angaben zur Anzahl der Einwohner und flächenbezogenen Stadtgrösse nebst Einwohnerdichte angegeben. Die Zugehörigkeit zum Regionalbereich der DB Netz ist jeweils in der rechten Spalte ergänzt.

Rang	Stadt	Einwohner 2009	EW-Dichte (EW/km ²)	Betriebsstelle	IBNR	Bundesland	Regionalbereich DB Netz
1	Berlin	3442675	3864	Berlin Hbf	8011160	Berlin	RB Ost
2	Hamburg	1774224	2349	Hamburg Hbf	8002549	Hamburg	RB Nord
3	München	1330440	4286	München Hbf	8098261	Bayern	RB Süd
4	Köln	998105	2463	Köln Hbf	8000207	Nordrhein-Westfalen	RB West
5	Frankfurt am Main	671927	2706	Frankfurt (Main) Hbf	8000105	Hessen	RB Mitte
6	Stuttgart	601646	2902	Stuttgart Hbf	8000096	Baden-Württemberg	RB Südwest
7	Düsseldorf	586217	2699	Düsseldorf Hbf	8000085	Nordrhein-Westfalen	RB West
8	Dortmund	581308	2073	Dortmund Hbf	8000080	Nordrhein-Westfalen	RB West
9	Essen	576259	2740	Essen Hbf	8000098	Nordrhein-Westfalen	RB West
10	Bremen	547685	1683	Bremen Hbf	8000050	Bremen	RB Nord
11	Hannover	520966	2552	Hannover Hbf	8000152	Niedersachsen	RB Nord
12	Leipzig	518862	1745	Leipzig Hbf	8010205	Sachsen	RB Südost
13	Dresden	517052	1575	Dresden Hbf	8010085	Sachsen	RB Südost
14	Nürnberg	503673	2702	Nürnberg Hbf	8000284	Bayern	RB Süd
15	Duisburg	491931	2113	Duisburg Hbf	8000086	Nordrhein-Westfalen	RB West
16	Bochum	376319	2587	Bochum Hbf	8000041	Nordrhein-Westfalen	RB West
17	Wuppertal	351050	2084	Wuppertal Hbf	8000266	Nordrhein-Westfalen	RB West
18	Bielefeld	323084	1253	Bielefeld Hbf	8000036	Nordrhein-Westfalen	RB West
19	Bonn	319841	2265	Bonn Hbf	8000044	Nordrhein-Westfalen	RB West
20	Mannheim	311969	2152	Mannheim Hbf	8000244	Baden-Württemberg	RB Südwest
21	Karlsruhe	291959	1683	Karlsruhe Hbf	8000191	Baden-Württemberg	RB Südwest
22	Wiesbaden	277493	1361	Wiesbaden Hbf	8000250	Hessen	RB Mitte
23	Münster	275543	910	Münster (Westf) Hbf	8000263	Nordrhein-Westfalen	RB West
24	Augsburg	263646	1795	Augsburg Hbf	8000013	Bayern	RB Süd
25	Gelsenkirchen	259744	2477	Gelsenkirchen Hbf	8000118	Nordrhein-Westfalen	RB West
26	Aachen	258380	1606	Aachen Hbf	8000001	Nordrhein-Westfalen	RB West
27	Mönchengladbach	258251	1515	Mönchengladbach Hbf	8000253	Nordrhein-Westfalen	RB West
28	Braunschweig	247400	1290	Braunschweig Hbf	8000049	Niedersachsen	RB Nord
29	Chemnitz	243089	1101	Chemnitz Hbf	8010184	Sachsen	RB Südost
30	Kiel	238281	2008	Kiel Hbf	8000199	Schleswig-Holstein	RB Nord

Tabelle 19: Betrachtete Betriebsstellen nebst Demografie bei der DB-Messung 2011/2012 (eigene Darstellung)

Abbildung 42 zeigt fortfolgend die prozentuale Aufteilung der Abweichungen nach Zuggattungen. Es ist dabei zu beachten, dass die Pünktlichkeit in 5-min-Intervallen angegeben wird. Insgesamt zeigt sich die Dominanz von kleinen Abweichungen gegenüber der geringeren Häufigkeit grösserer Abweichungen. Von letzteren sind insbesondere langlaufende Fernverkehrszüge betroffen.

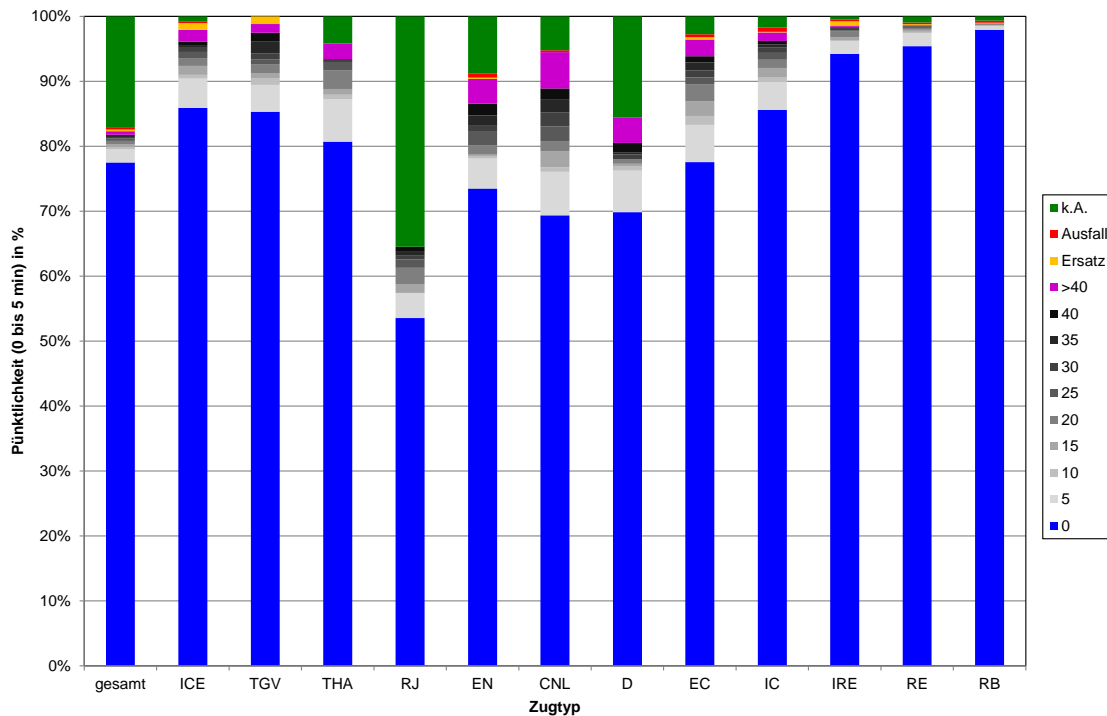


Abbildung 42: Pünktlichkeit nach Zugtypen bei DB-Messung 2011/2012 (eigene Messung)

Die Datenlage ermöglichte ebenso das Aufstellen eines Distancediagramms (Abbildung 43). Hierbei dominieren Triebfahrzeugstörungen noch vor den Verspätungen eines vorausfahrenden Zuges, keiner angegebenen Begründung und den Verspätungen durch Vandalismus-Beeinträchtigung.

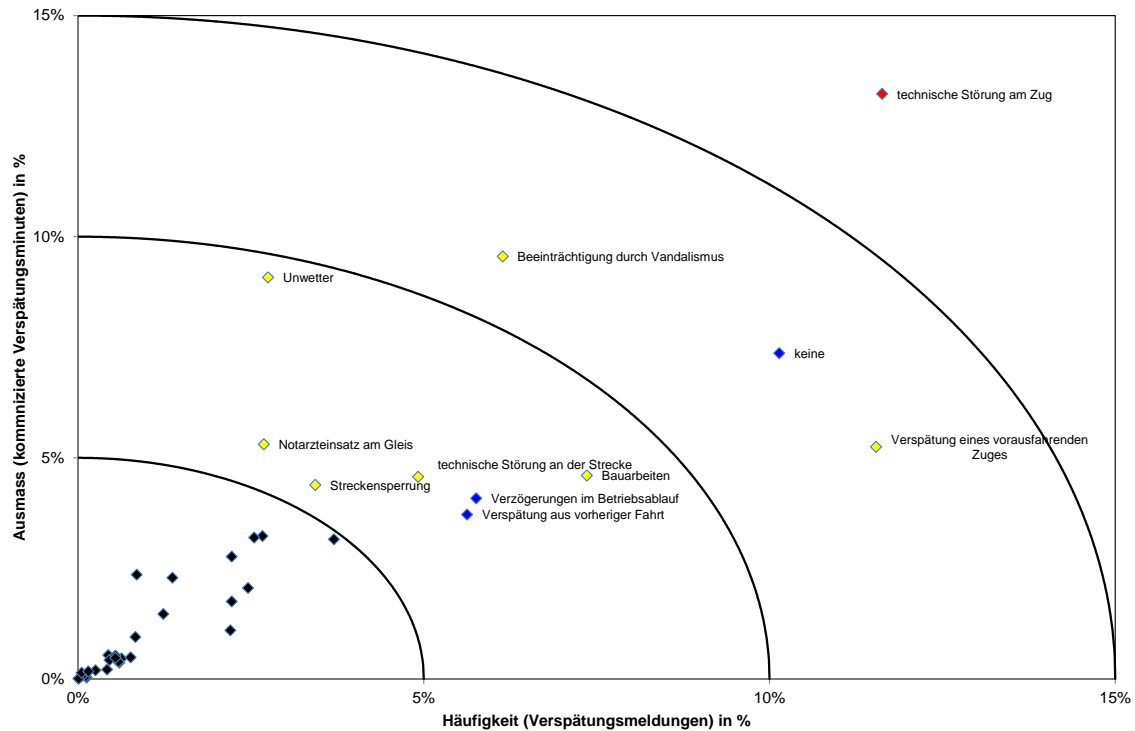


Abbildung 43: Distance Personenverkehr bezüglich Verspätungen in DB-Messung 2011/2012 ($\epsilon = 0.05$, eigene Messung)

Im Unterschied zu Abbildung 39 ist zu bemerken, dass die dortigen Angaben auf dem Jahresfahrplan basieren und die Angaben in Abbildung 43 bezüglich des letztpublizierten (Baustellen-) Fahrplans entstehen. Somit ändert sich scheinbar die betriebliche Wirkung der Baustellen bezüglich der Abweichungen respektive Verspätungen. Somit wird ersichtlich, welchen Einfluss die Referenz des „Regelbetriebs“ für das wahrgenommene Störungsgeschehen hat.

BLS AG

Datenlage und Auswertungsmethodik in der Fallstudie der BLS sind nahezu identisch mit denen der SBB. Hier wurde das Jahr 2010 exemplarisch betrachtet. Das Verhältnis der Ressourcenzuordnung bei den Störungscores ist identisch mit dem der SBB (vorbehaltlich kleinerer Codierungsänderungen durch die verschiedenen Jahrgänge).

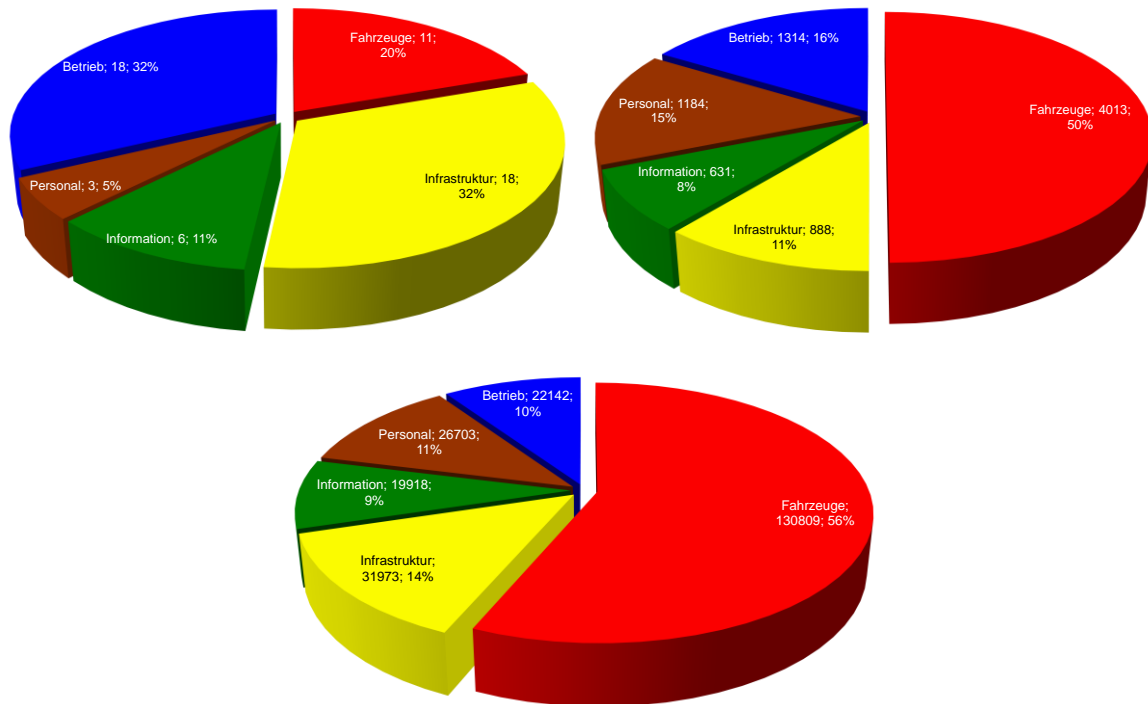


Abbildung 44: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der BLS-Daten 2010 (eigene Darstellung)

Interessanterweise dominieren bei den Meldungen und den Verspätungen die Triebfahrzeugstörungen. Die Erfassungsgrenze ab 170 s entspricht quasi immer einer aufgetretenen Verspätung statt nur einer Abweichung. Eine Ursache dafür mag in der (damaligen) Flottenzusammensetzung liegen. Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen diese Zusammenhänge im Generellen bzw. für die signifikanten Ereigniscodes.

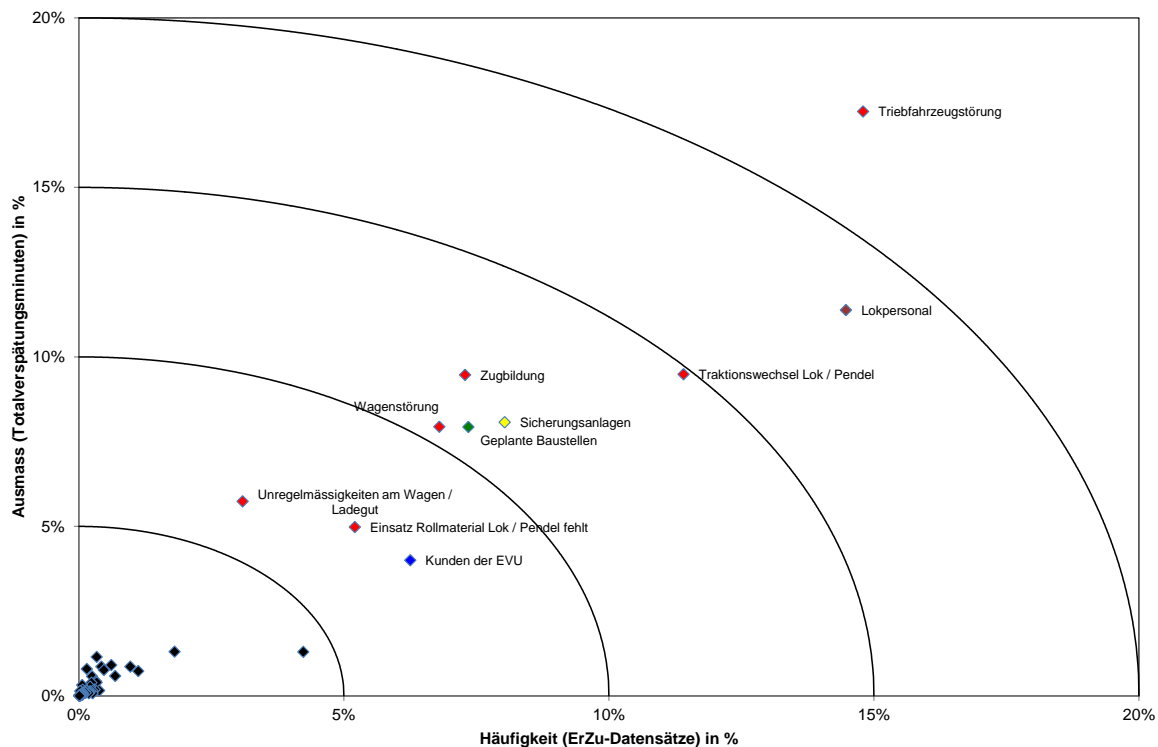


Abbildung 45: Distance der BLS-ErZu-Codes 2010 bezüglich Primärverspätung ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

Jede dokumentierte Abweichung wird einer Betriebsstelle zugewiesen und ist damit auch einer Strecke eindeutig zugeordnet. Die folgende Abbildung 46 wendet die Distance-Methodik auf die Identifikation abweichungsintensiver Strecken an. Mit dem BLS-Knoten Spiez dominiert hierbei jedoch ein zentraler Punkt des Netzes, teilweise mit Traktionswechsel bzw. Einbruchsverspätungen aus dem Netz der SBB. Da sämtliche Betriebsstrecken nah der Hauptdiagonalen hinsichtlich Häufigkeit und Ausmass von Verspätungen liegen wird ablesbar, dass das Verspätungsausmass je ErZu-Fall jeweils ähnlich ist.

Abbildung 47 greift die Verteilung der Primärverspätungen und der dadurch ausgelösten Sekundärverspätungen auf. Die Summe aus beiden ergibt die Totalverspätung und war die rechnerische Grundlagen für den Verspätungsanteil der einzelnen Ressourcen (vgl. auch Abbildung 44). Knapp die Hälfte aller dokumentierten Abweichungen liegt demnach primär zwischen 3 und 8 Minuten. Eine Vielzahl der Folgeereignisse (Sekundärverspätung) liegt mit 0 bis 2 Minuten unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze. Bei dichter ausgelasteten Netzen würde die Sekundärverspätung höher ausfallen.

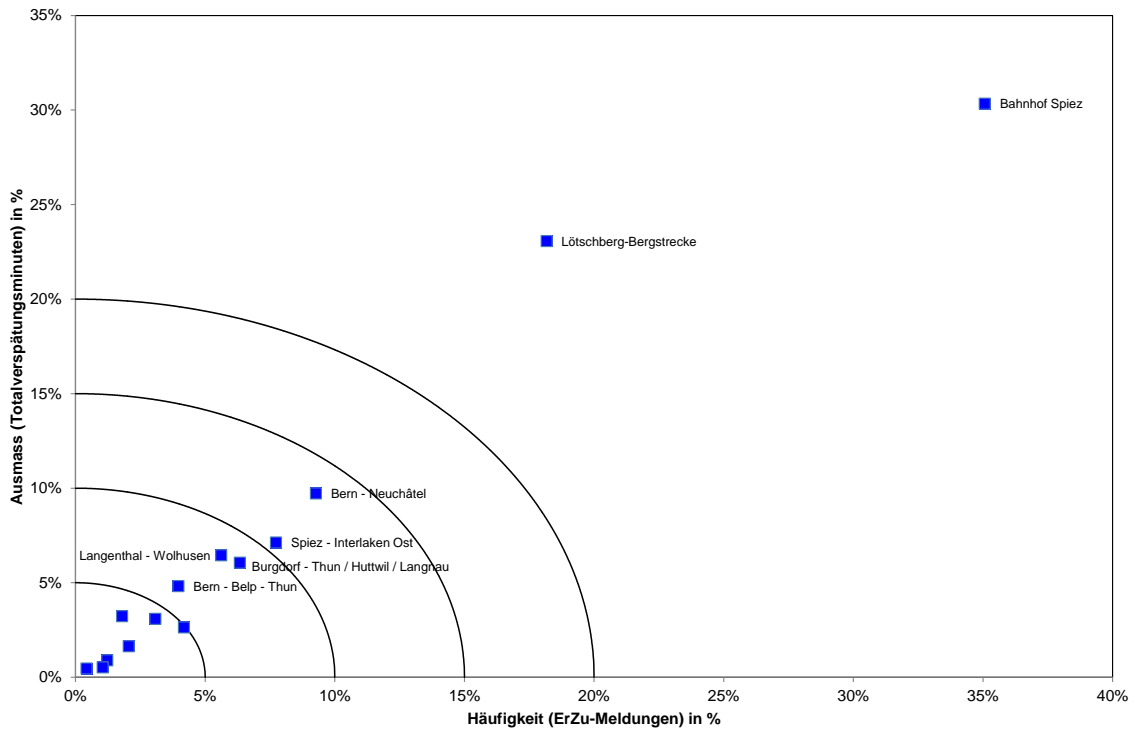


Abbildung 46: Distance der BLS-Daten 2010 bezüglich Streckenzuordnung ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

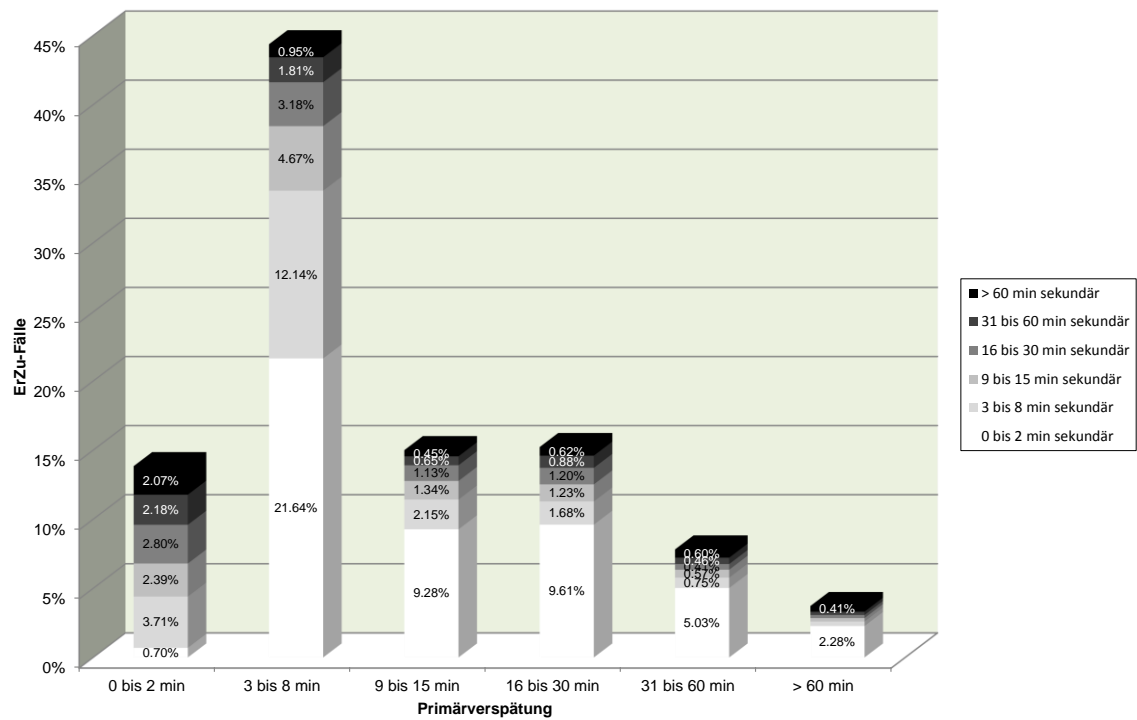


Abbildung 47: Primär- und Sekundärverspätung der BLS-Daten 2010 (eigene Darstellung)

City-Bahn Chemnitz CBC

Die Datenauswertung im Bereich der City-Bahn basiert auf den Mitschriften der Fahrdienstleiter der Kursbuchstrecken (KBS) 516 Niederwiesa – Hainichen, KBS 522 Altchemnitz – Stollberg (Sachs) und KBS 523 Stollberg (Sachs) – St. Egidien. Die Abschnitte Chemnitz Hbf – Niederwiesa (KBS 516) und St. Egidien – Glauchau (Sachs) (KBS 523) gehören zur Infrastruktur der DB bzw. fallen unter den BO Strab-Bereich der Chemnitzer Verkehrs AG (CVAG) zwischen Chemnitz Hbf und Altchemnitz (KBS 522). In diesen angrenzenden Streckenabschnitten sind lediglich Einbruchsverspätungen verzeichnet. Weiterhin besteht keine fixe Codeliste, so dass die Felddaten erst im Zuge dieser Arbeit codiert und klassifiziert wurden. Abbildung 48 zeigt die Ressourcenzuordnung der (vergebenen) Codes, Meldungen und Abweichungen aus dem Jahr 2009.

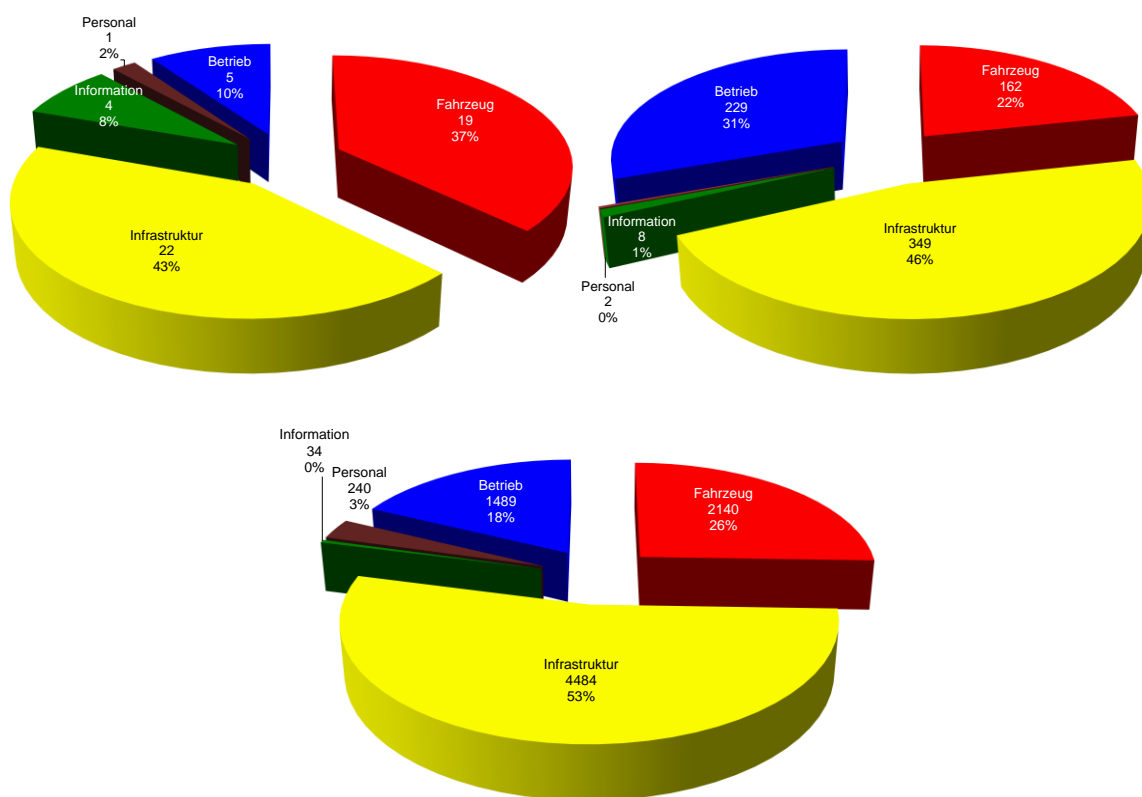


Abbildung 48: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Abweichungen (unten) der CBC-Daten 2009 (eigene Darstellung)

Die mit den anderen Fallstudien verglichen eher ausgeprägte Kleinräumigkeit der Betriebsdaten (ca. 750 Ereignisse auf 3 Strecken) erlaubt einen detaillierten Rückschluss auf die auslösende Ressource und jene Ressource der Bahnproduktion, welche im jeweiligen Störfall aufgegeben wurde. Bei letzterem sticht die prozessuale Ressource Betrieb heraus (Abbildung 49).

In einer auf einzelne Zugläufe fokussierten Erfassung dominieren die reinen Folgeverspätungen aus anderen Fahrten und Anschlussbeziehungen (Abbildung 50). Im Interesse der Vergleichbarkeit mit den schweizerischen Fallstudien mit der systematischen Fokussierung auf den kompletten Abweichungsfall, sollten diese jedoch ausgeblendet werden. Dann dominieren Fahrzeugstörun-

gen, nicht näher aufgeschlüsselte generelle Prozessaspekte (Verkehrsstörung, Verspätung) vor nicht nutzbaren Infrastrukturen (Zugfolge [Belegung durch kreuzende Züge] / Fahrwegelemente / Sicherungstechnik).

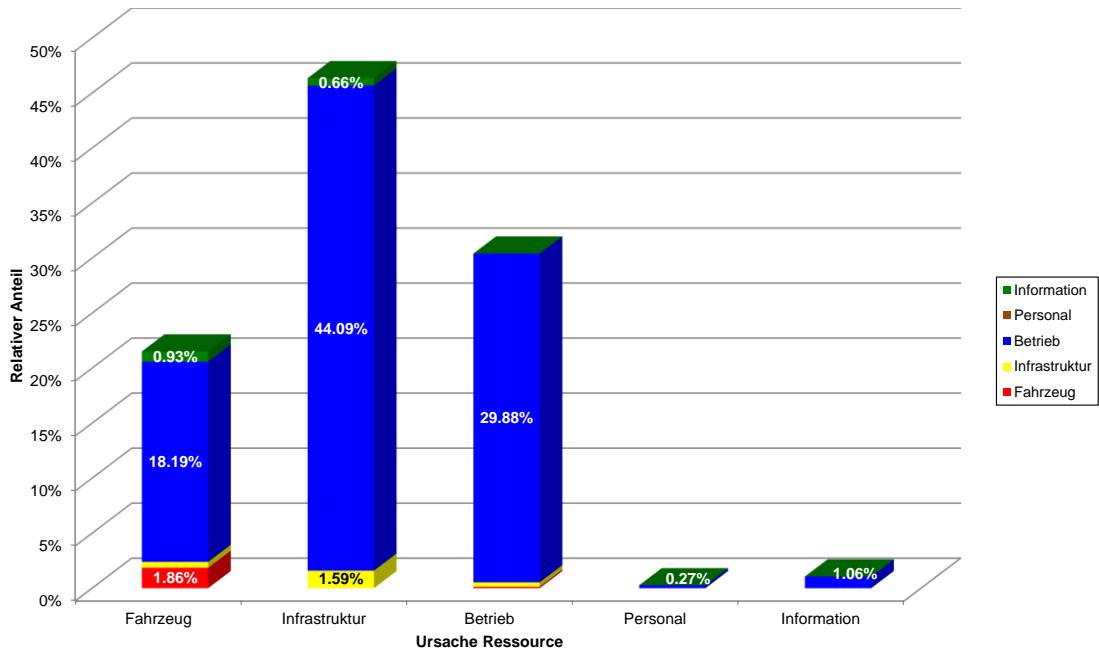


Abbildung 49: Ressourcenanteil von Ursache und Massnahme bei CBC-Störungsdaten (eigene Darstellung)

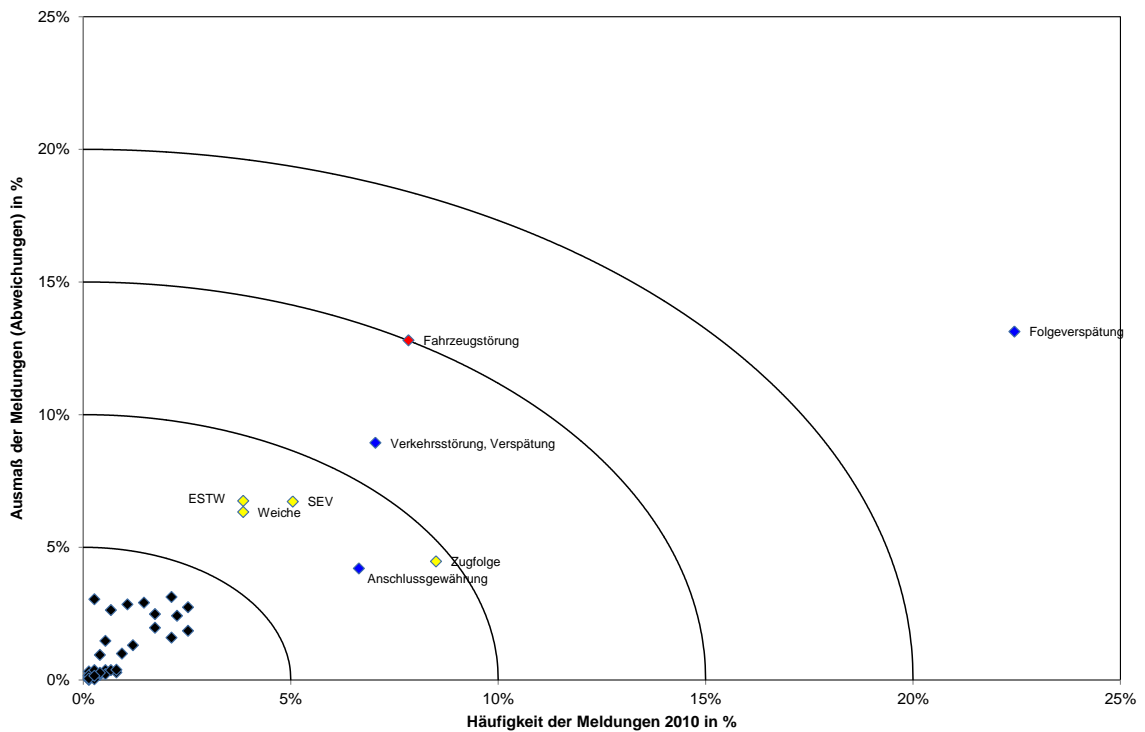


Abbildung 50: Distance der CBC-Störungsdaten 2009 zu Fahrplanabweichungen ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

Fallstudien im Bereich Stadtbahn

Dresdner Verkehrsbetriebe DVB

In Zusammenarbeit mit den Dresdner Verkehrsbetrieben konnte ein Jahresgang aller Meldungen im Rechnergestützten Betriebsleitsystem ausgewertet werden. Dabei wurden nur Stadtbahneinträge berücksichtigt. In Analogie zu den Fallstudien im Vollbahnbereich lässt sich auch hier das Verhältnis der Ressourcen für die Codes, Meldungen und Störungsdauer herausarbeiten (Abbildung 51). Die Codeliste besteht zu etwa gleich grossen Anteilen aus Codes der Ressourcen Infrastruktur, Information und Betrieb. Die Ressourcen Fahrzeug und Personal sind nur mit wenigen Ereignisarten vertreten. Die Meldungen werden von prozessualen Aspekten der Ressource Betrieb geprägt. Häufigstes Ereignis ist der Sprechwunsch des Fahrers (siehe Abbildung 52). Da sämtliche Sprechwünsche vom Fahrer an die Leitstelle aufgezeichnet werden, dominieren diese in der Häufigkeit der Ereignisse (Abszisse). Die Sprechwünsche sind insofern betrachtungsrelevant für die Störungsforschung, da auf der Leitstelle jeweils eine Information zu verarbeiten ist und dazu als Minimum die Ressource Personal aufzubieten ist. Somit sind Sprechwünsche gemäss der Störungsdefinition aus Kapitel 2.2.2 in die Auswertungen einzubeziehen.

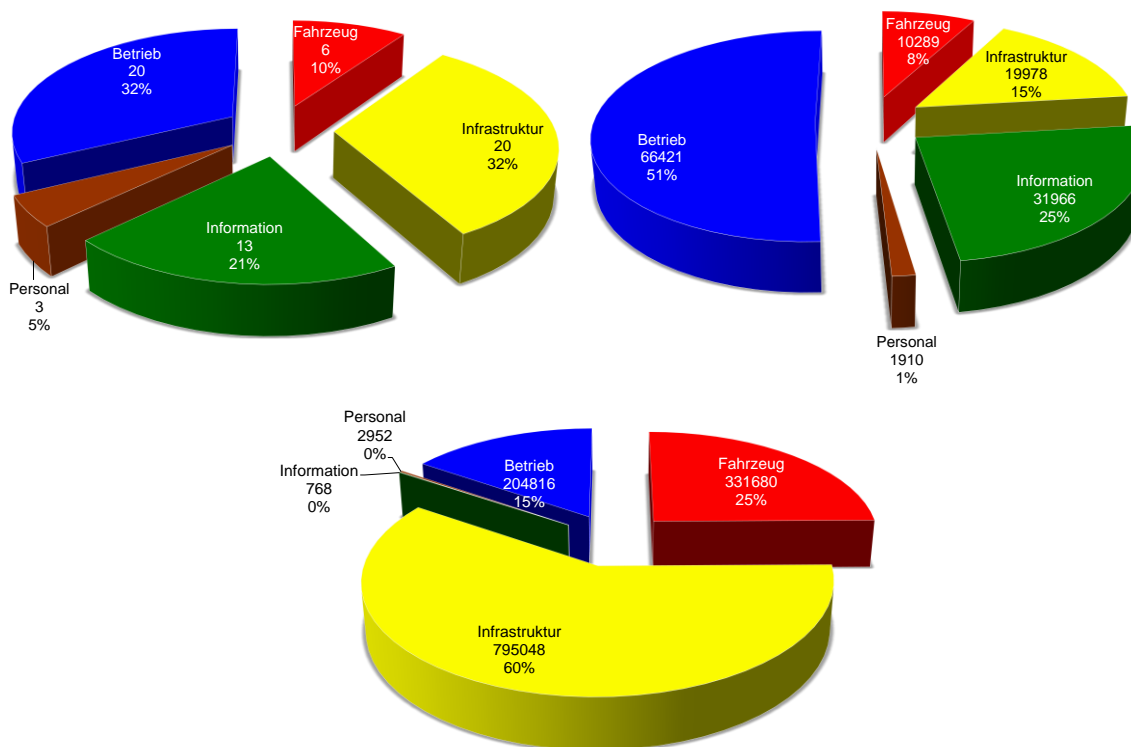


Abbildung 51: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Störungsdauer (unten) der DVB-Daten 2010 (eigene Darstellung)

Bei der Störungsdauer (Abbildung 51/Abbildung 52) dominiert hingegen die Ressource Infrastruktur. Dies folgt aus der stärkeren Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern im innerstädtischen Raum und der daraus resultierenden tendenziell häufigeren Nichtnutzbarkeit. Fahrzeugstörungen sind eher selten, haben aber tendenziell grosses Ausmass der Störungsdauer. Dies zeigt erneut Abbildung 52, worin der Zusammenstoss („Zusammenstoss mit ≤ 13 TEU [gemeint: 13 000 €]

Sachschaden) zwar recht selten vorkommt, aber lange Störungsdauern auslöst. Wagenschäden ohne Ausfall des Fahrzeugs sind demnach deutlich häufiger.

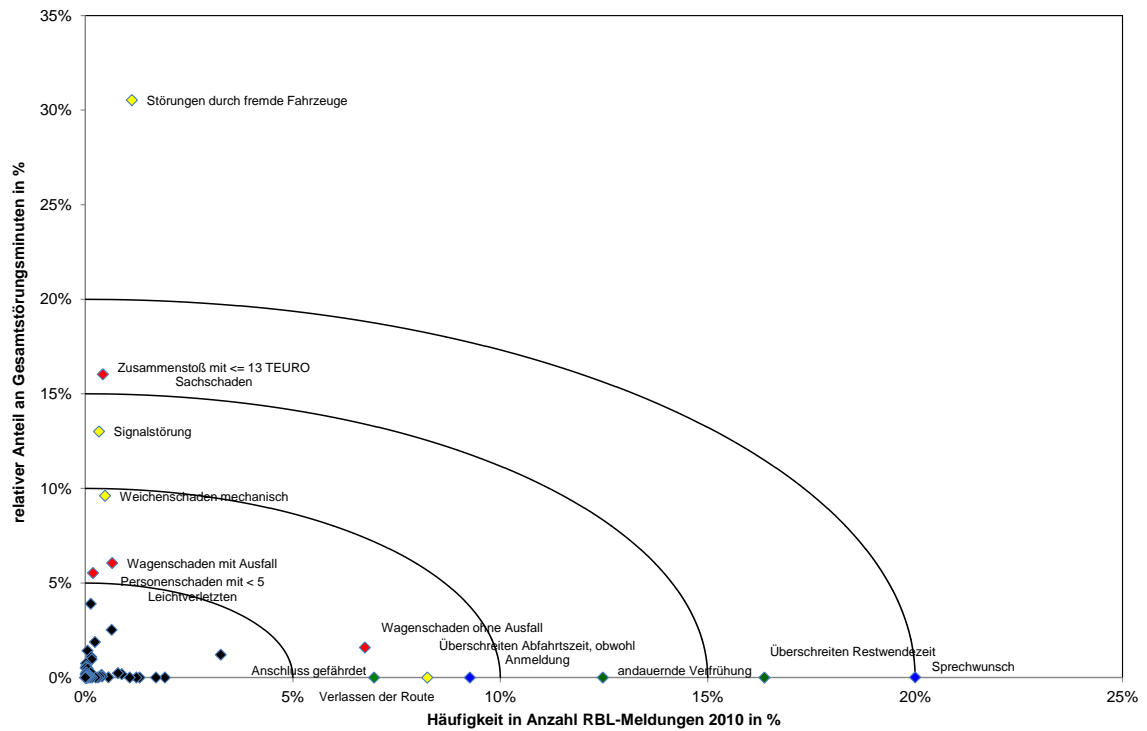


Abbildung 52: Distance der DVB-Daten 2010 bezüglich Störungsdauer ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

Störereignisklassen der DVB-Fallstudie mit $> 5\%$ Distance werden auch im Zuge der Störungsprognose noch näher betrachtet werden (siehe Kapitel 7.2.3). Ausgewertete Infrastrukturstörungen sind im Kapitel 6.2.3 aufbereitet.

Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau SVZ

Die Fallstudie in Zusammenarbeit mit den SVZ (siehe auch Kapitel 0) basiert auf den Mitschriften der Betriebsleitstelle. Dabei liegt eine Codierliste zugrunde. Abbildung 53 zeigt die Zuordnung der Ressourcen zu den Codes. Codeliste, Meldungsanteil und Anteil der Störungsdauer sind dabei fahrzeuglastig. Dies beruht allerdings weniger auf Zuverlässigkeits- oder Verfügbarkeitsproblemen: Die händische Datenerhebung, basierend auf dem Anfunken der Fahrer, unterschlägt offenbar verschiedene Kleinereignisse (z. B. nichtnutzbare Infrastruktur durch Rückstau für wenige Minuten, Überschreitung der Haltestellenaufenthaltszeit usw.). Dementsprechend sind vorrangig mittlere Ereignisse dokumentiert, oftmals als technische Störungsdauer²⁰. Die Vielzahl der Kleinereignisse bleibt eher verborgen.

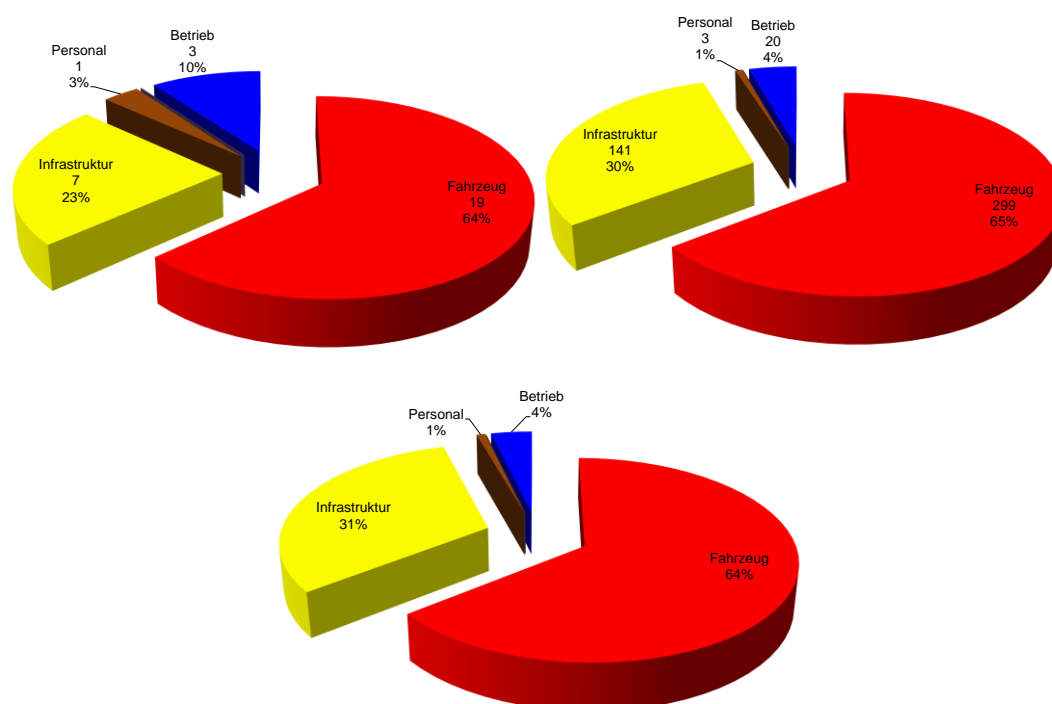


Abbildung 53: Ressourcenanteil von Codes (links oben), Meldungen (rechts oben) und Totalverspätungen (unten) der SVZ-Daten 2009 – 2011 (eigene Darstellung)

Die Distancebetrachtung dieser Fallstudie (siehe nachfolgende Abbildung 54) benennt ausnahmsweise auch drei Störereignisklassen unterhalb der sonst üblichen Betrachtungsgrenze von 5 % Distance, da die Gesamtanzahl der Ereignisklassen nicht so gross wie in den anderen Fallstudien ausfällt. Insgesamt dominieren Aspekte der Ressource Fahrzeug, gleichzeitig ist die im Stadtbahnbereich gegenüber der Vollbahn stärkere Interaktion mit dem übrigen Verkehr in Form von nicht nutzbarer Infrastruktur (z. B. Blockade, VKU fremd) ersichtlich.²¹

²⁰ Im Zuge der Auswertungen wurde der Winter 2010/2011 mit einem mehrtägigen Betriebsunterbruch der Stadtbahn nicht analysiert; dieser hätte andernfalls die gesamte Auswertung dominiert und die generelle Aussagefähigkeit in Mitleidenschaft gezogen.

²¹ VKU – Verkehrsunfall / FSB Federspeicherbremse / VKU Strab – Verkehrsunfall mit Strassenbahnbeteiligung, hierbei ist von einem Schaden am Fahrzeug auszugehen, daher Zuordnung zur Ressource Fahrzeug

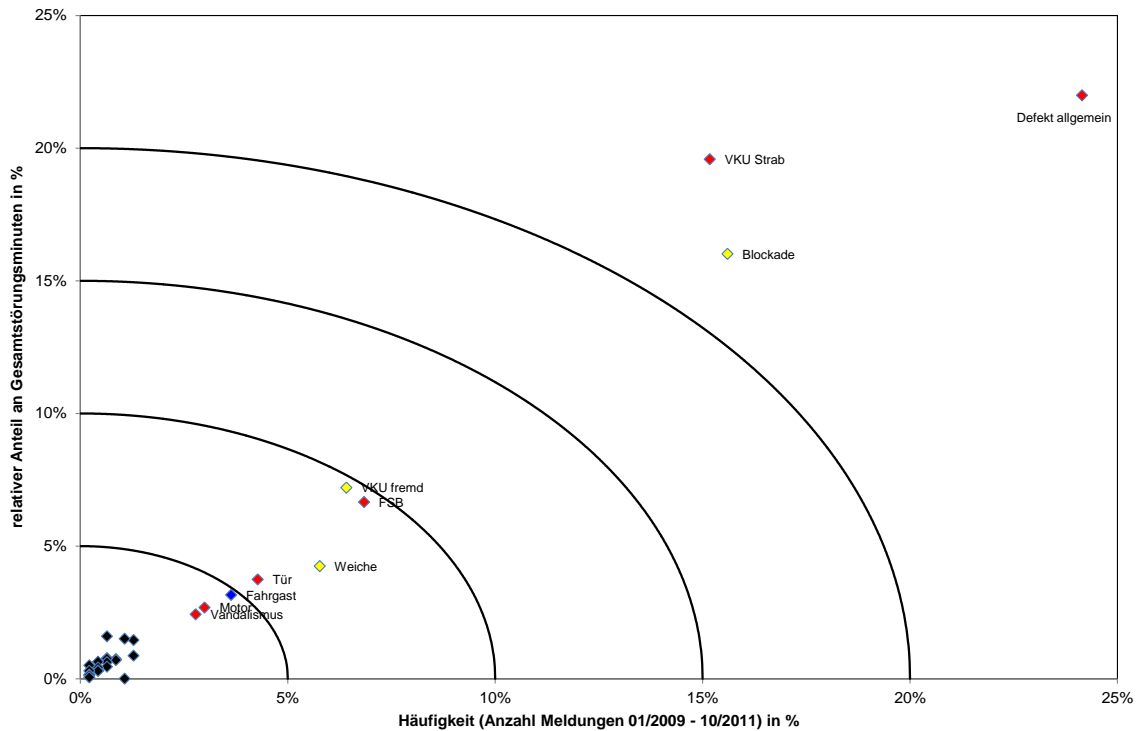


Abbildung 54: Distance der SVZ-Daten 2009 – 2011 bezüglich Störungsdauer ($\epsilon = 0.03$, eigene Darstellung)

Die Dominanz der Fahrzeugaspekte in Abbildung 54 motivierte zu einer Recherche der jeweils beteiligten Fahrzeugart. Dabei besteht die Stadtbahnflotte der SVZ im Betrachtungszeitraum aus zwei Gattungen, 12 Stück niederfluriger Stadtbahnwagen GT6M und 23 Stück hochfluriger Tatrawagen KT4D-C. Die Drehstromfahrzeuge GT6M fallen vor diesem Hintergrund in der Störungsstatistik überproportional auf (Tabelle 20).

Gattung	Fahrzeuge (2011)	Fahrzeugstörungen	Ausmass (min)
GT6M	12	157	6638
KT4D-C	23	127	5374
unbekannt	-	15	572
	2	35	299
		299	12584

Tabelle 20: Anteil der Fahrzeugstörungen nach Flotte (ohne VKU Strab, eigene Darstellung)

Die zugrundeliegende Laufleistung beider Teilflotten stand nicht zur Verfügung. Es ist jedoch zu vermuten, dass die anspruchsvollere Stromrichtertechnik, grundsätzlich mehr Fehler auslösen kann, auch wenn sie Stand der Technik ist.

5.2.3 Schlussbemerkungen zu den Fallstudien

Die vorangegangenen teilweise recht umfangreichen Fallstudien der Knotenpünktlichkeit und insbesondere jene mit den Praxispartnern weisen eine jeweils individuelle Charakteristik auf. Die Darstellungen sind absichtlich sehr ähnlich aufbereitet, wenn auch nicht identisch. Dies ermöglicht eine überblicksweise bessere Vergleichbarkeit zwischen den diversen Analysen.

Bei der Analyse von Häufigkeit und Ausmass der einzelnen Ereignisse zeigt sich die zunächst bereits vermutete Dominanz von Kleinereignissen auf der Seite der Häufigkeit. Demgegenüber treten eher wenige Ereignisse mit überproportional grosser (Störungs-) Dauer als Ausmass auf. Dieser Befund zeigt sich unisono in den Auswertungen der Bahnbetriebsführung.

Die Art und Weise der ursprünglichen Datenerfassung prägt wesentlich die Auswertbarkeit und Interpretierbarkeit der jeweiligen Ergebnisse. Somit ist in den Fallstudien der Praxispartner zu unterscheiden, ob (Störungs-) Daten bezüglich des Ereignisses oder bezüglich der einzelnen Fahrt erfasst werden. Im letzten Fall dominieren Folgeereignisse wie belegte Infrastruktur oder Verspätung vorausfahrender Züge das Störungsgeschehen. Die Dominanz prozessualer Aspekte aus der Ressource Betrieb tritt vor allem bei hoch belasteten Bahnnetzen mit entsprechend dichter Zugfolge zu Tage. Sollte keine automatische Erfassung von Störungsdaten beim Betreiber erfolgen, zeigen sich in den Auswertungen kaum Kleinereignisse unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze. Hier ist stark zu vermuten, dass dies eine direkte Folge der manuellen und tendenziell lückenhaften Datenerfassung darstellt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden im Weiteren einzelne Aspekte der Fallstudien aufgegriffen und ergänzend vertieft. Dazu bietet jedoch das vorliegende Kapitel eine kompakte Zusammenstellung der durchgeführten Analysen nebst den zentralen Ergebnissen.

5.3 Quantilevaluation

5.3.1 Anforderungen an Quantile

Im Kapitel 3.3 wurde die Stochastikinversion mit der daraus abgeleiteten Quantilbetrachtung hergeleitet. Dort wurde noch nicht diskutiert, welche Quantile aus der Bahnbetriebsforschung heraus zu begründen sind und für welche Störungskonstellation diese zu verwenden sind. Diese Aussagen werden nun aufbereitet und für den weiteren Umgang mit in den Fallstudien diskutierten Störereignisklassen benötigt.

Quantile als Parameter

Grundsätzlich ist das zu verwendende Störungsquantil ein wählbarer Parameter für die Unterschreitungswahrscheinlichkeit einer zu prognostizierenden Störungsdauer. Er beeinflusst für ein Ereignis einer bestimmten Störungsklasse die zu erwartende Störungsdauer, welche ihrerseits mit der Wahrscheinlichkeit genau dieses Quantils zwischen 0 und 1 maximal erreicht wird. Dabei entspricht das Quantil 0 der minimal beobachteten Störungsdauer einer Klasse, das Quantil 1 widerspiegelt das Maximum jeweils inklusive möglicher Ausreisser. Bereits aus dieser Überlegung wird deutlich, dass beide Extremwerte für die Störungsprognose nicht direkt verwendet werden sollten. Tabelle 21 gibt einen Überblick über die Einsätze und Konsequenzen verschiedener Quantile für die Zufallsgrösse der betrieblichen oder technischen Störungsdauer.

Quantil	Kleines Quantil	Mittleres Quantil	Grosses Quantil
Beispiel	0.20	0.50 (Median)	0.80
Aussage Unterschreitung (am Beispiel)	20 % der Ereignisse unterschreiten oder erreichen maximal diese Störungsdauer	gleich viele Ereignisse liegen unterhalb wie oberhalb dieser Störungsdauer	80 % der Ereignisse unterschreiten oder erreichen maximal diese Störungsdauer
Aussage Überschreitung (am Beispiel)	80 % der Ereignisse überschreiten diese Störungsdauer		20 % der Ereignisse überschreiten diese Störungsdauer
Konsequenzen	ermittelte Störungsdauer wird in Mehrzahl der Fälle überschritten	Störungsdauer wird (etwa) gleich oft überschritten wie unterschritten	ermittelte Störungsdauer wird in Mehrzahl der Fälle unterschritten

Tabelle 21: Grundlegende Aussagen kleiner, mittlerer und grosser Störungsquantile (eigene Darstellung)

Quantilanforderungen im Einzelnen

Aufbauend auf den genannten grundlegenden Zusammenhängen werden fortfolgend Anforderungen an Quantile für die Störungsprognose aufgestellt, welche in den darauffolgenden Ausführungen aufgegriffen werden.

1) Minimierung der Fälle mit realer Überschreitung der prognostizierten Werte

In der Bahnbetriebsführung sind Ereignisse ungünstig, welche die erwartete (im Sinne von prognostizierter) Ereignisdauer überschreiten. Dieses Überschreiten tritt unerwartet auf, die Betriebsführung wird somit überrascht und in aller Regel entsteht sofort ein Handlungsbedarf. Weiterhin hat die Entstörung bei Zeitüberschreitung postum schlechte Qualität, da unterreagiert wird. Da das einzelne Ereignis in seiner zeitlichen Ausprägung zumindest im operativen Geschäft kaum beeinflusst werden kann, ist die Störungsprognose derart zu kalibrieren, dass die unerwartete Prognoseüberschreitung möglichst nicht auftritt. Somit ist die Minimierung von Ereignissen, welche die Prognosedauer überschreiten, anzustreben und wird hier als Anforderung definiert.

2) Minimierung der Fälle mit realer Unterschreitung der prognostizierten Werte

So begründet die erste Anforderung aus betriebspraktischen Überlegungen heraus auch sein mag, sie allein genügt nicht: Für sich genommen würde sie dazu verleiten, möglichst hohe Quantile mit extrem hoher Unterschreitungswahrscheinlichkeit und entsprechend geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit zu wählen. Das dann höchstwahrscheinlich frühere Störungsende wäre zwar beherrschbar, indem die vorgesehenen Notfallkonzepte weiterhin aufrecht erhalten werden, jedoch stiften permanent zu hohe Störungsprognosen keinen operativen Mehrwert für die Bahnbetriebsführung, da sie zu unscharf ausfallen und somit anwendungsfern sind. Darüber hinaus sind die getroffenen Massnahmen zur Entstörung im Unterschreitungsfall deutlich überdimensioniert, zu aufwändig und somit tendenziell unwirtschaftlich. Aus diesen Gründen ist es eine weitere Anforderung, Unterschreitungen der prognostizierten Störungsdauer zu vermeiden. Dies ist ein Antagonismus zu Anforderung 1) und verlangt eine Optimierung.

3) Umgang mit Ausreißern durch Klassifizierung und Stochastik

Das Lernen aus Vergangenheitsdaten ist für die Lösung ähnlich gearteter aktueller Störungen hilfreich, es birgt aber Schwächen und Risiken. Jeder Störfall für sich weist individuelle Besonderheiten auf, die eine Übertragung auf ähnlich gelagerte Fälle erschweren können. Dabei kann der aktuelle Störfall in seiner Störungsklasse einen Ausreißer darstellen, der zunächst nicht erkennbar ist, aber anhand der statistischen Prognoseaspekte gegebenenfalls schlecht vorhersagbar ist. Andererseits kann eine Störungsdatenbank ihrerseits derartige Ausreißer enthalten, welche zuverlässige Prognosen erschweren. Zumindest diese Problematik lässt sich stark reduzieren, indem sowohl extrem hohe (> 0.95) als auch extrem tiefe (< 0.05) Quantile nicht in die Störungsprognose einfließen.

Weiterhin besteht ein prognoseerschwerendes Risiko in der fehlerhaften Klassifizierung. Damit ist insbesondere die Zuordnung eines Ereignisses zu einer falschen Störungsklasse gemeint, was sowohl irrtümlich als aus zunächst unzureichenden Informationen heraus geschehen kann. Beispielfhaft sei die nicht befahrbare Infrastruktur (Blockbelegung) angeführt, welche sich bei weiterer Recherche als Triebfahrzeugstörung eines vorausfahrenden Zuges entpuppt. Störungsklassen wie „allgemeiner Defekt“, „externer Einfluss“ usw. neigen ausserdem dazu, als Sammelbecken für Störungen aller Art missbraucht zu werden, um den Analyseaufwand scheinbar zu reduzieren. In

der Bottom-Up-Klassifizierung dieser Arbeit (siehe Kapitel 4.2.2) ist aus dieser Überlegung heraus keine allgemeingültige Störungsklasse enthalten, was diesen Effekt begrenzen soll.

Abwägung der Quantilanforderungen 1) und 2)

Der Umgang mit den Anforderungen 1) und 2) ist ein Abwägungsprozess, der von Bahnbetreiber zu Bahnbetreiber unterschiedlich gehandhabt werden kann. Werden beide Bedingungen exakt gleichberechtigt gehandhabt, resultiert das 0.50-Quantil, der Median. Dies mag zunächst praktikabel erscheinen, bedeutet aber, dass jede zweite Störung den Prognosewert real überschreitet, was angesichts des Risikos von Fehlentscheidungen kontraproduktiv ist und der Hierarchie dieser Bedingungen nicht gerecht wird. Daher ist Anforderung 1) n -fach gegenüber Anforderung 2) zu wichten, wobei $n > 1$ sein muss. Daraus resultiert für das relevante Störungsquantil Q :

$$Q = \frac{n}{n+1} \quad (18)$$

mit n Wichtungsfaktor Randbedingung 1 gegenüber 2 ganzzahlig
 Q relevantes Störungsquantil in 0 ... 1

Für $n = 2$ folgt beispielsweise $Q = 0.67$, für $n = 4$ resultiert $Q = 0.80$ usw. Bei hohen Quantilen steigt aufgrund der längeren Ereignisdauer der Aufwand für die Bahnbetriebsführung; es ist mit steigenden Kosten zu rechnen. Bei geringen Quantilen steigt die Wahrscheinlichkeit der Prognoseüberschreitung; es sinkt die Qualität der Bahnbetriebsführung. Tabelle 22 fasst diese Aspekte zusammen:

Quantil	Kleines Quantil	Mittleres Quantil	Grosses Quantil
Beispiel	0.10	0.50 (Median)	0.90
Betriebliche Reaktion	(zu) schwache Reaktion	angepasste Reaktion	(zu) starke Reaktion
Betriebliche Qualität	(zu) gering	angepasst	(zu) hoch
Betriebliche Kosten	(zu) gering	angepasst	(zu) hoch

Tabelle 22: Abwägung kleiner, mittlerer und grosser Quantile (eigene Darstellung)

Wenn man die Bereiche unterhalb des Medians und nahe 1 für die Störungsprognose ausschliesst, sind die Quantile am ehesten praxistauglich, da Ausreisser innerhalb der Störungsverteilung „abgeschnitten“ werden und somit ohne Wirkung für die Störungsprognose bleiben.

So anschaulich deren Herleitung auch ist, sie berücksichtigt nicht die einzelne technische und/oder betriebliche Störungsart und schon gar nicht mögliche weitere Erkenntnisse über die eingetretene Bahnbetriebsstörung. Daher ist die Quantilevaluation um den Einfluss weiterer Parameter zu ergänzen. Die hier aufgestellten Anforderungen sind dort ebenso zu beachten, wenngleich deren Berücksichtigung in anderer Form erfolgen wird.

5.3.2 Prognosefähigkeit, Prognosekennzahl und Störungsquantil

Die Prognosefähigkeit (bzw. die Prognosefähigkeitszahl) und die daraus entwickelte Prognosekennzahl sind thematisch eng verwandt. Die Prognosefähigkeit ist allerdings einzig von der Ereignisart abhängig, während die Prognosekennzahl konkrete Randbedingungen der (Ent-) Störung einbezieht. Zum besseren Verständnis dieses Ansatzes wird zunächst auf die Prognosefähigkeit eingegangen, dann die Prognosekennzahl entwickelt und abschliessend das Störungsquantil abgeleitet:

$$\text{Prognosefähigkeit} \rightarrow \text{Prognosekennzahl} \rightarrow \text{Störungsquantil} \quad (19)$$

Prognosefähigkeit

Die Prognosefähigkeit gibt an, wie gut die Dauer einer Bahnstörung vorhersagbar sein wird. In Form der Prognosefähigkeitszahl ist sie die von der Ereignisart abhängige Grundlage der Prognosekennzahl. Die aktuelle Bahnbetriebsforschung zeigt für einige Störungsklassen eine recht gute Prognosefähigkeit, was sich in der Übereinstimmung der prognostizierten mit den realen Störungsdauern widerspiegelt (siehe auch Kapitel 7.2.3 und Bahnsuizide in Kapitel 6.2.3). Für einige Ereignisklassen gestaltet sich die Störungsprognose allerdings schwieriger. Die diesbezügliche Ursachensuche mündete darin, Kriterien der Prognosefähigkeit aufzustellen, unter denen eine zutreffende Störungsprognose gelingen kann. Folgende Aspekte konnten sowohl für technische als auch für betriebliche Störereignisse identifiziert werden:

- Klassifizierung (Ursache und Wirkung der Störung)
- Priorisierung (aktuelle Dringlichkeit der Entstörung)
- Standardisierung (Vorgehen, Abfolge und involvierte Stellen der Entstörung)

Zur Einordnung der Prognosefähigkeit auf Grund dieser Aspekte wurde eine ABC-Analyse (siehe Kapitel 3.4.1) durchgeführt, um die jeweilige Ausprägung einzugrenzen. Somit konnten identifiziert werden:

- Klassifizierung**
- A)** Ursache und Wirkung bekannt
 - B)** Ursache oder Wirkung bekannt
 - C)** verstreute Informationen

Die Klassifizierung beeinflusst die Störungsdauer, da erst bei detaillierter Diagnose bezüglich Ursache und Wirkung eines Ereignisses eine präzise Störungsprognose erarbeitet werden kann. Dazu sollten Ressource, System, Subsystem, die betroffene Komponente (optional) und die Schadensart bekannt sein. Sollten nur Ursache oder Wirkung eines Ereignisses bekannt sein, ist eine Störungsprognose noch gut möglich. Schwieriger und damit unpräziser wird die Prognose, sollten lediglich einzelne unvollständige Informationen vorliegen.

- Priorisierung**
- A)** sofortige Entstörung (Intervention oder Disposition)
 - B)** zeitnahe Entstörung (Intervention oder Disposition)
 - C)** gelegentliche Entstörung (Intervention oder Disposition)

Sollte die technische oder betriebliche Entstörung keine Priorität geniessen, ist davon auszugehen, dass die Entstörung bedingt durch den verzögerten Entstörprozess länger dauert und die reale Störungsdauer vergrössert wird. Die ABC-Abstufung wurde mit sofortiger Entstörung, zeitnaher Entstörung bei nächster Möglichkeit und gelegentliche Entstörung im Sinne von „Wenn einmal Zeit sein sollte“ definiert.

- Standardisierung**
- A)** einheitlich definierte Detailprozesse
 - B)** bestehende (Grob-) Konzepte
 - C)** Massnahmen offen

Der Grad der Standardisierung beeinflusst die Dauer der Entstörung. Sind Vorgehen, Abfolge und involvierte Stellen bekannt, entfällt die Lösungssuche, was die Entstörung beschleunigt. Im Gegensatz zu Ereignissen mit einheitlich definierten Detailprozessen, verlängert sich die betriebliche bzw. technische Entstörung, sobald dazu lediglich grobe Konzepte bestehen. Die Lösungssuche beeinflusst die (Ent-) Störungsdauer massiv, sobald jegliche Massnahmen offen und folglich erst zu eruieren sind.

Die Aspekte dieser ABC-Analyse werden nun als linear unabhängige Vektoren interpretiert und widerspiegeln somit Dimensionen. Dazu wird den Ausprägungen A, B und C gemäss Kapitel 3.4.2 eine Quantifizierung zugeordnet ($A \rightarrow 1.0 / B \rightarrow 0.5 / C \rightarrow 0.0$). Es ist grundsätzlich denkbar, eine alternative Quantifizierung vorzunehmen; der Vorteil der hier vorgestellten Variante besteht jedoch in der Normierung der ermittelten Grösse auf den Bereich zwischen 0 und 1. Die grafische Darstellung in Abbildung 55 illustriert diese Betrachtungsweise:

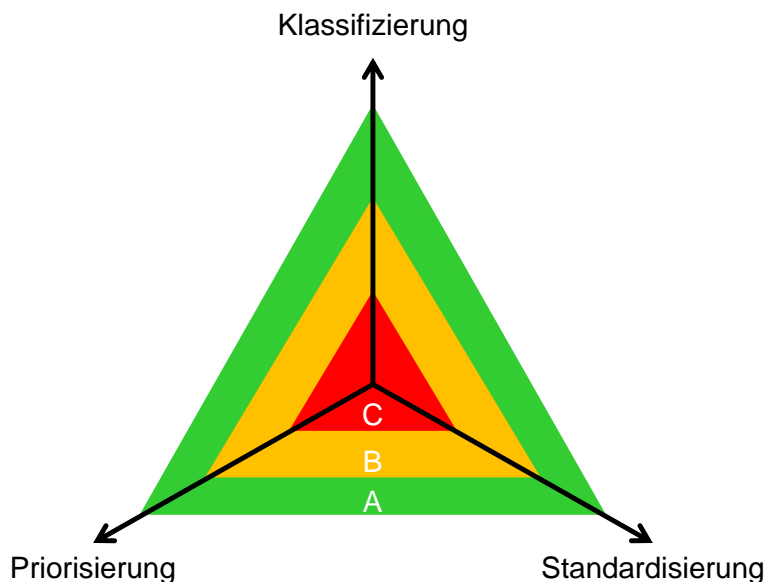


Abbildung 55: Vektoren der Prognosefähigkeit (eigene Darstellung)

Die dargelegten Überlegungen bilden nun die Grundlage, ein Mass für die Prognosemöglichkeit zu berechnen, welches als Prognosefähigkeitszahl (*PFZ*) bezeichnet wird. Für die Berechnung der *PFZ* gilt auf Basis der Vektorinterpretation von Klassifizierung, Priorisierung und Standardisierung nunmehr:

$$PFZ = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2}}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

mit	<i>K</i>	Mass für Klassifizierung	in 0 ... 1
	<i>P</i>	Mass für Priorisierung	in 0 ... 1
	<i>PFZ</i>	Prognosefähigkeitszahl	in 0 ... 1
	<i>S</i>	Mass für Standardisierung	in 0 ... 1

Die Prognosefähigkeitszahl hängt ausschliesslich von der Art der Störungsfälle ab. Die betragsmässige Substitution von Dimensionen untereinander ist möglich, jedoch nicht die einfache Kompensation: Eine sehr gute Dimension (A) überkompensiert beispielsweise zwei mittlere Dimensionen (B).

Prognosesicherheit mit Prognosekennzahl

Die Prognosesicherheit für den einzelnen Störfall baut auf der Prognosefähigkeit der jeweiligen Ereignisklasse auf, bezieht aber konkrete Aspekte des jeweils einzelnen Störfalles mit ein. Daraus wird anschliessend und unmittelbar das Störungsquantil abgeleitet.

Zur Herleitung dieses Quantils sind Aussagen zur Prognosefähigkeit notwendig, aber nicht hinreichend. Des Weiteren ist eine Überführung der Prognosefähigkeitszahl in das relevante Quantil nicht direkt möglich: Bei hoher *PFZ* (Standardisierung / Klassifizierung / Priorisierung hoch) kommt nicht das hohe Quantil mit hoher Störungsdauer, sondern ein niedriges Quantil in Frage, da hier eher nicht mit grossen Störungsdauern zu rechnen sein wird. Dies wird bereits in der Prognosekennzahl berücksichtigt.

Nicht zuletzt ist für alle Störungsfälle zwischen technischer und betrieblicher Störungsdauer zu unterscheiden. Zur Lösung dieser Problemstellung werden die aus der Prognosefähigkeit bekannten Dimensionen nunmehr invers quantifiziert und um je eine Dimension ergänzt. Für die technische Störungsdauer ist dies die Art der Intervention, für die betriebliche Störungsdauer sind dies die verfügbaren Alternativressourcen. Diese zusätzlichen Dimensionen werden ebenso einer ABC-Analyse unterzogen.

- Intervention**
- A)** Ferneingriff
 - B)** Eingriff an definiertem Ort (z. B. Werkstatt)
 - C)** Eingriff am Ereignisort

Die Interventionsart liefert Aussagen über die Bedeutung der Logistik für die technische Entstörung. Idealerweise ist dazu ein Ferneingriff möglich; dann ist die Logistikbedeutung eher klein. An einem definierten Ort wie der Werkstatt bestehen in der Regel definierte Konzepte zum Aufbieten von Personal und Ausrüstung. Schwierig ist die Intervention am Ereignisort, da hierzu die konkrete Anfahrt zu eruieren ist.

- Alternativressourcen**
- A)** 4 – 5 Ressourcen verfügbar („wahlfrei“)
 - B)** 2 – 3 Ressourcen verfügbar („anspruchsvoll“)
 - C)** 0 – 1 Ressource verfügbar („aussitzen“)

Für die betriebliche Entstörung sind die verfügbaren Alternativressourcen massgebend. Bestehen vollumfänglich Alternativen zum ursprünglich geplanten Betriebsprogramm, ist der Disponent wahlfrei. Sollten nur wenige Ressourcen zur Verfügung stehen, wird der betriebliche Entstörvorgang bereits anspruchsvoller. Bei keiner oder nur einer Alternativressource (z. B. vorhandener Ersatzzug, aber kein Personal, keine Fahrplantrasse, keine Umleitungsstrecke und auch keine betriebliche Flexibilität), kann das Ereignis quasi nur ausgesessen werden und es findet praktisch keine aktive betriebliche Entstörung statt.

Soll die Prognosekennzahl PKZ nun eine Implikation auf das relevante Quantil erlauben, so ist eine inverse Quantifizierung der ABC-Analyse vorzunehmen:

$$A \rightarrow 0.0 \quad / \quad B \rightarrow 0.5 \quad / \quad C \rightarrow 1.0 \quad (21)$$

Die Berechnung der PKZ erfolgt dann in Anlehnung an die Überlegungen zur Prognosefähigkeit, ist aber in technische und betriebliche Prognose zu untergliedern (siehe Index):

$$PKZ_t = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2 + I^2}}{\sqrt{4}} \quad PKZ_b = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2 + R^2}}{\sqrt{4}} \quad (22)$$

mit	I	Mass für Interventionsart	in 0 ... 1
	K	Mass für Klassifizierung*	in 0 ... 1
	P	Mass für Priorisierung*	in 0 ... 1
	PKZ_b	betriebliche Prognosekennzahl (Mass für Prognosesicherheit)	in 0 ... 1
	PKZ_t	technische Prognosekennzahl (Mass für Prognosesicherheit)	in 0 ... 1
	R	Mass für verfügbare Ressourcen	in 0 ... 1
	S	Mass für Standardisierung*	in 0 ... 1

* gegenüber PFZ inverse Quantifizierung beachten

Dementsprechend ist nunmehr auch die grafische Dimensionsdarstellung der Prognosekennzahl für betriebliche beziehungsweise für technische Fragestellungen zu separieren (Abbildung 56 und Abbildung 57). Für jedes Störereignis ist nun zu prüfen, wie Priorisierung, Klassifizierung und Standardisierung ausgeprägt sind sowie welche Interventionsstrategie (technische Störung) bzw. welche Alternativressourcen (betriebliche Störung) zur Verfügung stehen. Je stärker diese vier Dimensionen ausgeprägt sind, umso weiter wandert die konkrete Einschätzung der jeweiligen Dimension vom Mittelpunkt des Quadrats an den Rand. Entsprechend entwickelt sich die Prognosekennzahl vom Maximum 1.0 in Richtung des Minimums von 0,0. Ebenso fällt das für den Einzelfall anzuwendende Störungsquantil vom Maximum (1.0) ab und fällt kleiner aus, wie noch gezeigt wird.

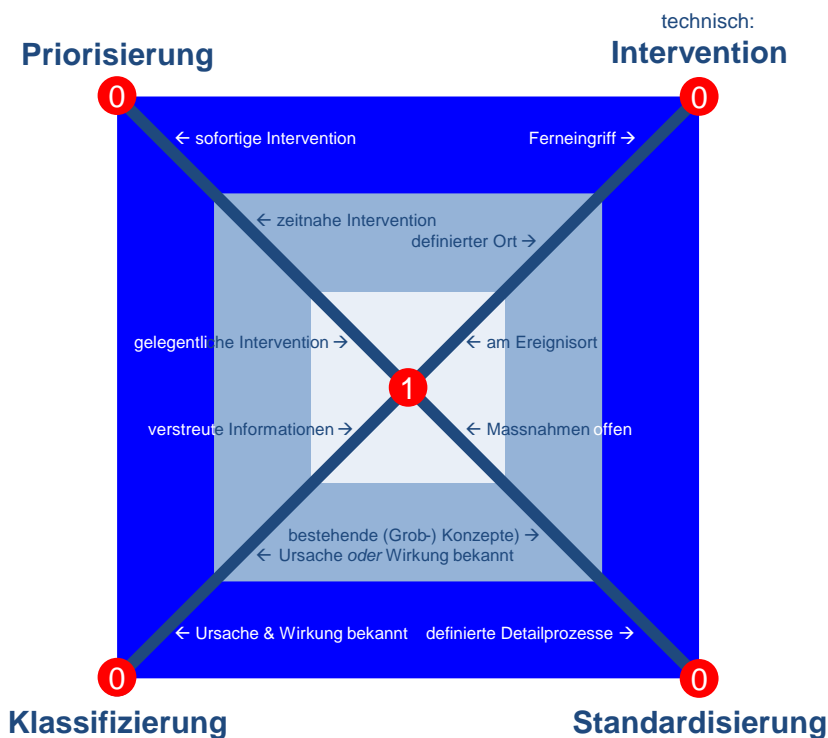


Abbildung 56: Visualisierung der Vektoren der technischen Prognosekennzahl PKZ (eigene Darstellung)

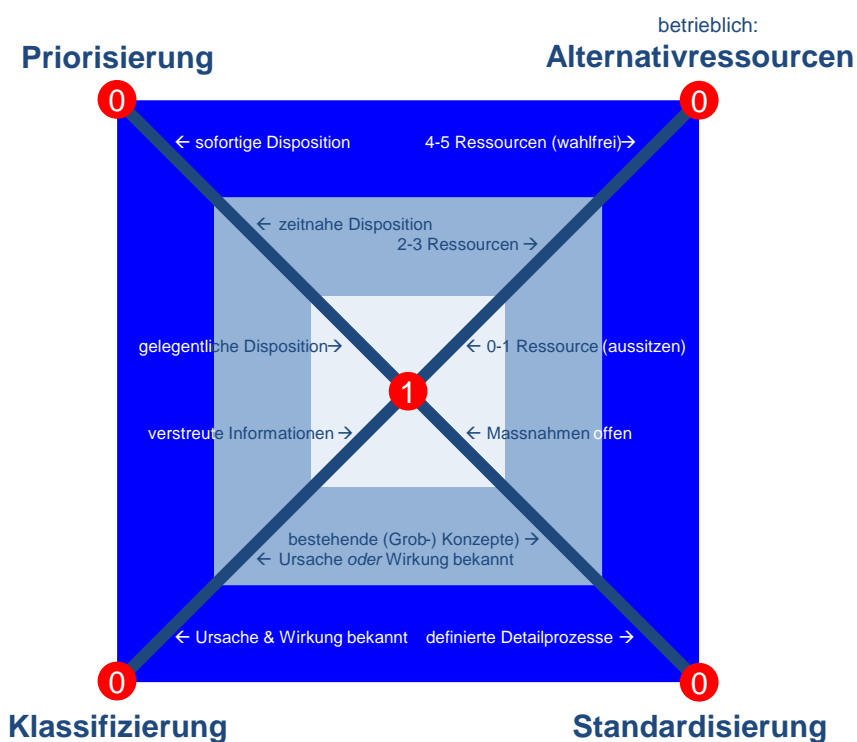


Abbildung 57: Visualisierung der Vektoren der betrieblichen Prognosekennzahl PKZ (eigene Darstellung)

Mit diesen jeweils vier Dimensionen wird ein Rückschluss auf die mutmassliche technische bzw. betriebliche Störungsdauer möglich, da neben der Störungsart auch das Wesen des Einzelfalls in die Analyse einbezogen wird. Der Ereignisort wird dabei indirekt über die Wahl der Interventions-

art abgebildet. Dabei impliziert die Entstörung am Ereignisort bei sonst gleichen Ereignissen einen höheren Wert der prognostizierten Störungsdauer als eine Entstörung per Ferneingriff. Im betrieblichen Teil spielt der Ereignisort in die Infrastruktur als Alternativressource hinein. So kann die Störung von Folgezügen möglicherweise umfahren werden. Das aktuelle Wettergeschehen wird über die Standardisierung (z. B. Treffen weiterer Vorkehrungen vor der Störungsbehebung) oder über die Priorisierung (z. B. Verschieben der Störungsbehebung bei Extremwitterung) indirekt in Betracht gezogen.

Störungsquantil

Der Übergang von der Prognosekennzahl auf das relevante Störungsquantil ist nun einfach möglich, da lediglich der Median als Untergrenze (siehe auch Kapitel 5.3.1) einzuhalten ist. Dies rührt daher, dass Prognoseangaben unterhalb des Medians praxisfern sind, da sie in über der Hälfte der Fälle überschritten werden und daher nicht zutreffen.

$$Q_t = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ PKZ_t \end{array} \right. \quad Q_b = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ PKZ_b \end{array} \right.$$

$$Q_t = \text{MAX} \left\{ \frac{0.50}{\sqrt{\frac{K^2+P^2+S^2+I^2}{4}}} \right. \quad Q_b = \text{MAX} \left\{ \frac{0.50}{\sqrt{\frac{K^2+P^2+S^2+R^2}{4}}} \right. \quad (23)$$

mit Q_b betriebliches Störungsquantil in 0.5 ... 1.0
 Q_t technisches Störungsquantil in 0.5 ... 1.0

Die beschriebene Kombination aus vektorieller Analyse der Störungsart und des Einzelfalls trägt dazu bei, dass für jede individuelle Störung nebst ihrem technischen bzw. betrieblichen Behebungskonzept ein individuelles Störungsquantil ermittelt und begründet werden kann. Dies unterstützt eine realitätsnahe Störungsprognose.

Dimension 1	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Dimension 2	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Dimension 3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Dimension 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	1.0	1.0
PKZ	0.00	0.25	0.35	0.43	0.50	0.50	0.56	0.61	0.66	0.71	0.75	0.79	0.87	0.90	1.00	1.00
Q	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.56	0.61	0.66	0.71	0.75	0.79	0.87	0.90	1.00	1.00

Tabelle 23: Evaluation des technischen bzw. betrieblichen Störungsquantils aus der PKZ (eigene Darstellung)

Die obenstehende Tabelle 23 zeigt abschliessend auf, welche Werte die Prognosekennzahl PKZ annehmen kann und wie daraus kontextabhängig zehn verschiedene Störungsquantile zwischen 0.5 und 1.0 für die konkrete Störungsprognose eines Störereignisses resultieren. Die Applikation dieser Überlegungen erfordert möglichst detaillierte Informationen über den Störfall als auch über die dahinter liegenden Randbedingungen. Die Klassifizierung bestimmt die jeweils zugrunde zu legende Verteilung der Störungsdauer auf Basis gleichartiger Ereignisse in der Datenbank des jeweiligen Betreibers.

Beispielhaft soll die Ermittlung der Prognosekennzahl einer Triebfahrzeugstörung gezeigt werden (vgl. Abbildung 17 auf Seite 54). Im Fall der Triebfahrzeugstörung ist betrieblich ersichtlich, dass der Zuglauf zunächst nicht wie geplant fortgesetzt werden kann. Die Klassifizierung ist einigermassen

ssen klar, auch wenn die technischen Details zunächst noch nicht bekannt sind. Daher wird die Klassifizierung mit Level B bewertet. Die Priorisierung ist beispielsweise hoch, Level A. Zur Entstörung bestehen checklistenbasierte Verfahren, so dass von Level A ausgegangen wird. Angenommen es bestehen zwei Ressourcen zur betrieblichen Entstörung (Information, Betrieb), dann sind die Alternativressourcen auf Level B. Gemäss Tabelle 23 folgt für zweimal Level A und zweimal Level B die Prognosekennzahl 0.79 und das betriebliche Störungsquantil 0.79. Anhand der beispielhaften Werte in Abbildung 17 ist von einer Störungsdauer von zwölf Minuten auszugehen. Diese Angabe bezieht sich auf die zu erwartende Primärverspätung. Wären mehr betriebliche Alternativressourcen verfügbar und das genaue Schadensbild bekannt, wäre ein kleineres Quantil (geringere Unterschreitungswahrscheinlichkeit) und entsprechend eine kleinere zu erwartende betriebliche Störungsdauer anzusetzen.

5.3.3 Stetige Quantilermittlung

Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung des relevanten Quantils besteht in einer Form der Wahrscheinlichkeitstheorie. Ziel ist es dabei, einen stetigen Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten und dem daraus abgeleiteten relevanten Störungsquantil einer beliebigen Störungsklasse herzustellen. Der hier zu verwendende Variationskoeffizient ist ein Streuungsmass. Er selbst ist das dimensionslose Ergebnis der Division von Standardabweichung und Mittelwert einer beliebigen Zufallsgrösse.

$$VX = \frac{s_x}{x_m} \quad (24)$$

mit	s_x	Standardabweichung	[Zufallsgrösse]
	VX	Variationskoeffizient	-
	x_m	Mittelwert	[Zufallsgrösse]

Der Variationskoeffizient als statistische Kenngrösse ist nach unten beschränkt auf 0 und zumindest theoretisch nach oben offen. Im hypothetischen Fall einer Ereignisklasse mit keinerlei Streuung werden die Standardabweichung und daraufhin auch der Variationskoeffizient null.

Im Zuge dieser Arbeit wurden über 100 Störungsklassen verschiedener Bahnbetreiber untersucht. Die folgende Abbildung 58 zeigt auf, wie sich deren Variationskoeffizienten verteilen. Über 90 % der Ereignisklassen weisen einen Variationskoeffizienten kleiner als 6.0 auf, was an sich ein recht hoher Wert ist. Er zeigt, in welchem Bereich die stetige Quantilberechnung mindestens erfolgt.

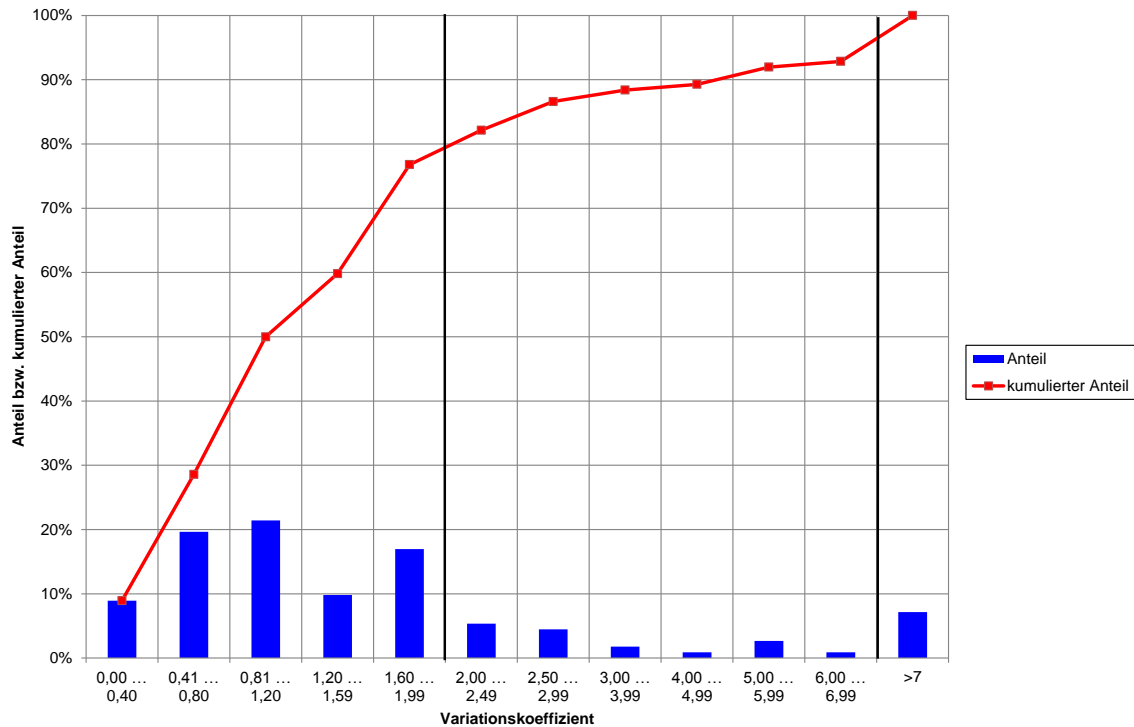


Abbildung 58: Variationskoeffizient der untersuchten Störungsklassen (eigene Darstellung)

Um nun eine geeignete Funktion vorzuschlagen, sind die Anforderungen aus Kapitel 5.3.1 und jene Aspekte des Variationskoeffizienten zu verknüpfen. Dabei bildet der Median die Untergrenze relevanter Quantile und wird lediglich für Störungsklassen mit sehr grosser Streuung verwendet. Für gering streuende Ereignisklassen ($VX \rightarrow 0$) kann ein höheres Quantil ($Q \rightarrow 1$) verwendet werden, wodurch die Unterschreitungswahrscheinlichkeit und damit die Prognosesicherheit steigen. Für einen aufzustellenden funktionalen Zusammenhang zwischen Variationskoeffizient (Streuung) und Störungsquantil sind dies die Grenzwerte. Für die Bahnproduktion bedeutet dies, dass die Sicherheit hinter einzuleitenden Entstörungsmassnahmen wächst. Als Funktionstyp kommt hierfür eine Form der Exponentialfunktion in Frage, welche bei Variationskoeffizienten nahe null (extrem geringe Streuung) gegen eins und bei Variationskoeffizienten > 5 gegen 0.5 (Median) streben sollte. Folgende Randbedingungen gelten:

- Definitionsbereich $D = \{VX \mid VX \in \mathbb{R}_+\}$ (keine Existenz negativer VX)
- Wertebereich $W = \{Q \mid 0,5 \leq Q \leq 1\}$ (Median bis Maximum Störungsdauer)
- Stetigkeit (stets eindeutige Zuordnung erlauben)
- Grenzwert $\lim_{VX \rightarrow \infty} Q = 0,5$ (Medianasymptote bei grossen VX)

Eine derartige Funktion, welche obige Bedingungen erfüllt, sollte wie folgt ausfallen:

$$Q = 0.5 \cdot e^{-0.5 \cdot VX} + 0.5 \quad (25)$$

Mit diesem Ansatz werden zwar zurückliegende Streuungen einer Zufallsgrösse bei der Quantilauswahl ohne weitere subjektive Einschätzungen berücksichtigt, jedoch findet die Art des

aktuellen Einzelfalls keine Berücksichtigung. Des Weiteren ist bei diesem Ansatz sehr genau zu interpretieren, welcher Wert berechnet wurde:

- geringe Streuung (VX klein) \rightarrow grosses Quantil \rightarrow grosse Störungsdauer
- grosse Streuung (VX gross) \rightarrow mittleres Quantil \rightarrow mittelgrosse Störungsdauer

Gering streuende Störungsklassen führen in der vorliegenden Logik zu hohen Prognosequantilen, was sich in einer hohen Unterschreitungswahrscheinlichkeit *und* in einer hohen prognostizierten Störungsdauer ausdrückt. Damit beeinflusst die Einschätzung über die Streuung der Zufallsgrösse Störungsdauer indirekt die prognostizierte Störungsdauer bei sonst identischen Randbedingungen. Dies kann bei Praxisanwendungen leicht zu Missverständnissen führen, weshalb Ansatz gemäss Kapitel 5.3.2 zu präferieren ist.

5.4 Zwischenfazit zum Kapitel 5

Ausgehend von den Klassifizierungsregeln und den prognoserelevanten Störungszeiten im Kapitel 4 werden im vorliegenden Kapitel 5 verschiedene Störungsdaten analysiert. Die Distance liefert einen methodischen Ansatz, um hinsichtlich Häufigkeit oder Ausmass kritische Störereignisse zu identifizieren. Dies wurde in den Fallstudien mit den Forschungspartnern sowohl für technische als auch für betriebliche Störungen im Voll- und Stadtbahnbereich durchgeführt. Untersuchungen zur Knotenpunktpünktlichkeit vermitteln einleitend einen Eindruck des netzweiten Verspätungsgeschehens in ausgewählten Bahnnetzen.

Für die Störungsprognose ist vor allem die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Störungsdauer eines Ereignisses aus der jeweiligen Störungsklasse von Interesse. Diese Betrachtung führt auf Quantile, an welche im Kontext der Bahnbetriebsforschung mehrere Anforderungen zu stellen sind. Die Umsetzung dieser Anforderungen erfordert jedoch weitere Überlegungen für die Quantilevaluation. Ergänzend zu anderen Ansätzen erweist es sich als besonders realitätsnah, neben der Ereignisklasse auch die Rahmenbedingungen des aktuellen Störereignisses in die Störungsprognose einzubeziehen. Die Überlegungen der generellen Prognosefähigkeit münden daraufhin in eine betriebliche und eine technische Prognosekennzahl, welche diese Rahmenbedingungen abbildet. Daraus folgt unmittelbar das Störungsquantil des jeweiligen Ereignisses. Die vektorielle Interpretation der klassifizierten Bewertung von Priorisierung, Standardisierung und Klassifizierung nebst den betrieblichen (Alternativressourcen) und technischen (Interventionsstrategie) Randbedingungen einer Störung ermöglicht als Vorzugsvariante dieses Kapitels die Evaluation des jeweils passenden Störungsquantils für die einzelne Prognose.

6 Beheben von Störungen

6.1 Betriebliche Störungsbehebung (Disposition)

6.1.1 Elementare Dispositionsmaßnahmen

Das vorliegende Kapitel zielt auf die Behebung von Störereignissen ab. Dazu sind drei Aspekte zentral und in dieser Abfolge vorzustellen: Zunächst wird auf die betriebliche Störungsbehebung, also die Disposition (Kapitel 6.1), eingegangen. Dazu werden zunächst die Dispositionsalternativen herausgearbeitet und anschliessend evaluiert. Hierbei ist der Frage nachzugehen, welche Dispositionsmaßnahmen bestehen und unter welchen Randbedingungen welche Massnahme zu ergreifen ist. Einen weiteren Schwerpunkt bietet die technische Entstörung in Form der Intervention (Kapitel 6.2). Auch hier sind diverse Formen aufzuzeigen; weiterhin wird ein generischer Interventionsprozess abgeleitet. Der Kommunikation im Ereignisfall im Interesse des Ausgleichs von Informationsasymmetrien widmet sich ein dritter Aspekt der Störungsbehebung (siehe Kapitel 6.3). Hierbei wird zwischen innerbetrieblicher Kommunikation und jener mit den Endkunden unterschieden. Die Identifikation dieser drei zentralen Folgeprozesse der eigentlichen Störungsprognose ist für den späteren Prognoseprozess zentral. Wichtige Erkenntnisse aus Disposition, Intervention und Kommunikation werden in den aufzubauenden generischen Prognoseprozess direkt eingebunden.

Im Störungsfall kommt der Disposition eine zentrale betriebliche Rolle zu. Die Disposition leistet quasi die Übersetzung des geplanten Betriebsablaufs in einen realen Betriebsablauf unter der Randbedingung konkreter (Stör-) Ereignisse (Schranil, et al., 2012). Analysiert man Dispositionsentscheidungen hinsichtlich der grundlegenden elementaren Massnahmen, verbleibt eine endliche Massnahmenanzahl, welche aus der Spurgebundenheit der Bahnen resultiert (siehe Kapitel 2.1.3). Dabei lassen sich ähnliche Massnahmen komprimieren, da oft lediglich die Bezeichnung einer Massnahme von Betreiber zu Betreiber verschieden ist, beispielsweise „beschleunigen“ und „priorisieren“. Ziel dieser Überlegungen ist es nun, elementare Dispositionsmaßnahmen aufzuzeigen. Anhand eigener betrieblicher Beobachtungen, Expertengesprächen (Strässle, 2011), Literatur (Ullius, 2005) und Datenauswertungen folgen diese Elementarmassnahmen:

Ressource Fahrzeug

- Ersatzzug geplanter Zuglauf mit Alternativfahrzeugen
- Sonderzug i. S. v. Entlastungszug, Extra-/Zusatzzug, Charterverkehr

Ressource Information

- Anschlüsse aufheben Verzicht auf Umstiegsgewährung
- Reisendenlenkung Endkundenführung über Alternativverbindung

Ressource Infrastruktur

- Umleitung Fahrt über abweichende Strecke
- zusätzlicher Halt Einfügen eines kommerziellen Halts

Ressource Betrieb

- Ausfall Entfallen eines Zuges
- Beschleunigen/Priorisieren betriebliches Bevorzugen eines Zuges
- Dienstfahrt/Leerzug nichtkommerzielle Fahrt
- Halt auslassen Ausfallen eines kommerziellen Halts
- Kurzwende/Inselbetrieb Einkürzen des aktuellen und späteres Beginnen des Folgezuglauf, ggf. beidseits der Störung
- Verspätung/Isolation betriebliche Unterordnung eines Zuges
- kein Eingriff Verzicht auf dispositive Mittel

Die Ressourcenzuordnung vom zusätzlichen Halt zur Infrastruktur folgt aus der dafür notwendigen Nutzung weiterer Anlagen (z. B. Bahnsteig), während das Weglassen eines Halts vor allem prozessuale Aspekte aufweist und daher dem Betrieb zugeordnet wird. Fortfolgend sind nun Auswirkungen dieser 13 elementaren Dispositionsmaßnahmen zu eruieren. Dabei sind die Perspektive des Bahnbetreibers und jene der Endkunden (vor allem im Personenverkehr) separat einzunehmen. Aus Sicht des Bahnbetreibers (Ersteller) ist hierbei die zusätzliche Zeit, welche im Dispositionsfall gegenüber dem aktuellen Betriebsprogramm benötigt wird, von Interesse. Für den Endkunden (Nutzer) steht die zusätzliche Zeit innerhalb des Bahnsystems im Fokus (vgl. Reisezeit im Personenverkehr). Tabelle 24 zeigt die Massnahmenübersicht. Entsprechend obiger Beschreibung sind die Dispositionsmaßnahmen nebst der relevanten Ressource systematisiert. Der Zeitbedarf für den Ersteller und den Nutzer (Endkunden in Form von Fahrgast oder Verloader) ist aufgezeigt. Verschiedene Massnahmen ermöglichen dabei eine Quantifizierung der zeitlichen Auswirkung anhand elementarer fahrdynamischer Zusammenhänge; diese sind mit „Formel“ gekennzeichnet und werden nun erläutert. Ebenso sind gemäss der Top-Down-Klassifizierung (siehe Kapitel 4.3.3) die minimalen Verspätungsklassen angegeben, die einen Einsatz der jeweiligen Dispositionsmaßnahme praktischerweise rechtfertigen.

Dispositionsmaßnahme	Ressource	Zeitbedarf Ersteller	Zeitbedarf Nutzer	minimale Verspätungsklasse
Ersatzzug Sonderzug	Fahrzeug Fahrzeug	Formel (bzgl. a, v) -	Formel (bzgl. a, v) maximal $\frac{2}{3}$ Taktzeit	T4 ("halbe Taktzeit") T3 ("Taktzeit")
Anschlüsse aufheben Reisendenlenkung	Information Information	Reduktion Aufenthalt -	Taktzeit ggf. Umsteigezeit	T5 ("viertelste Taktzeit") T4 ("halbe Taktzeit")
Umleitung zusätzlicher Halt	Infrastruktur Infrastruktur	Formel Formel	Formel Formel	T3 ("Taktzeit") T3 ("Taktzeit")
Ausfall Beschleunigen/Priorisieren	Betrieb Betrieb	- negative Reserve	Taktzeit negative Reserve	T3 ("Taktzeit") T6 ("Pünktlichkeitsgrenze")
Dienstfahrt/Leerzug Halt auslassen	Betrieb Betrieb	Formel Formel	Taktzeit Taktzeit/Formel	T3 ("Taktzeit") T3 ("Taktzeit")
Kurzwende/Inselbetrieb Verspätung/Isolation	Betrieb Betrieb	- maximal 10 Minuten	\leq Taktzeit maximal 10 Minuten	T3 ("Taktzeit") T3 ("Taktzeit")
kein Eingriff	Betrieb	-	Verspätung	alle

Tabelle 24: Elementare Dispositionsmaßnahmen nebst Wirkung für Ersteller und Nutzer (eigene Darstellung)

6.1.2 Quantifizierung der Dispositionsmaßnahmen

Die 13 elementaren Dispositionsmaßnahmen aus Tabelle 24 werden nun detaillierter analysiert. Dazu werden Aussagen zur zeitlichen Quantifizierung der jeweiligen Maßnahmen getroffen und begründet.

Ressource Fahrzeug: Ersatzzug

Möglicherweise verkehrt ein Ersatzzug rechtzeitig und nahe der ursprünglichen Fahrlage mit abweichend geringerer Geschwindigkeit. Der daraus entstehende Zeitunterschied kann anhand der Formel für die Maßnahme *Umleitung* berechnet werden (siehe fortfolgend). Weiterhin ist ein abweichendes Beschleunigungsvermögen denkbar, welches anhand kinematischer Beziehungen ermittelt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass Ersatzzüge erst bei drohenden Abweichungen grösser der halben Taktzeit (z. B. 30 Minuten im Stundentakt) aufgeboten werden, da der betriebstechnologische Aufwand andernfalls unverhältnismässig gross ausfällt. Zu beachten ist darüber hinaus, dass für das Aufbieten des Ersatzzuges eine gewisse Vorlaufzeit benötigt wird, was ebenso dazu beiträgt, diese Variante erst ab der halben Taktzeit einzusetzen.

Ressource Fahrzeug: Sonderzug (Zusatzzug)

Ein Sonderzug kann in Zeiten starker Nachfrage die Planzüge entlasten. Er kann vor dem regulären Zug bereits vorhandene Endkundenbedürfnisse abdecken oder später verkehren, dabei spätestens nach der halben Taktzeit zwischen den Planzügen. Letzteres schafft eine scheinbare kurzzeitige Taktverdichtung.

Aus betriebstechnologischen Gründen wie Zugkreuzungen auf eingleisigen Strecken kann ein unregelmässiger Takt zu den Planzügen resultieren, weshalb für den Endkunden sicherheitshalber ein leicht grösserer Wert mit $\frac{2}{3}$ der Taktzeit als maximale Wartezeit angegeben ist.

Ressource Information: Anschlüsse aufheben

Das Aufheben von Anschlüssen stellt ein endkundenseitig unpopuläres, aber im Sinne des Verhinderns zu grosser Verspätungsübertragung betriebstechnologisch gelegentlich erforderliches Dispositionsmittel dar. Erstellerseitig kostet dies keinen Zeitaufwand, der Endkunde kann aber erst den nächsten Planzug nutzen und verliert insgesamt (inklusive der bereits vorhandenen Verspätung) eine Taktperiode. Daher sollte diese Alternative frühestens ab einer viertelsten Taktzeit Abweichung eingesetzt werden²² und beispielsweise eben nicht bei Abweichungen unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze.

Ressource Information: Reisendenlenkung

Das Umdisponieren von Reisenden (Vollbahn, bzw. Fahrgäste im Stadtbahnbereich) auf andere Verbindungen erfordert zwar das Ausgeben und Verbreiten einer entsprechenden Information, allerdings wird dafür keine Zeit in den Kernprozessen der Bahnproduktion benötigt. Allenfalls entsteht durch einen zusätzlichen Umsteigevorgang ein marginaler Zeitmehrbedarf.

Ressource Infrastruktur: Umleitung

Die Grundidee hinter der Umleitung liegt im Befahren einer Strecke abweichender Länge mit abweichender Geschwindigkeit. Es stellt sich die Frage, welcher Fahrzeitunterschied daraus resultiert. Für die gleichförmige Bewegung ist die Fahrzeit der Quotient aus Weg und Geschwindigkeit, beim Übergang auf mittlere (Strecken-) Geschwindigkeiten können damit auch für ein heterogenes Geschwindigkeitsprofil Aussagen abgeleitet werden. Diese Rechenart ist ebenso anwendbar für die Fahrt über die identische Strecke mit abweichender Geschwindigkeit (z. B. *Ersatzzug*).

$$\Delta t = \left(\frac{s_{\text{neu}}}{v_{\text{neu}}} - \frac{s_{\text{alt}}}{v_{\text{alt}}} \right) \cdot 60 \quad (26)$$

Bei unveränderter Geschwindigkeit verbleibt:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \cdot 60 \quad (27)$$

mit	s	Streckenlänge alt/neu	in km
	Δt	Fahrzeitunterschied	in min
	v	Fahrgeschwindigkeit alt/neu	in km/h

Ressource Infrastruktur: Zusätzlicher Halt

Das Einlegen eines zusätzlichen Halts kostet Zeit im Prozess der Bahnproduktion. Hierbei besteht die abweichende Zeitdauer aus der Differenz der Zeit für die Durchfahrt und der Zeit für den Zwischenhalt, letztere bestehend aus Abbremsen, Aufenthaltszeit und Anfahren. Hierbei wird eine gleichförmige Durchfahrt als Referenz gewählt und auf Grössengleichungen übergegangen.

²² Verschiedene Bahnbetreiber sehen hierfür konkrete Entscheidungszeiten vor, z. B. (SBB Infrastruktur - Betriebsführung Bahnproduktion BPE, 2012).

$$\Delta t = t_{\text{ZwHalt}} - t_{\text{Fahrt}} \quad (28)$$

$$\Delta t = t_{\text{brems}} + t_{\text{beschl}} + t_{\text{Halt}} - t_{\text{Fahrt}} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} | \quad & v = a \cdot t + v_0 \\ | \quad & t = \frac{v-v_0}{a} \quad \text{mit } v_0 = 0 \\ | \quad & t = \frac{v}{a} \end{aligned}$$

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{a_{\text{beschl}}} + t_{\text{Halt}} - t_{\text{Fahrt}} \quad (30)$$

Übergang auf Grössengleichung:

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{3.6 \cdot 60 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{3.6 \cdot 60 \cdot a_{\text{beschl}}} + t_{\text{Halt}} - t_{\text{Fahrt}}$$

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{beschl}}} + t_{\text{Halt}} - t_{\text{Fahrt}} \quad (31)$$

Nun folgen als Nebenrechnung Berechnungen an t_{Fahrt} . Allgemein gilt für den identischen Weg, entlang dem der eine Zug durchfährt und der andere abbremst bzw. wieder beschleunigt:

$$\begin{aligned} | \quad & s = \frac{a}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0 \quad \text{mit } s_0 = 0 / v_0 = 0 \\ | \quad & s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad \text{mit } t = \frac{v}{a} \\ | \quad & s = \frac{a}{2} \cdot \frac{v^2}{a^2} \\ | \quad & s = \frac{v^2}{2 \cdot a} \quad \text{für jeden Beschleunigungsvorgang} \end{aligned}$$

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{s_{\text{Strecke}}}{v_{\text{Strecke}}}$$

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{2 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{2 \cdot a_{\text{beschl}}} \quad (32)$$

Übergang auf Grössengleichung

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{2 \cdot 3.6 \cdot 60 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{2 \cdot 3.6 \cdot 60 \cdot a_{\text{beschl}}}$$

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{432 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{432 \cdot a_{\text{beschl}}} \quad (33)$$

Nunmehr ergibt sich zusammengefasst (Ansatz unverändert aus oberster Gleichung):

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{beschl}}} + t_{\text{ZwHalt}} - \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{432 \cdot a_{\text{brems}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}^2}{432 \cdot a_{\text{beschl}}}$$

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{beschl}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{brems}}} + t_{\text{Halt}} \quad (34)$$

Wenn Anfahr- und Bremsbeschleunigung eines Zuges identisch sind, vereinfacht sich der Term:

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{Zug}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{Zug}}} + t_{\text{Halt}}$$

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{Zug}}} + t_{\text{Halt}} \quad (35)$$

mit	a_{Zug}	mittlere Zugbeschleunigung	in m/s ²
	$a_{\text{beschl.}}$	mittlere Zugbeschleunigung bei positiver Beschleunigung	in m/s ²
	a_{brems}	mittlere Zugbeschleunigung bei negativer Beschleunigung	in m/s ²
	t_{Fahrt}	Fahrzeit bei Direktfahrt	in min
	t_{Halt}	Haltezeit an Station	in min

t_{ZwHalt}	Zeit für Abbremsen, Halten und Wiederbeschleunigen	in min
v_{Strecke}	Streckengeschwindigkeit	in km/h
Δt	Zeitunterschied für zusätzlichen Zwischenhalt	in min

Die folgende Abbildung 59 visualisiert den linearen Zusammenhang zwischen Streckengeschwindigkeit und Zeitverlust bei je einer Minute Zwischenhalt für unterschiedliche mittlere Fahrzeugbeschleunigungen (siehe Legende, Angaben in m/s^2):

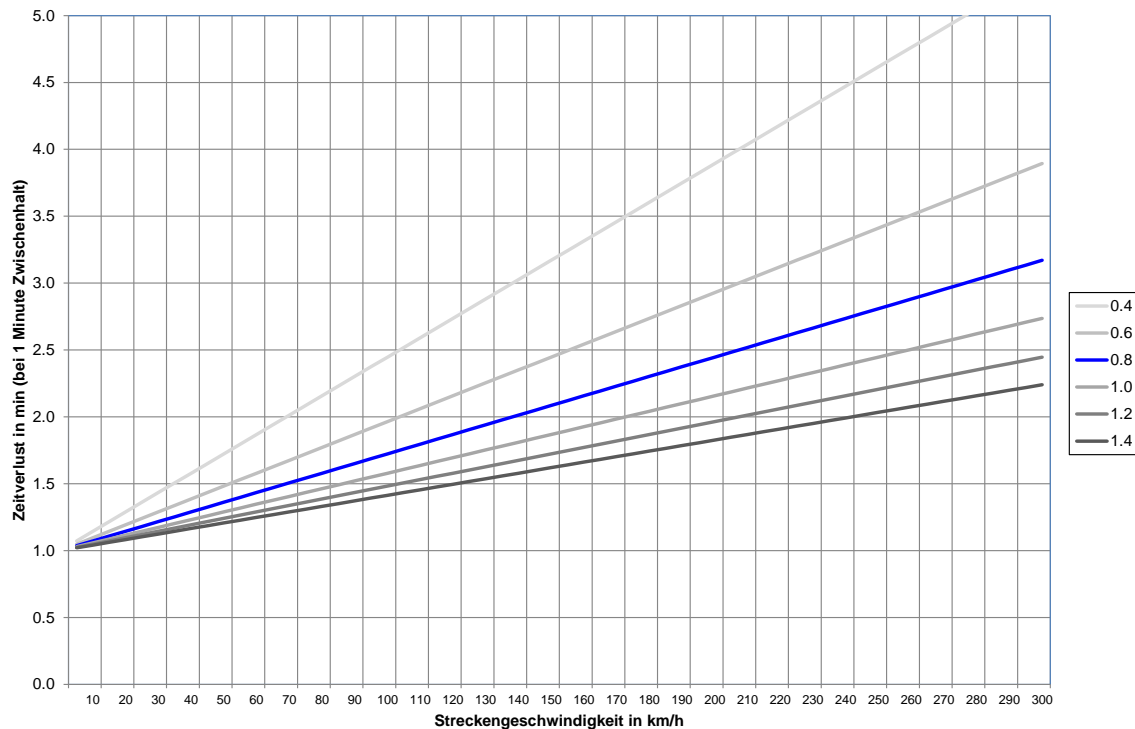


Abbildung 59: Zeitverlust durch Zwischenhalt bei diversen Beschleunigungen (m/s^2 , eigene Darstellung)

Kann man nicht mit mittleren Beschleunigungen rechnen, da die Ergebnisgranularität im Sekundenbereich liegen soll oder ist das Referenzfahrprofil der Durchfahrt nicht gleichförmig, so bieten sich stets Fahrdynamiksimulationen des Zuglaufs zur Ermittlung des relevanten Zeitunterschieds bei Fahrt mit bzw. ohne Zwischenhalt an. Die hier dargestellte Berechnungsmethode ist jedoch mit weitaus geringerem Aufwand durchführbar (Wende, 2003) und liefert dennoch recht gute Ergebnisse (vgl. Trapezverfahren zur Fahrzeitberechnung). In der Praxis wird die Entscheidung über einen zusätzlichen Zwischenhalt meist situativ im Kontext der aktuellen Betriebsprogramms (z. B. Ausfall öfter haltender Züge) getroffen.

Ressource Betrieb: Ausfall

Der Ausfall einer Fahrt bzw. eines Fahrtenpaars ist für den Bahnbetreiber ein recht simples Mittel, da vorbehaltlich des zwischenzeitlichen Rollmaterialverbleibs keine betriebstechnologischen Aspekte zu beachten sind. Hingegen sind die Endkunden geeignet zu informieren und zu lenken. Dieser muss auf die nachfolgende Verbindung ausweichen und verliert die Zeitdauer einer Taktzeit. Bei nicht vorhandenen Transport bzw. Beförderungskapazitäten dieser Folgefahrt steigt der endkundenseitige Zeitbedarf unter Umständen noch weiter an.

Ressource Betrieb: Beschleunigen/Priorisieren

Im Rahmen der technisch zulässigen Geschwindigkeiten ist es möglich, eine bestehende Zugfahrt zu beschleunigen. Hierbei ist die Differenz aus kommunizierter Fahrplanzeit und technischer Fahrzeit das zeitliche Einsparpotenzial.

Ressource Betrieb: Dienstfahrt/Leerzug

Aus Gründen der Rollmaterialdisposition oder zum Verspätungsabbau kann es sinnvoll sein, eine fahrplanmässige Verbindung als Dienstfahrt oder Leerzug (weiter) zu führen oder eine solche Fahrt einzuführen. Hierbei entfallen alle kommerziellen Halte (siehe entsprechend „*zusätzlicher Halt*“) und ggf. die betrieblichen Pufferzeiten (siehe *Beschleunigen/Priorisieren*). Betriebstechnologisch wird somit Fahrzeit gespart. Der Endkunde darf diese Art von Fahrten nicht nutzen, sie fällt in seiner Wahrnehmung aus. Der Endkunde verliert hierbei insgesamt eine Taktzeit und wird auf die nächste kommerzielle Verbindung verwiesen.

Ressource Betrieb: Halt auslassen

Die Idee des auszulassenden Halts ist fahrdynamisch mit dem *zusätzlichen Halt* verwandt, jedoch ein betriebliches Instrument. Das zeitliche Einsparpotenzial entspricht demnach der Dispositions-massnahme „*zusätzlichen Halt*“. Endkundenseitig ist diese Massnahme kontextabhängig zu bewerten. Endkunden ohne Abgang oder Abschnittsziel im ausgelassenen Halt sparen entsprechend Zeit ein. Sollten Abfahrt, Ankunft oder Umstieg (bzw. Umladen im Güterverkehr) in der Station des ausgelassenen Halts liegen, so verliert der Endkunde bei vorherigem Umlenken auf eine den Halt bedienende Verbindung eine Taktzeit.

Bei unterbleibender Information (z. B. irrtümliche Durchfahrt an einem Unterwegshalt) ist nachträglich mit einer anderen Verbindung zur gewünschten Station zurückzufahren, wodurch der Zeitverlust für den Endkunden vom konkreten Betriebsprogramm abhängen wird und nicht mehr pauschal quantifizierbar ist.

Ressource Betrieb: Kurzwende/Inselbetrieb

Die Kurzwende ist ein Dispositionsinstrument, bei dem Hin- und Rückleistung eines Fahrzeugs an einem früheren als dem geplanten Punkt verknüpft werden. Dadurch kann der Ersteller geeignet in den Regelbetrieb zurückkehren. Eine Kombination mit Busnotverkehr oder Schienenersatzverkehr im nicht bedienten Abschnitt ist möglich, wodurch der Nutzer meist einige Zeit, höchstens aber eine Taktzeit (Anschlussbruch) verliert. Gelegentlich wird die Kurzwende auch beidseits einer nicht nutzbaren Infrastruktur durchgeführt, was als „Inselbetrieb“ bezeichnet wird. Bei der Kurzwende ist zu beachten, dass die verkehrenden Einheiten wendezugfähig sein müssen oder das Triebfahrzeug umgesetzt werden muss, wobei letzteres infrastrukturseitig einen Ausweich erfordert (oder ein Stumpfgleis und zwei Triebfahrzeuge).

Triebfahrzeugwechsel (zwei bis drei Fahrpersonale)

Alternativ kann ein zweites Triebfahrzeug an den eingefahrenen Zug gekuppelt werden. Dabei stellt sich die Frage, ob ein oder zwei Fahrpersonale zur Verfügung stehen. Daraus ergibt sich eine Reihe von Szenarien, die erstellerseitig Zeit beanspruchen. Diese Zeit muss zwischen Ankunft und Abfahrt des Zuges vorhanden sein, um keine Fahrplanabweichungen zu provozieren.

Anhand eigener Betriebsbeobachtungen in Deutschland und der Schweiz wurden die in Tabelle 25 dargestellten Arbeitsschritte und Prozesszeiten eruiert. Es wird ein Einsatz von zwei Lokpersonalen unterstellt (andernfalls sind beachtliche Laufwege für das Lokpersonal in die Berechnung einzubeziehen). Ein Triebfahrzeugwechsel an der Zugspitze des einfahrenden Zuges dauert demnach mindestens acht Minuten, am anderen Zugende minimal fünf Minuten. Eine Besonderheit ist das Tauschen eines Triebfahrzeugs am in Einfahrtrichtung hinteren Zugende, da dort erst der Führerstand zu besetzen ist (z. B. bei Traktionswechsel); hierfür sind insgesamt mindestens neun Minuten einzuplanen und bis zu drei Fahrpersonale²³ erforderlich.

Arbeitsschritt (Dauer in Minuten)	an gleiches Zugende,		an anderes Zugende	
	neues Tfz vorn	neues Tfz hinten	neues Tfz	altes Tfz
Abkuppeln	1	1	-	1
Führerstand altes Tfz besetzen	-	-	-	(-)
Wegfahren	2	2	-	2
Ranfahren	2	2	2	-
Ankuppeln	1	1	1	-
Führerstand neues Tfz besetzen	1	1	1	-
Bremsprobe, Fertigmeldung	1	1	1	-
Gesamtzeit (min)	8	9	5	3

Tabelle 25: Arbeitsschritte und Zeitbedarf (min) für mehrpersonaligen Triebfahrzeugwechsel (eigene Messung)

Führerstandswechsel (ein Fahrpersonal)

Wechselt das Fahrpersonal nun den Führerstand, so ist neben der Rüstzeit zusätzlich die Zeit für das Laufen zum anderen Führerstand einzuplanen. Nimmt man hier konservativ eine Gehgeschwindigkeit von 1 m/s an, berücksichtigt dies auch die geringeren Laufgeschwindigkeiten auf unbefestigten Wegen. Die Rüstzeit des Fahrzeugs ist von Baureihe zu Baureihe verschieden. Es zeigte sich, dass im Nahverkehr auf Grund der dort häufigeren Richtungswechsel eher kürzere Zeiten von rund zwei Minuten realisiert sind, im Fernverkehr eher längere Zeiten mit vier Minuten als Richtwert. Die dafür resultierenden Prozesszeiten sind in Tabelle 26 ersichtlich und entsprechend den Prozesswerten in Tabelle 25 zuzugeben, falls nur ein Fahrpersonal zur Verfügung steht. Bei zwei Fahrpersonalen würde nur die Rüstzeit anfallen; dies unterstreicht den zeitlichen Effizienzgewinn beim Einsatz von Wendezügen.

²³ 1. Fahrpersonal im einfahrenden Zug / 2. Fahrpersonal zum Wegfahren der hinteren Lokomotive / 3. Fahrpersonal zum Heranfahen der neuen Lokomotive.

Zuglänge in m	Prozesszeit Nahverkehr in min	Prozesszeit Fernverkehr in min
25	2.4	-
50	2.8	-
75	3.3	-
100	3.7	5.7
125	4.1	6.1
150	4.5	6.5
175	4.9	6.9
200	5.3	7.3
225	5.8	7.8
250	6.2	8.2
275	6.6	8.6
300	7.0	9.0
325	-	9.4
350	-	9.8
375	-	10.3
400	-	10.7
425	-	11.1
450	-	11.5
475	-	11.9
500	-	12.3

Tabelle 26: Prozesszeit für Führerstandswechsel mit einem Fahrpersonal (in Minuten, eigene Darstellung)

Ressource Betrieb: Verspätung/Isolation (Synchronisationswartezeit)

Weist eine Fahrt eine recht hohe Verspätung auf, so kann das weitere Verspäten in die nächste (Takt-) Fahrplanlage in Frage kommen, um den weiteren Betrieb vor allem bei eingleisigen Strecken nicht zu stark zu beeinträchtigen. Die daraus entstehende zusätzliche Wartezeit bzw. der Zeitverlust aus künstlicher Langsamfahrt wird als Synchronisationswartezeit bezeichnet. Dabei ist stets abzuklären, ob die erforderliche Transportkapazität im zu verspätenden Fahrzeug die weitere Nachfrage aus der nächsten (Takt-) Fahrplanlage verkraftet. Eine jede (zusätzliche) Wartezeit wird vom Endkunden negativ wahrgenommen (siehe Kapitel 2.4.4). Es wird daher postuliert, dass den Fahrgästen im Personenverkehr eine zusätzliche künstliche Verspätung oberhalb von zehn Minuten nicht zumutbar ist. Andererseits sollte nicht beliebig oft in die nächste Fahrplanlage synchronisiert werden. Daher wird als bestehende Mindestverspätung für die Massnahme Verspätung/Isolation 80 % der Taktzeit angesetzt. Daraus resultiert eine maximale Synchronisationswartezeit von 20 % der Taktzeit oder 10 Minuten (siehe oben). Massgebend ist jeweils der Streckentakt, der aus der Überlagerung verschiedener Linien entstehen kann. Die Synchronisationswartezeit beträgt demnach (siehe auch Tabelle 27):

$$t_{\text{Warten,max}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.2 t_{\text{Takt}} \\ 10 \text{ min} \end{array} \right. \quad (36)$$

mit t_{Takt} Taktzeit (Streckentakt) in min
 $t_{\text{Warten,max}}$ maximale Wartezeit in min

Beschreibung	Taktzeit in min									
	120	70	60	30	20	15	12	10	8	5
	Regionalverkehr			Vollbahnverkehr			Agglomerationsverkehr			
minimale Warteverspätung	96.0	56.0	48.0	24.0	16.0	12.0	9.6	8.0	6.4	4.0
maximales Warten	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
reale Warteverspätung	110.0	60.0	50.0	24.0	16.0	12.0	10.0	8.0	6.0	4.0
Synchronisationswartezeit	10.0	10.0	10.0	6.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0

Tabelle 27: Maximale Synchronisationswartezeit bei diversen Streckentakten (eigene Darstellung)

Ressource Betrieb: kein Eingriff

Im konkreten Einzelfall kann es sinnvoll sein, nicht zu disponieren und die betriebliche Störung „auszusitzen“. Neben der Zweckmässigkeit für den Bahnbetreiber verbleibt für den Nutzer die unveränderte Verspätung mit dem Risiko weiterer Anschlussbrüche. Innerbetrieblich können Folgekonflikte auftreten.

Die vorangegangenen Ausführungen zu den Dispositionsmaßnahmen bilden nunmehr die Grundlage für die Evaluation deren Einsatzkriterien im Zuge der Störungsprognose (siehe Kapitel 6.1.3) und die Einführung der Disposition in den Prognoseprozess (siehe Kapitel 7).

6.1.3 Evaluation von Einsatzkriterien der Dispositionsmaßnahmen

Aus der Vielzahl möglicher Dispositionsmaßnahmen sind mit Hilfe der standardisierten Bewertung (Methodik siehe Kapitel 3.4.3) jene Massnahmen herauszufiltern, welche für die konkrete betriebliche Entstörung in Frage kommen. Die bewertungsrelevanten Dimensionen sind die betrieblichen Kosten (z. B. Trassengebühren), die betriebliche Aktivität (z. B. Endkundeninformation), die betriebliche Wirkung auf den Regelbetrieb (z. B. Stabilisierung) und die Wirkung auf den Fahrgast (z. B. Reisezeit, Anschlüsse, Zufriedenheit). Diese Dimensionen sind nunmehr zu wichten; daraus entsteht die Zielfunktion (siehe Tabelle 13 auf Seite 64). Für jede Dispositionsmaßnahme ist die Wirkung hinsichtlich der vorgestellten Dimensionen zu eruieren, unterteilt in eine dreiteilige Skale, welche anschliessend der Quantifizierung dient. Die Dispositionsmaßnahmen in Tabelle 28 sind nach den zugehörigen Ressourcen der Bahnproduktion sortiert.

Dispositionsmaßnahme	Ressource	betriebliche Kosten	betriebliche Aktivität	betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)
Ersatzzug	Fahrzeug	hoch	hoch	stabilisierend	neutral
Sonderzug	Fahrzeug	hoch	hoch	destabilisierend	positiv
Anschlüsse aufheben	Information	gering	gering	stabilisierend	negativ
Reisendenlenkung	Information	gering	mittel	stabilisierend	positiv
Umleitung	Infrastruktur	mittel	mittel	stabilisierend	neutral
zusätzlicher Halt	Infrastruktur	gering	gering	neutral	neutral/negativ
Ausfall	Betrieb	gering	gering	destabilisierend	negativ
Beschleunigen/Priorisieren	Betrieb	gering	mittel	stabilisierend	neutral
Dienstfahrt/Leerzug	Betrieb	hoch	hoch	destabilisierend	neutral
Halt auslassen	Betrieb	gering	mittel	destabilisierend	neutral/negativ
Kurzweende/Inselbetrieb	Betrieb	gering	hoch	stabilisierend	neutral/negativ
Verspätung/Isolation	Betrieb	gering	gering	stabilisierend	negativ
kein Eingriff	Betrieb	gering	gering	destabilisierend	neutral/negativ

Tabelle 28: Einzelbewertung elementarer Dispositionsmaßnahmen (eigene Darstellung)

Es zeigen sich besonders in der Bewertung der einzelnen Dimensionen die Unterschiede zwischen den Massnahmen. Beispielsweise wirkt ein Ersatzzug auf den Regelbetrieb stabilisierend, während ein zusätzlicher Sonderzug zu weiteren Zugfolgekonflikten führen kann und dadurch eine Destabilisierung forcieren kann (siehe auch (Flier, 2011)). Idealerweise nimmt der Fahrgast den Ersatzzug kaum wahr, sieht den Zusatzzug hingegen sehr positiv. Das Aufheben von Anschlüssen sehen die Endkunden positiv, sofern sie diese Anschlüsse nicht gerade benötigen. Das Auslassen eines Zwischenhalts kann im Unterschied zu Tabelle 28 auf den zu betrachtenden Zuglauf durchaus stabilisieren wirken, jedoch werden innerhalb der Bahnproduktion nun Ersatzmassnahmen notwendig, um aus- und zusteigewilligen Endkunden eine Alternativverbindung (Reisendenlenkung) anzubieten oder einen anderen Zug nun ausserplanmässig halten zu lassen (Zuglenkung). Weitere Konflikte können sich aus der Gültigkeit der Fahrausweise ergeben. Daher ist die Gesamtbewertung auf den Regelbetrieb in Tabelle 28 als destabilisierend gekennzeichnet. Die übrigen Überlegungen sollten selbsterklärend sein; all diese Überlegungen bilden die Grundlage aller Einzelbewertungen der Tabelle, auch wenn sie hier nicht im Detail hergeleitet werden.

Die Produktsumme aller Einzelbewertungen nebst der jeweiligen Wichtung liefert die Bewertung einer jeden Dispositionsmassnahme (detaillierte Methodik siehe Kapitel 3.4.3). Auf Grund der Rechenweise liegt die Gesamtbewertung zwischen der Quantifizierung der negativen und der positiven Bewertung, wobei die Gesamtbewertung umso höher ausfällt, je besser geeignet die einzelne Dispositionsmassnahme hinsichtlich der Zielfunktion abschneidet.

Somit lässt sich ein Ranking der Dispositionsmassnahmen erstellen. Dieses fällt je nach Zielfunktion (Wichtung der Dimensionen) unterschiedlich aus. Zur Verdeutlichung dessen werden die 13 elementaren Dispositionsmassnahmen in der folgenden doppelseitigen Tabelle 29 neben der Gleichbehandlung der Dimensionen noch vier abweichenden Zielfunktionen unterzogen und nach absteigendem Ranking geordnet. Die jeweils rechte Spalte gibt das Rankingergebnis farbcodiert von grün bis rot wieder. Es wird plausibel, dass die Sinnhaftigkeit der Auswahl oder Nichtauswahl einer Massnahme extrem stark von der Zielfunktion abhängt. Unter den 13 elementaren Dispositionsmassnahmen in Tabelle 29 auf den folgenden zwei Seiten erreicht z. B. die Umleitung je nach Art der Zielfunktion Rang 3 bis 10. Somit spielt die Zielfunktion eine zentrale Rolle bei der Auswahl geeigneter Dispositionsmassnahmen. Eine Ausnahme bildet die Reisendenlenkung. Diese Massnahme schneidet quasi unabhängig von der Zielfunktion gut bis sehr gut ab, was sich in der Attraktivität für den Endkunden und dem vergleichsweise geringen Aufwand für den Ersteller im Bahnsystem begründet.

Ressource	Massnahme	Abweichung Ersteller	Abweichung Nutzer	betriebl. Kosten	25% betriebliche Aktivität	25% betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	25% betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)	100%
Information	Reisendenlenkung	-	ggf. Umsteigezeit	gering	1,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 positiv	0,75
Betrieb	Beschleunigen/Priorisieren	negative Reserve	negative Reserve	gering	1,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 neutral	0,50
Infrastruktur	zusätzlicher Halt	Formel	Formel	gering	1,0 gering	1,0 neutral	0,0 neutral/negativ	0,50
Betrieb	Verspätung/Isolation	maximal 10 Minuten	maximal 10 Minuten	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	1,0 negativ	-1,1
Information	Anschlüsse aufheben	Reduktion Aufenthalt	Reduktion Aufenthalt	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	1,0 negativ	0,48
Infrastruktur	Umlenkung	Formel	Formel	mittel	0,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 neutral	0,25
Betrieb	kein Eingriff	-	Verspätung	gering	1,0 gering	1,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,0
Betrieb	Kurzweende/Inselbetrieb	-	≤ Taktzeit	gering	1,0 hoch	-1,1 stabilisierend	1,0 neutral/negativ	0,23
Betrieb	Halt auslassen	Formel	Taktzeit/Formel	gering	1,0 mittel	0,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,0
Betrieb	Ausfall	-	Taktzeit	gering	1,0 gering	1,0 destabilisierend	-1,1 negativ	-1,1
Fahrzeug	Ersatzzug	Formel (bzgl. a, v)	Formel (bzgl. a, v)	hoch	-1,1 hoch	1,0 stabilisierend	1,0 neutral	0,0
Fahrzeug	Sonderzug	-	maximal ¾ Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	1,0 positiv	1,0
Betrieb	Dienstfahrt/Leerzug	Formel	Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	-1,1 neutral	-0,83

Ressource	Massnahme	Abweichung Ersteller	Abweichung Nutzer	betriebl. Kosten	50% betriebliche Aktivität	30% betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	10% betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)	100%
Infrastruktur	zusätzlicher Halt	Formel	Formel	gering	1,0 gering	1,0 neutral	0,0 neutral/negativ	0,80
Betrieb	Verspätung/Isolation	maximal 10 Minuten	maximal 10 Minuten	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	1,0 negativ	0,79
Information	Anschlüsse aufheben	Reduktion Aufenthalt	Taktzeit	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	-1,1 stabilisierend	0,79
Information	Reisendenlenkung	-	ggf. Umsteigezeit	gering	1,0 mittel	1,0 stabilisierend	1,0 positiv	1,0
Betrieb	kein Eingriff	-	Verspätung	gering	1,0 gering	1,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,0
Betrieb	Beschleunigen/Priorisieren	negative Reserve	negative Reserve	gering	1,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 neutral	0,69
Betrieb	Ausfall	-	Taktzeit	gering	1,0 gering	1,0 destabilisierend	-1,1 negativ	-1,1
Betrieb	Halt auslassen	Formel	Taktzeit/Formel	gering	1,0 mittel	0,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,39
Betrieb	Kurzweende/Inselbetrieb	-	≤ Taktzeit	gering	1,0 hoch	-1,1 stabilisierend	1,0 neutral/negativ	0,27
Infrastruktur	Umlenkung	Formel	Formel	mittel	0,0 mittel	0,0 stabilisierend	0,0 neutral	0,10
Fahrzeug	Ersatzzug	Formel (bzgl. a, v)	Formel (bzgl. a, v)	hoch	-1,1 hoch	-1,1 stabilisierend	1,0 neutral	0,0
Fahrzeug	Sonderzug	-	maximal ¾ Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	1,0 positiv	1,0
Betrieb	Dienstfahrt/Leerzug	Formel	Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	-1,1 neutral	-0,89

Ressource	Massnahme	Abweichung Ersteller	Abweichung Nutzer	betriebl. Kosten	10% betriebliche Aktivität	50% betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	10% betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)	100%
Betrieb	Verspätung/Isolation	maximal 10 Minuten	maximal 10 Minuten	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	1,0 negativ	-1,1
Information	Anschlüsse aufheben	Reduktion Aufenthalt	Taktzeit	gering	1,0 gering	1,0 stabilisierend	1,0 negativ	-1,1
Information	Reisendenlenkung	-	ggf. Umsteigezeit	gering	1,0 gering	1,0 neutral	0,0 neutral/negativ	0,60
Betrieb	Beschleunigen/Priorisieren	negative Reserve	negative Reserve	gering	1,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 positiv	1,0
Infrastruktur	Umlenkung	Formel	Formel	mittel	0,0 mittel	0,0 stabilisierend	1,0 neutral	0,40
Betrieb	kein Eingriff	-	Verspätung	gering	1,0 gering	1,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,0
Betrieb	Ausfall	-	Taktzeit	gering	1,0 hoch	-1,1 stabilisierend	-1,1 negativ	-1,1
Betrieb	Kurzweende/Inselbetrieb	Formel	Taktzeit/Formel	gering	1,0 mittel	0,0 destabilisierend	-1,1 neutral/negativ	0,0
Betrieb	Halt auslassen	Formel (bzgl. a, v)	Formel (bzgl. a, v)	hoch	-1,1 hoch	-1,1 stabilisierend	1,0 neutral	0,0
Fahrzeug	Ersatzzug	-	maximal ¾ Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	1,0 positiv	1,0
Fahrzeug	Sonderzug	Formel	Taktzeit	hoch	-1,1 hoch	-1,1 destabilisierend	-1,1 neutral	-0,99

Resource	Maßnahme	Abweichung Ersteller	Abweichung Nutzer	betriebliche Kosten	10% betriebliche Aktivität	30% betriebliche Aktivität	50% betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	10% betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)	100%
Beitrieb	Verspätung/Isolation	maximal 10 Minuten	maximal 10 Minuten	gering	1.0 gering	1.0 stabilisierend	1.0 stabilisierend	-1.1 negativ	0.79
Information	Anschlüsse aufheben	Reduktion Aufenthalt	Taktzeit	gering	1.0 gering	1.0 stabilisierend	1.0 stabilisierend	-1.1 negativ	0.79
Beitrieb	Reisendenlenkung	-	ggf. Umsteigezeit	gering	1.0 mittel	1.0 positiv	1.0 positiv	1.0 positiv	0.70
Beitrieb	Beschleunigen/Priorisieren	negative Reserve	negative Reserve	gering	1.0 mittel	1.0 stabilisierend	1.0 stabilisierend	0.0 neutral	0.60
Beitrieb	Umlenkung	Formel	Formel	mittel	0.0 mittel	0.0 stabilisierend	0.0 stabilisierend	0.0 neutral	0.50
Infrastruktur	zusätzlicher Halt	Formel	Formel	gering	1.0 gering	1.0 neutral	0.0 neutral	0.0 neutral/negativ	0.40
Beitrieb	Kurzweende/Inselbetrieb	-	≤ Taktzeit	gering	1.0 hoch	-1.1 stabilisierend	1.0 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	0.27
Fahrzeug	Ersatzzug	Formel (bzgl. a, v)	Formel (bzgl. a, v)	hoch	-1.1 hoch	-1.1 stabilisierend	1.0 neutral	0.0 neutral	0.06
Beitrieb	kein Eingriff	-	Verspätung	gering	1.0 gering	1.0 desstabilisierend	-1.1 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	-0.15
Beitrieb	Ausfall	-	Taktzeit	gering	1.0 gering	1.0 desstabilisierend	-1.1 negativ	-1.1 negativ	-0.26
Beitrieb	Halt auslassen	Formel	Taktzeit/Formel	gering	1.0 mittel	0.0 desstabilisierend	-1.1 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	-0.45
Fahrzeug	Sonderzug	-	maximal 2/3 Taktzeit	hoch	-1.1 hoch	-1.1 desstabilisierend	-1.1 positiv	1.0 positiv	-0.89
Beitrieb	Dienstfahrt/Leerzug	Formel	Taktzeit	hoch	-1.1 hoch	-1.1 desstabilisierend	-1.1 neutral	0.0 neutral	-0.99

Resource	Maßnahme	Abweichung Ersteller	Abweichung Nutzer	betriebliche Kosten	10% betriebliche Aktivität	30% betriebliche Aktivität	50% betriebliche Wirkung (bzgl. Regelbetrieb)	10% betriebliche Wirkung (bzgl. Fahrgast)	100%
Information	Reisendenlenkung	-	ggf. Umsteigezeit	gering	1.0 mittel	0.0 stabilisierend	1.0 positiv	1.0 positiv	0.90
Beitrieb	Beschleunigen/Priorisieren	negative Reserve	negative Reserve	gering	1.0 mittel	0.0 stabilisierend	1.0 neutral	0.0 neutral	0.40
Infrastruktur	Umlenkung	Formel	Formel	mittel	0.0 mittel	0.0 stabilisierend	1.0 neutral	0.0 neutral	0.30
Beitrieb	Kurzweende/Inselbetrieb	-	≤ Taktzeit	gering	1.0 hoch	-1.1 stabilisierend	1.0 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	0.29
Beitrieb	zusätzlicher Halt	Formel	Formel	gering	1.0 gering	1.0 neutral	0.0 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	0.20
Fahrzeug	Ersatzzug	Formel (bzgl. a, v)	Formel (bzgl. a, v)	hoch	-1.1 hoch	-1.1 stabilisierend	1.0 neutral	0.0 neutral	0.08
Information	Anschlüsse aufheben	Reduktion Aufenthalt	Taktzeit	gering	1.0 gering	1.0 stabilisierend	1.0 stabilisierend	-1.1 negativ	-0.05
Beitrieb	Verspätung/Isolation	maximal 10 Minuten	maximal 10 Minuten	gering	1.0 gering	1.0 stabilisierend	1.0 stabilisierend	-1.1 negativ	-0.05
Fahrzeug	Sonderzug	-	maximal 2/3 Taktzeit	hoch	-1.1 hoch	-1.1 desstabilisierend	-1.1 positiv	1.0 positiv	-0.05
Beitrieb	kein Eingriff	-	Verspätung	gering	1.0 gering	1.0 desstabilisierend	-1.1 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	-0.13
Beitrieb	Halt auslassen	Formel	Taktzeit/Formel	gering	1.0 mittel	0.0 desstabilisierend	-1.1 neutral/negativ	0.0 neutral/negativ	-0.23
Beitrieb	Dienstfahrt/Leerzug	Formel	Taktzeit	hoch	-1.1 hoch	-1.1 desstabilisierend	-1.1 neutral	0.0 neutral	-0.55
Beitrieb	Ausfall	-	Taktzeit	gering	1.0 gering	1.0 desstabilisierend	-1.1 negativ	-1.1 negativ	-0.68

Tabelle 29: Ranking der Dispositionsmaßnahmen mit verschiedenen Zielfunktionen (eigene Darstellung)

Abschliessend ist eine weitere Einflussgrösse für die Dispositionsevaluation zu beachten. Dies ist die Mindestabweichung, welche den Einsatz der einzelnen Massnahmen rechtfertigt. Ausschlaggebend dafür sind die Verspätungsklassen der Top-Down-Klassifizierung (vgl. Kapitel 4.3.3). Einfache Massnahmen wie „kein Eingriff“ funktionieren grundsätzlich immer, andere Massnahmen werden erst ab der Pünktlichkeitsgrenze oder gar ab der Taktzeit relevant. Zu letzteren Massnahmen zählt der Sonderzug, welcher vom organisatorischen Aufwand so umfangreich ist, dass er nur bei längeren Ereignissen infrage kommt. Allerdings gibt es nur selten eine harte Grenze zwischen ungeeigneten und geeigneten Massnahmen. Daher werden zwei weitere Abstufungen eingeführt für Massnahmen, die gangbar, aber eher nicht vorgesehen, sind und für Massnahmen, die prinzipiell einsetzbar, aber nicht direkt geeignet, sind. Diese Abstufungen werden im Folgenden mit Blaustufen in Richtung der Einsetzbarkeit codiert:

- weiss Massnahme ungeeignet
- hellblau I Massnahme gangbar, aber nicht vorgesehen
- hellblau II Massnahme prinzipiell einsetzbar
- blau Massnahme geeignet

Dispositionsmassnahme	Ressource	minimale Verspätungsklasse	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...	29	30	31	32	...	59	60	61	62	...		
Ersatzzug	Fahrzeug	T4 ("halbe Taktzeit")																															
Sonderzug	Fahrzeug	T3 ("Taktzeit")																															
Anschlüsse aufheben	Information	T5 ("viertelste Taktzeit")																															
Reisendenlenkung	Information	T4 ("halbe Taktzeit")																															
Umleitung	Infrastruktur	T3 ("Taktzeit")																															
zusätzlicher Halt	Infrastruktur	T3 ("Taktzeit")																															
Ausfall	Betrieb	T3 ("Taktzeit")																															
Beschleunigen/Priorisieren	Betrieb	T6 ("Pünktlichkeitsgrenze")																															
Dienstfahrt/Leerzug	Betrieb	T3 ("Taktzeit")																															
Halt auslassen	Betrieb	T3 ("Taktzeit")																															
Kurzwende/Inselbetrieb	Betrieb	T3 ("Taktzeit")																															
Verspätung/Isolation	Betrieb	T3 ("Taktzeit")																															
kein Eingriff	Betrieb	alle																															

Tabelle 30: Mindestabweichungen vom Fahrplan für Dispositionsmassnahmen (in Minuten, eigene Darstellung)

Je grösser eine Abweichung vom Sollbetrieb ausfällt, desto grösser wird die Anzahl möglicher Dispositionsmassnahmen. Ab der viertelsten Taktzeit gibt es ein recht breites Variantenspektrum, welches die dargelegten Variantenbewertungen erfordert. Die Übersetzung in konkrete Mindestabweichungen hängt dabei vom aktuellen Betriebsprogramm ab. Die Abhängigkeit vom Fahrplantakt widerspiegelt dabei Abwägungen des betriebstechnologischen Aufwands einerseits und Auswirkungen auf den Endkunden andererseits. Beispielhaft wird in der Visualisierung (Tabelle 30) ein Stundentakt im Vollbahnbereich zu Grunde gelegt. Somit hängt die Auswahl einer Dispositionsmassnahme von folgenden drei Parametern ab:

- durch Störungsprognose ermittelte Fahrplanabweichung
- Zielfunktion (Dimensionswichtung) und Bewertung der Dispositionsalternativen
- Mindestabweichung für den Einsatz der Dispositionsmassnahmen

Ziel dieses Vorgehens ist es, geeignete Dispositionsmassnahmen einzugrenzen. Der Letztentscheid über zu realisierende Dispositionen sollte jedoch auch aus Komplexitätsgründen beim Disponenten verbleiben. Aus Zeitgründen kann in der aktuellen Bahnbetriebsführung nicht immer eine detaillierte Analyse von Alternativen vorgenommen werden. Daher sollten favorisierte Dispositionentscheidungen im Rahmen von Schulungen trainiert werden. Möglicherweise kann der

Disposition durch technische Systeme unterstützt werden, welche automatisiert Dispositionsvarianten aufzeigen, aber noch nicht auswählen.

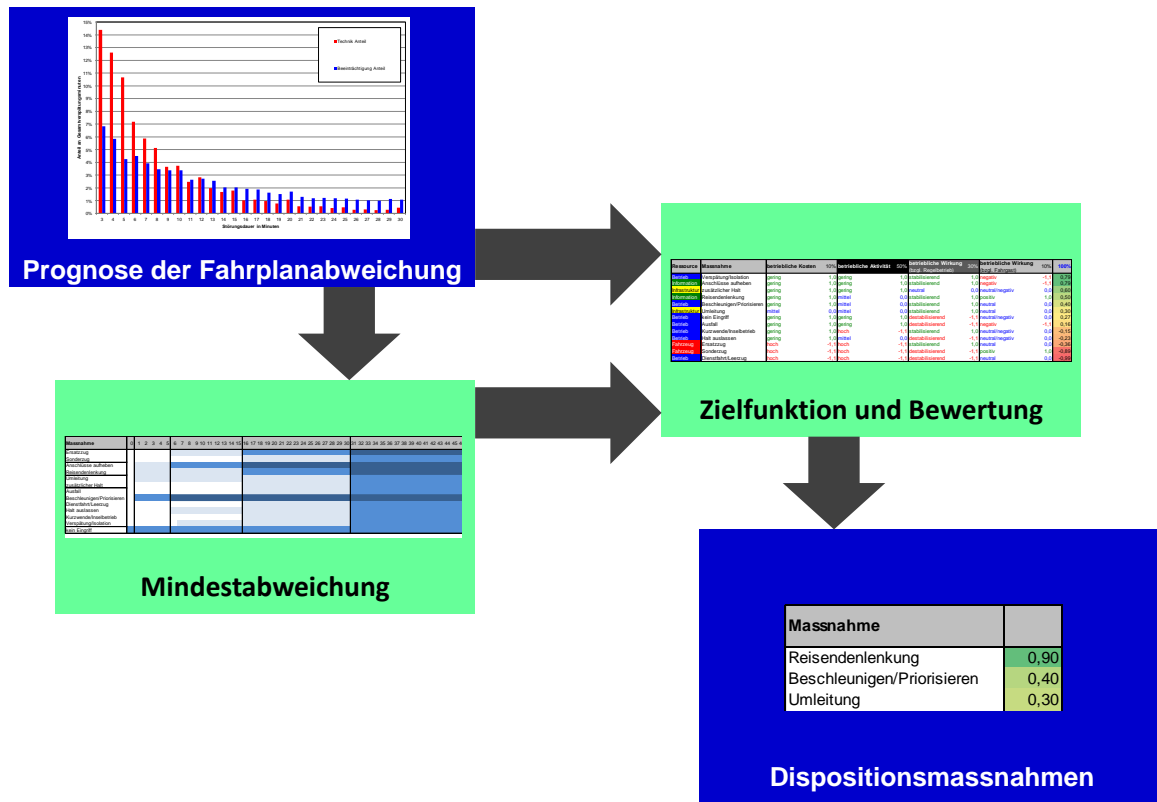


Abbildung 60: Dispositionsevaluation basierend auf der Prognose der Fahrplanabweichung (eigene Darstellung)

Abbildung 60 illustriert die Dispositionsauswahl im Kontext der Störungsprognose; die Kleinabbildungen innerhalb der Rechtecke dienen dabei ausschliesslich der Visualisierung. Die prognostizierte Fahrplanabweichung auf Ebene des Einzelzuges ist der Eingangsparameter. Anschließend werden auf Grundlage der Zielfunktion (gewichtete Dimensionen) die elementaren Dispositionsmaßnahmen bewertet. Daraus entsteht ein erstes Ranking möglicher Massnahmen. Parallel dazu ist die erforderliche Mindestabweichung für den Einsatz der einzelnen Massnahmen in die Überlegungen einzubeziehen; möglicherweise fallen daher einige Einzelmassnahmen heraus. In Kombination von Mindestabweichung und Zielfunktion lassen sich schliesslich für eine prognostizierte Fahrplanabweichung konkrete Dispositionsmaßnahmen evaluieren.

Während für die Interventionsplanung die Ereignisursache im Vordergrund steht, fokussiert die Disposition vor allem auf den Ereignisort. Hierzu wird das Netz in Knoten (Weichen) und Kanten (Gleise) unterteilt. Die Nichtbefahrbarkeit umfasst mindestens eine Kante oder einen Knoten mit angrenzenden Kanten. Aus der Einzelstörung entsteht eine Störungskategorie in Form der nicht-befahrbaren Netzkante(n). Dieses Vorgehen ist besonders bei dichten (Stadt-) Bahnnetzen praktikabel, beispielsweise bei den VBZ (Haas, 2011). So ist die Anzahl möglicher Störungsorte einzugrenzen und für diese Anzahl sind Dispositionskonzepte implementierbar, vgl. (Schranil, 2003). Daraus lässt sich eine Art Ausmass der Störung ableiten, indem die Anzahl unerreichbarer Knoten und Kanten eruiert (Dorbritz, 2012) und ins Verhältnis zum Gesamtnetz gesetzt wird.

6.1.4 Rückführung in den Regelbetrieb

Das Ziel der Rückführung ist die geordnete Rückkehr aus dem gestörten Bahnbetrieb in den geplanten Zustand und anschliessend in den Regelbetrieb. Damit ist ausdrücklich nicht die schnellstmögliche Rückkehr gemeint. Vielmehr gilt es, betriebstechnologische vor Pünktlichkeitsaspekten zu priorisieren. Im betrieblichen Umgang mit Störereignissen sind Verspätungsübertragungen durch einen vorausfahrenden Zug nicht immer vermeidbar. Diese Zusammenhänge sind allerdings deterministisch ermittelbar. Relevante Parameter dafür sind:

- Verspätung des vorausfahrenden Zuges
- fahrplanmässiger Zeitabstand zwischen den Zügen
- Zugfolgezeit der Strecke (logische Verknüpfung obiger Aspekte)

Die Zugfolgezeit dient dabei als Bindeglied zwischen den beiden verkehrenden Zügen. Im Fall der Anschlussgewährung ist dies die Anschlussbeziehung (vgl. (Neumann, et al., 2012)), im Fall der (Kurz-) Wende ist die Wendezeit (siehe auch Kapitel 6.1.1) anzusetzen. Für die Prognose der übertragenen Abfahrts- bzw. Ankunftsverspätung gilt dann:

$$t_{v,Zug2} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ t_{v,Zug1} - t_{Zf,Fpl} + t_{Zf,Str} \end{array} \right. \quad (37)$$

$$\text{bzw. } t_{v,Zug2} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ t_{v,Zug1} - t_{Abf,Zug2} + t_{Abf,Zug1} + t_{Zf,Str} \end{array} \right. \quad (38)$$

mit	$t_{Abf,Zug1}$	Abfahrtszeit Vorzug	in min
	$t_{Abf,Zug2}$	Abfahrtszeit Folgezug	in min
	$t_{v,Zug1}$	Verspätung des direkten Vorzuges	in min
	$t_{v,Zug2}$	Verspätung des aktuellen Zuges	in min
	$t_{Zf,Fpl}$	Zugfolgezeit laut Fahrplan	in min
	$t_{Zf,Str}$	Streckenzugfolgezeit (Bindeglied)	in min

Wichtig ist hierbei der Bezug auf den jeweils real vorausfahrenden Zug, bezogen auf die jeweilige Betriebsstelle. Die Fahrplanreserve gegenüber der technischen Fahrzeit ist bei der Zugfolge ohne Einfluss, da sie bei aktuellem und vorausfahrendem Zug identisch sein sollte und sich entsprechend heraushebt. Dies ändert sich im Fall von Anschlussverbindungen, hierbei müsste streng genommen ausschliesslich mit der technischen Fahrzeit gerechnet werden.

Nach einem längeren Betriebsunterbruch, ab etwa der doppelten Taktzeit, stellt sich die Frage einer geeigneten Wiederaufnahme des Betriebs. Zunächst sind hierbei ungünstig positionierte Züge wegzufahren, um störungsbedingt ausserplanmässig gebundene Infrastrukturen und Fahrzeuge freizugeben. Nach diesem „Aufräumen“ sollten alle kommerziellen Halte im Personenverkehr bedient werden, da dort inzwischen Fahrgäste warten. Anschliessend sind die schnelleren Direktverbindungen wiederaufzunehmen. Im Fall drohender weiterer Zugfolgekonflikte können die letzten beiden Schritte getauscht werden. Danach sollte in der jeweils nächsten Fahrplanlage gefahren werden, auch wenn dies ursprünglich nicht für diesen Kurs vorgesehen war.

Der zwischenzeitlich hinzu gekommene Endkunde wird die vorherige Betriebsstörung dadurch nicht mehr bemerken. Folgender Algorithmus resultiert in Kurzform (Schranil, 2012):

- 1) Strecke "aufräumen"
- 2) Bedienen "aller Halte" sobald möglich (bei Zugfolgekonflikten gehe zu 3)
- 3) Bedienen der Direktverbindungen
- 4) Verwenden der nächsten verfügbaren Taktfahrplantrasse

Es ist grundsätzlich möglich, in einer feinerschliessenderen Angebotskategorie zu verkehren, jedoch sollte die Grundkategorie „alle Halte“ oder „direkt verkehrend“ erhalten bleiben. Beispielsweise könnte ein InterCity als InterRegio umdisponiert werden, jedoch nicht als Regio, da dies eine andere Grundkategorie wäre und hierbei Probleme hinsichtlich Fahrgastwechsel, Höchstgeschwindigkeit oder Beschleunigung auftreten können. Bei zumindest theoretisch denkbarem homogenem Rollmaterial wäre ein Verharren in der „Grundkategorie“ des Angebots entsprechend nicht mehr nötig.

Die Obergrenze der unter Umständen noch akzeptablen Verspätung am Ankunftspunkt ist mit einer Stunde anzusetzen, in Anlehnung an die Fahrgastrechte (Europäisches Parlament, Rat, 2007). Spiegelt man die Dispositionsüberlegungen dieses Kapitels an der Wahrnehmung der Bahnproduktion in der Praxis, so drängt sich der latente Verdacht auf, dass vielfach entweder mit Fokus auf den betrieblichen Aufwand *oder* den Fahrgast entschieden wird, aber die Kostenfrage im operativen Geschäft als Abwägungsparameter in den Hintergrund tritt. Bei Verkehren in grossen Taktzeiten ab ca. einer Stunde ist dies mit Sicherheit zu begrüssen, bei dichteren Verkehren ist hingegen eine stärkere Ausrichtung an wirtschaftlichen Aspekten zumindest in Erwägung zu ziehen.

6.2 Technische Störungsbehebung (Intervention)

6.2.1 Interventionsstrategien

Nach der betrieblichen Störungsbehebung steht mit der Intervention nun die technische Störungsbehebung im Mittelpunkt der Analysen. Dazu werden zunächst die generellen Interventionsstrategien herausgearbeitet und darauf aufbauend ein generischer Interventionsprozess abgeleitet. Dieser Prozess hat in Kombination mit der Entstörungspriorität und dem Störungsort direkten Einfluss auf die technische Störungsdauer. Anschliessend werden einige Ergebnisse mit technischen Fallstudien verifiziert.

Intervention ist die Summe aller Massnahmen zur technischen Störungsbehebung mit dem Ziel, defekte Systeme und Komponenten in den geplanten Zustand zurückzuführen, damit diese die erforderlichen Funktionalitäten erfüllen können (Schranil, et al., 2013). Die Intervention ist im Kontext der Störungsbehebung das technische Pendant zur Disposition. Aufgeschlüsselt nach dem Ort des Eingriffs bestehen drei generelle Interventionsstrategien:

- Intervention am Schadensort
- Intervention an einem definiertem anderen Ort (z. B. Werkstatt)
- Fernintervention

Die Fernintervention ist ein sehr komfortabler und schneller Ansatz, da das Aufbieten von Fachpersonal und somit deren Anreise entfällt. Allerdings ist dies nur bei wenigen Ereignisklassen möglich, beispielsweise bei der Netzregelung der elektrischen Bahnenergieversorgung. Besonders bei nichtprioritären Fahrzeugstörungen bietet sich hingegen die Intervention an einem definierten Ort an. Hier ist der Interventionszeitpunkt flexibler planbar und ebenso niemand an den Ereignisort aufzubieten. Am Ereignisort findet die Intervention nur statt, wenn dies unvermeidbar ist, beispielsweise bei Infrastrukturstörungen am Fahrweg (Oberbau).

Der Einfluss der Intervention auf den Fahrbetrieb sollte möglichst gering sein, weshalb nach Möglichkeit Fernintervention und Intervention an definiertem Ort zu bevorzugen sind. Weiterhin ist es möglich, zunächst eine Notbefahrbarkeit der Infrastruktur herzustellen, um den Ereignisort zumindest mit verminderter Leistungsfähigkeit für den Bahnbetrieb freizugeben. Ähnliche Aspekte verfolgt die Herstellung der (Not-) Fahrfähigkeit gestörter Fahrzeuge, wodurch der Ereignisort zunächst geräumt werden kann. Die Wahl der Interventionsstrategie hat direkten Einfluss auf die parallel stattfindenden Dispositionsentscheidungen. Daher ist detailliertes Wissen über die voraussichtliche Interventionsdauer von zentralem Interesse.

6.2.2 Interventionsprozess und dessen Quantifizierung

Interventionsprozesse in Bahnsystemen weisen trotz der Spezifität eines jeden Einzelfalls gewisse Muster auf, welche an dieser Stelle herausgearbeitet werden sollen. Die Recherche mit verschiedenen Bahnbetreibern aggregiert folgendes zugrundeliegendes generisches Interventionschema, welches als Ergebnis diverser Fallstudien (siehe auch Kapitel 6.2.3) aufgestellt wurde.

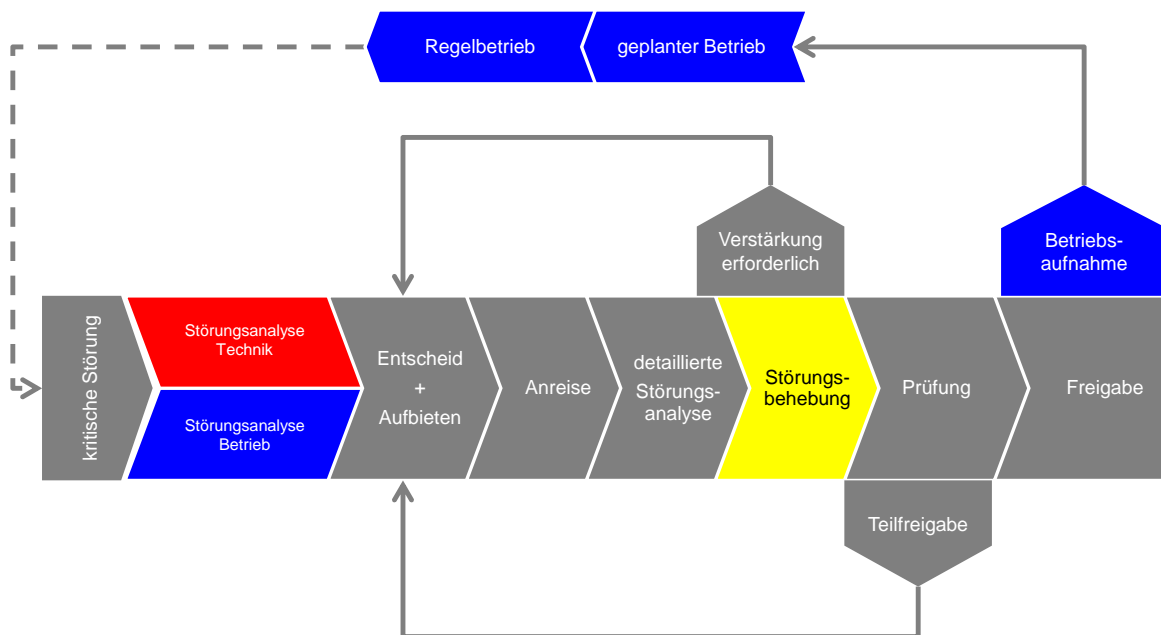


Abbildung 61: Generischer Interventionsprozess (Schraniil, et al., 2013)

Der generische Interventionsprozess (siehe Abbildung 61) wird durch eine in der Regel als kritisch eingestufte Störung angestoßen. Das Prädikat „kritisch“ ist dabei bereits vorhanden, wenn eine geringe Mindeststörungsdauer voraussichtlich überschritten wird (vgl. Kapitel 7.2) oder eben eine Intervention ansteht. Somit sind Ereignisse mit einer erwarteten grossen Störungsdauer (ab ca. 30 Minuten), grosser erwarteter Störungswirkung auf dem Bahnnetz (z. B. wichtiger Zuläufer auf Knoten) oder eine Plausibilitätsverletzung innerhalb der bereits bekannten Informationen vom Ereignisort als kritisch einzustufen.

Die technische und betriebliche Analyse dieser kritischen Ereignisse führt zum Interventionsentscheid sowie zum Aufbieten entsprechender Fachdienste. Diese gelangen an den Ereignisort, was bei Fernintervention entfällt, und legen in Abhängigkeit vom detaillierten Schadensbild die konkreten Schritte der Störungsbehebung fest. Im Zuge dieser Störungsbehebung ist es möglich, dass weiteres Personal oder zusätzliche Ausrüstung verstärkend erforderlich sind. Nach Ende der Störungsbehebung erfolgt die Prüfung auf erfolgreiche Entstörung mit den Ergebnissen technische Teilfreigabe oder technische Freigabe. Erst anschliessend kann der Bahnbetrieb mit einem (reduzierten) geplanten Betrieb wieder hochgefahren werden.

Der Kernprozess der Intervention vom Prozessanstoß der „kritischen Störung“ bis zur „Freigabe“ bietet Gelegenheit für eine zeitliche Quantifizierung. Hierbei besteht jedoch eine starke Abhängigkeit von Datenerfassung und Datenlage der Praxispartner, wobei Interventionsdaten bislang tendenziell schlecht respektive unvollständig dokumentiert sind. Es ergeben sich demnach zwei Varianten zur Quantifizierung des Interventionsprozesses:

- Teilzeiten aus Betreiberdaten
- Prozessanalyse von Interventionen

Beide Ansätze sind in Abbildung 62 nunmehr ergänzt. Die grün hinterlegten Zeitbezeichnungen sind Prozesszeiten aus dem SBB-Infrastrukturportal (SIP) von 2011. Die unter dem Schema ergänzten Schätzungen widerspiegeln die typische Grössenordnung dieser Zeiten. Die Gesamtdauer des Interventionsprozesses wird geprägt vom konkreten Ereignisort bei Interventionserfordernis an diesem Ereignisort.

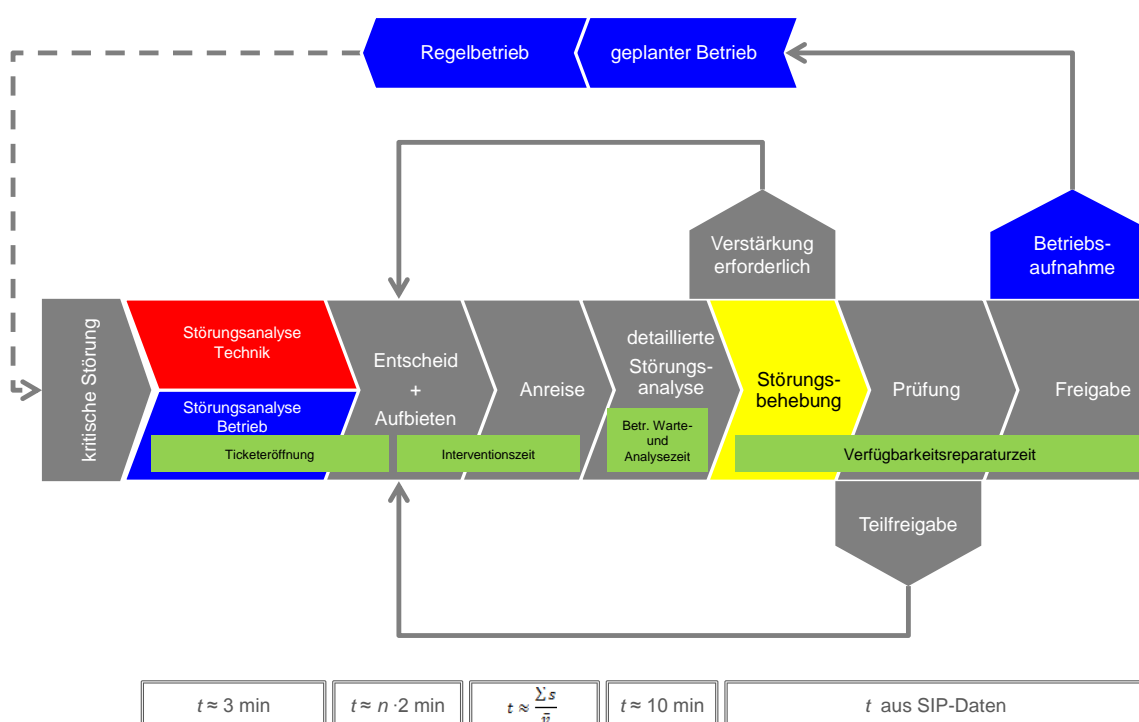


Abbildung 62: Generischer Interventionsprozess mit SBB-Zeiten und Zeitschätzungen (eigene Darstellung)

Zur Quantifizierung der Prozesskette wird angenommen, dass die betriebliche wie technische Störungsanalyse im Groben nach rund drei Minuten abgeschlossen ist; dies widerspiegelt auch die Erfahrungen der Bahnbetriebsführung. Danach ist zumindest Ereignisart und Ereignisort als wesentliche Parameter bekannt. Das Aufbieten von zusätzlichem Personal nebst Aufrüstung geschieht fernmündlich oder elektronisch. Hierbei ist pro Vorgang mit ca. zwei Minuten zu rechnen. Die Anreise an den Ereignisort via Strasse lässt sich mithilfe der mittleren Fahrgeschwindigkeit abschätzen. Innerorts sind für diese mittlere Geschwindigkeiten von rund 30 km/h, ausserorts rund 60 km/h praktikable Faustgrössen. Ein Routenplanassistent kann hier basierend auf den Felddaten bereits durchgeführter Routenabfragen Ergebnisse liefern. Für die Analyse am Scha-

denplatz sind ca. zehn Minuten einzuplanen. Dieser Wert stammt von Triebfahrzeugstörungen der SBB, wo dem Triebfahrzeugführer fünf Minuten für die Fehleranalyse und fünf Minuten für einen ersten Lösungsversuch eingeräumt werden. Diese gesamt zehn Minuten werden auch bei Infrastrukturstörungen für die Lagebeurteilung am Schadensplatz verwendet und an dieser Stelle übernommen. Die restliche Prozesskette ist in den SIP-Daten mit Einschränkungen recht gut auswertbar.

Trotz nicht immer befriedigender Datenlage ist das Wissen über typische Interventionszeiten zentral für den aufzustellenden Prognoseprozess. Mit diesem Wissen lässt sich nach der Entscheidung für eine Interventionsstrategie die voraussichtliche technische Störungsdauer basierend auf prozessualen und statistischen Aspekten ermitteln. Diese Kombination spielt sowohl für die Intervention als auch im Prognoseprozess (siehe Kapitel 7.2) eine entscheidende Rolle.

6.2.3 Interventionsdaten in den Fallstudien

Die Interventionsfallstudien gliedern sich gemäss den Systemen Vollbahn und Stadtbahn, wobei im Vollbahnbereich ergänzend die Bahnsuizide vertieft wurden. Im Vordergrund standen jeweils statistische Analysen der technischen Störungsdauer im Kontext der jeweiligen Intervention.

Intervention im Vollbahnbereich: Überblick

Anhand des SBB-Infrastrukturportals (SIP) sollen für das Jahr 2011 einige Beispiele technischer Störungsdauern sowie deren Interventionszeiten dargestellt werden. Analog zu den betrieblichen Meldungen in ErZu (Ereignisse im Zugsverkehr) lässt sich auch für diese Art der Störereignisse die Distance aufstellen (vgl. Kapitel 5.1). Das kann in diesem Kontext dazu dienen, im Sinne von Häufigkeit und Ausmass kritische Ereignisklassen zu identifizieren.

Die Distance kann bei technischen Störungsdaten sowohl bezüglich der betrieblichen Auswirkungen (im Sinne von Fahrplanabweichungen, siehe Abbildung 63) als auch in Bezug auf die technische Störungsdauer (siehe Abbildung 64) aufgestellt werden²⁴. Bezugsgrösse ist dann jeweils die Summe dokumentierter Fahrplanabweichungen im Sinne des betrieblichen Ausmasses oder die Summe der technischen Störungsdauern, welche im Folgenden als technisches Ausmass bezeichnet werden. Entsprechend verschiebt sich die Betrachtung des Störungsausmasses von der betrieblichen Abweichung hin zur Nichtverfügbarkeit von Funktionen der Komponenten bzw. Teilsysteme im Sinne von (CENELEC, 2010).

²⁴ KS Permanent – andauernder Kurzschluss (de facto Fahrleitungsschaden) / KS momentan - vorübergehender Kurzschluss („Wischer“) / KS ohne - Kurzschluss ohne Schutzabschaltung (de facto Fahrleitungsschaden)

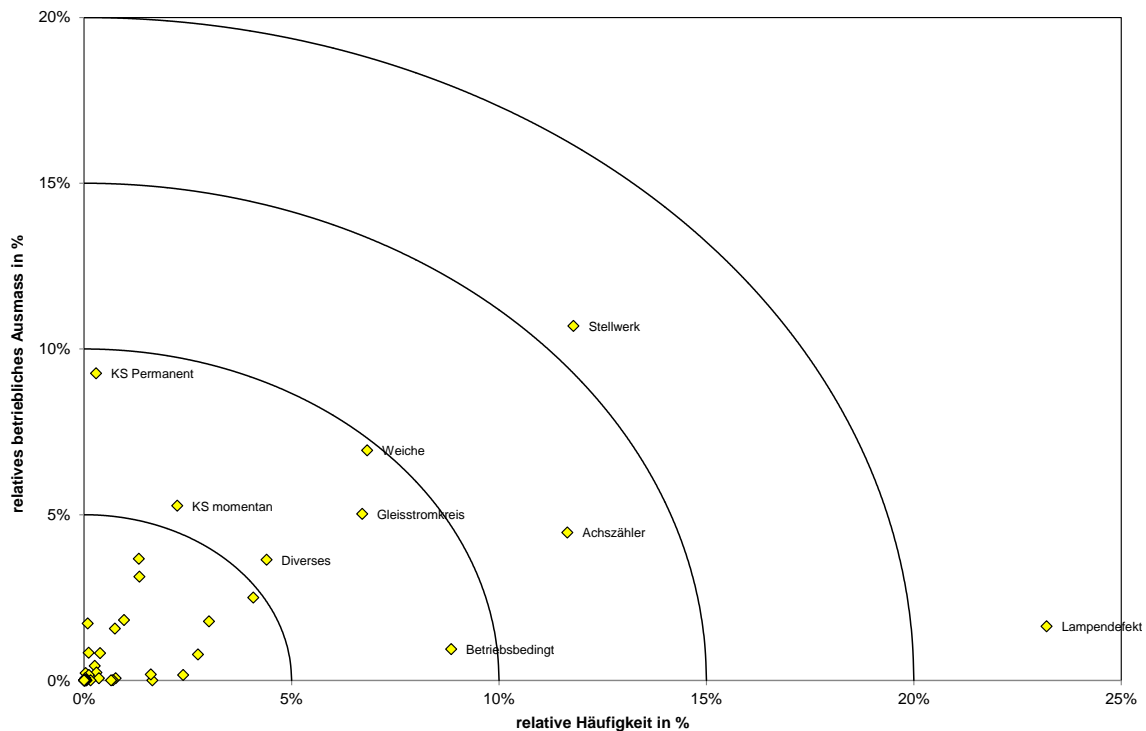


Abbildung 63: Betriebliche Distance der SIP-Daten ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

In der Betrachtung der technischen (Disturbance) Distance mit der Summe der technischen Störungsdauern als Grundlage der technischen Ausmasses ist ein Rückschluss auf die betriebliche Kritikalität des jeweiligen technischen Störereignisses nicht mehr möglich. Hierzu wäre neben dem digitalen Zustand der Systeme und Komponenten vor allem die Verfügbarkeit oder betriebliche Substituierbarkeit ihrer betriebsrelevanten Funktionalitäten zu hinterfragen, was jedoch einen anderen Analysefokus zugrunde legen würde. Es ist stattdessen durchaus praktikabel, wegen der hohen Bedeutung der Pünktlichkeit im Bahnsystem auf die betriebliche Distance technischer Störereignisse zu fokussieren und dadurch den betrieblichen Einfluss technischer Störungen abzubilden.

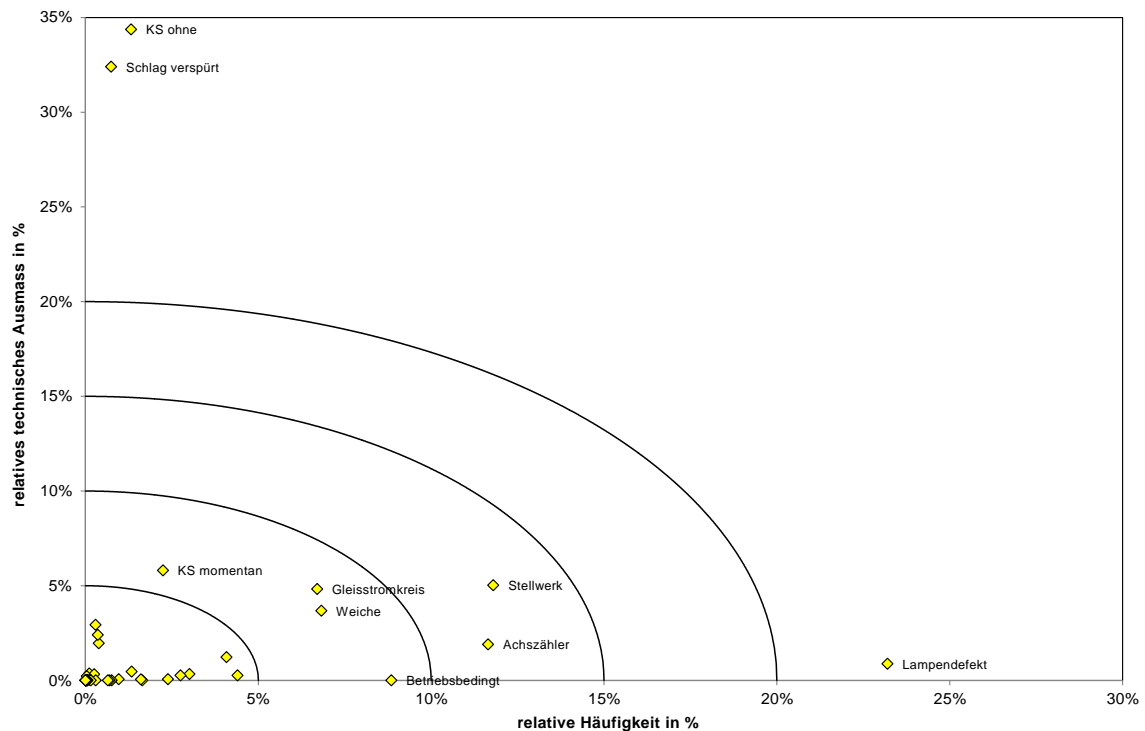


Abbildung 64: Technische Distance der SIP-Daten ($\epsilon = 0.05$, eigene Darstellung)

Die Zeitdauer vom Beginn der eigentlichen Störungsbehebung über die Prüfung bis zur Freigabe für den Betrieb entspricht der „Verfügbarkeitsreparaturzeit“ aus dem RAMS-Bereich (siehe Kapitel 2.4.2) und ist für einige Störungen auswertbar. Im Beispiel der SIP-Daten aus 2011 zeigt dies die Tabelle 31. Aufgrund der nicht durchgängigen Datenverfügbarkeit sind teils nur wenige Fälle einer Ereignisklasse auswertbar. Für die dokumentierten Datensätze ergibt sich dennoch eine für die Abschätzung der Interventionsdauer nutzbare Zusammenstellung.

	betriebliche Distance 2011	technische Distance 2011	Anzahl Ereignisse	Anzahl dokumentierter Störungsbehebung	Mittelwert (Störungsbehebung)	Standardabweichung (Störungsbehebung)	VX
Lampendefekt	23.26%	23.22%	11621	930	48.6	90.0	1.85
Stellwerk	15.92%	12.82%	5909	1783	79.6	186.8	2.35
Achszähler	12.48%	11.81%	5835	746	61.2	131.0	2.14
Weiche	9.73%	7.75%	3418	2050	55.4	117.9	2.13
KS Permanent	9.27%	2.95%	145	102	155.4	213.7	1.37
Betriebsbedingt	8.90%	8.85%	4432	77	18.1	56.9	3.14
Gleisstromkreis	8.38%	8.26%	3358	1567	81.7	501.9	6.14
KS momentan	5.73%	6.22%	1124	203	71.5	116.8	1.63
Diverses	5.71%	4.41%	2203	569	116.0	1003.5	8.65
BUE	4.78%	4.26%	2043	964	67.7	194.5	2.87
KS ohne	3.90%	34.40%	661	442	109.5	565.4	5.17
Leittechnik	3.50%	3.03%	1507	362	127.1	657.6	5.17
Block	3.40%	1.41%	669	212	62.2	71.3	1.15
Zugbeeinflussung	2.86%	2.76%	1376	324	81.3	151.1	1.86
Weichenheizung	2.39%	2.39%	1196	600	73.8	169.6	2.30
Stromversorgung	2.06%	0.97%	483	292	67.7	184.7	2.73
Schlag verspürt	1.73%	32.41%	371	348	52.3	68.6	1.31
Personenunfall	1.72%	0.11%	44	44	126.6	57.2	0.45
Tier	1.65%	1.65%	824	722	29.9	51.3	1.72
TK Abfahrbefehl	1.62%	1.61%	805	61	64.2	104.6	1.63

Tabelle 31: Verfügbarkeitsreparaturzeit von Ereignissen aus 2011 bis 1.50 % Distance (eigene Darstellung)

Beeindruckend in obiger Tabelle sind einmal mehr die grossen Standardabweichungen. Sie deuten auf Störfälle, welche in der Regel nicht prioritär zu behandeln waren und daher über scheinbare Ausreisser die Standardabweichung nach oben treiben. Beispielsweise ist der „Lam-

pendefekt“ an einem Signal nicht immer prioritär, da die Signallampe durchaus weiterhin einsetzbar bleibt. Signallampen sind in der Regel mit zwei redundanten Leuchtfäden ausgestattet. Somit stellt das Durchbrennen eines Lampenfadens („Lampendefekt“) in der Regel keine Beeinträchtigung des geplanten Fahrbetriebs dar. Es muss in diesem betriebsunkritischen Fall nicht sofort interveniert werden, was die Interventionspriorität herabsetzt und somit die technische Störungsdauer (scheinbar) vergrössern kann.

Intervention im Vollbahnbereich: Bahnsuizide

Die Kategorie „Personenunfall“ in Tabelle 31 ist eher missverständlich, da in SIP derartige Fälle eigentlich nicht geführt werden. Die Recherche ergab, dass es sich hierbei ausschliesslich um Ereignisse handelt, welche sich im Ereignisverlauf als Personenunfall herausgestellt haben (z. B. „Schlag verspürt“). Dennoch sind Personenunfälle und insbesondere Bahnsuizide für die Störungsforschung von Interesse, da – bei allem menschlichen Leid – die Klassifizierung der Ereignisse in Ursache und Wirkung eher eindeutig ist sowie Priorisierung und Standardisierung der Behebung hoch ausfallen, was wiederum eine gute Prognosefähigkeit (siehe auch Kapitel 5.3.2) verspricht. Zur näheren Analyse wurden alle amtlich bestätigten Bahnsuizide der Jahre 2009 bis 2012 herangezogen und die zugehörigen Protokolle der aufgegebenen Lösch- und Rettungszüge (LRZ) analysiert.

Zunächst stellt sich hierbei die Frage nach der zeitlichen Verteilung des Auftretens amtlich bestätigter Bahnsuizide. Massgebend dafür ist der Alarmierungszeitpunkt, also jener Zeitpunkt, an dem die Meldung über einen zunächst mutmasslichen Suizid eingeht.

Tag	Anzahl	Anteil (2009 - 2012)	Mittlere Dauer (2010 - 2012)
Montag	79	17.0%	164.9
Dienstag	65	14.0%	156.7
Mittwoch	52	11.2%	153.5
Donnerstag	59	12.7%	153.8
Freitag	68	14.7%	157.7
Samstag	64	13.8%	168.4
Sonntag	77	16.6%	148.6
Mittel	66	14.3%	157.9

Tabelle 32: Bahnsuizide bei den SBB nach Wochentag (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)

Monat	Anzahl	Anteil (2009 - 2012)	Mittlere Dauer (2010 - 2012)
Januar	46	9.9%	156.2
Februar	35	7.5%	160.8
März	49	10.6%	150.1
April	48	10.3%	156.8
Mai	38	8.2%	154.5
Juni	35	7.5%	159.1
Juli	36	7.8%	169.6
August	32	6.9%	145.4
September	34	7.3%	164.5
Oktober	29	6.3%	157.9
November	44	9.5%	168.6
Dezember	38	8.2%	148.6
Mittel	39	8.3%	157.9

Tabelle 33: Bahnsuizide bei den SBB nach Monat (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)

Stunde	Anzahl	Anteil (2009 - 2012)	Mittlere Dauer (2010 - 2012)
0	19	4.1%	148.1
1	7	1.5%	187.0
2	6	1.3%	145.0
3	2	0.4%	201.0
4	8	1.7%	166.0
5	11	2.4%	168.3
6	14	3.0%	199.1
7	19	4.1%	161.6
8	19	4.1%	147.7
9	19	4.1%	149.8
10	31	6.7%	136.9
11	18	3.9%	159.9
12	24	5.2%	161.7
13	30	6.5%	145.7
14	24	5.2%	149.6
15	25	5.4%	154.9
16	16	3.4%	116.9
17	18	3.9%	102.0
18	16	3.4%	169.9
19	27	5.8%	176.9
20	27	5.8%	163.9
21	26	5.6%	186.3
22	32	6.9%	173.4
23	26	5.6%	173.8
Mittel	19	4.2%	157.9

Tabelle 34: Bahnsuizide bei den SBB nach Uhrzeit (Anzahl 2009 - 2012, Dauer 2010 - 2012, eigene Darstellung)

Verschafft man sich einen Überblick über die obenstehenden Tabelle 32, Tabelle 33 und Tabelle 34, lassen sich anhand der relativen Häufigkeiten zeitliche Schwerpunkte der Suizide identifizieren. Diese liegen im Bereich Sonntag/Montag, im Übergang zwischen „heller“ und „dunkler“ Jahreszeit im Frühling bzw. Spätherbst und über den Tag gesehen am späten Vormittag bzw. am späten Abend. Alle Übergänge (Wochenbeginn, Tageszeitenwechsel, Jahreszeitenwechsel) sind dabei zumindest für psychisch labile Persönlichkeiten schwer zu verarbeiten, da die Wahrnehmung der äusseren Veränderung (z. B. Jahreszeitenwechsel auf Frühling) der unverändert schlechten inneren Stimmung (z. B. gedrückte Stimmung durch Depression) zuwider läuft oder sie sogar weiter verstärkt, z. B. bei Jahreszeitenwechsel auf die „dunkle Jahreszeit“ (Wyss, 2012). Die etwas grössere Ereignisdauer bei Bahnsuiziden am Samstag liegt im erforderlichen Aufbieten zuständiger Stellen begründet. Diese rücken am Wochenende als Pikett von zu Hause via ihren beruflichen Standort zum Ereignisort aus, unter der Woche direkt vom Standort zum Ereignisort. Samstags kommt die höhere Netzauslastung auf Schiene und Strasse in Kombination mit möglichen Ereignisüberschneidungen erschwerend hinzu.

Bei Bahnsuiziden ist eine Reihe zuständiger Stellen aufzubieten. Dazu gehören die Kantonspolizei und ein Staatsanwalt. Insofern besteht eine Abhängigkeit der Ereignisdauer von der Arbeit der kantonalen Behörden, weshalb im Folgenden die Ereignisdauer nach Kantonen analysiert wird (Tabelle 35). Die Dauer eines Bahnsuizids beginnt dabei mit dem Alarmierungszeitpunkt und endet mit der Freigabe der Strecke für den Fahrbetrieb. Aufgrund längerer Anfahrtswege zum Ereignisort weisen die ländlichen Kantone tendenziell überdurchschnittliche Ereignisdauern auf.

Kanton	Fälle 2009- 2012	Mittlere Dauer (min)		Einwohner (10 ³) 2011	jährl. Bahnsuizide je 10 ⁶ EW 2009 - 2012	Netz (km) SBB	jährl. Bahnsuizide je 100 Netzkilometer 2009 - 2012
		2010 - 2012	2011				
Solothurn	10	234.7	256.9	9.7	91.2	2.7	
Fribourg	7	231.0	284.5	6.2	125.7	1.4	
Tessin	11	205.5	336.9	8.2	165.2	1.7	
Luzern	25	197.9	381.9	16.4	140.1	4.5	
Bern	57	184.0	984.7	14.5	324.9	4.4	
Basel Stadt	7	182.5	186.2	9.4	17.4	10.1	
Basel Landschaft	21	175.2	275.3	19.1	84.1	6.2	
Genf	6	173.7	460.3	3.3	41.2	3.6	
Schwyz	5	169.8	147.9	8.5	63.5	2.0	
Uri	1	162.0	35.4	7.1	54.5	0.5	
Schweiz	463	157.9	7952.6	7.1	2909.9	0.5	
Zug	4	156.0	115.1	8.7	40.9	2.4	
Aargau	44	154.0	618.1	17.8	293	3.8	
Zürich	122	148.1	1392	21.9	466.7	6.5	
Thurgau	21	140.5	251.9	20.8	147.1	3.6	
St. Gallen	35	137.2	483.1	18.1	225.1	3.9	
Neuchâtel	10	135.9	173.1	14.4	112.4	2.2	
Graubünden	4	135.5	193.3	5.2	19.6	5.1	
Waadt	57	131.1	725.8	19.6	260.8	5.5	
Wallis	9	100.8	316.8	7.1	132.1	1.7	
Jura	4	94.0	70.5	14.2	55	1.8	
Schaffhausen	2	91.0	77.1	6.5	8.4	6.0	
Glarus	1	78.0	39.2	6.4	41	0.6	

Tabelle 35: Dauer von Bahnsuiziden nach Kantonen gerankt (eigene Darstellung)

Der Mittelwert der technischen Dauer aller Bahnsuizide 2010 - 2012 beträgt knapp 158 Minuten. Die Standardabweichung liegt bei 60 Minuten, woraus ein *vergleichsweise* geringer Variationskoeffizient von 0.38 resultiert. Abbildung 65 zeigt die Summenkurve basierend auf den ermittelten Ereignisdauern. Die vergleichsweise geringe Streuung der Ereignisdauern rechtfertigt bei Bahnsuiziden als eine der wenigen Ereignisklassen die statistische Regression mithilfe der standardisierten Normalverteilung (siehe Kapitel 3.3.3). Für die Bahnbetreiber impliziert dies eine eher unterdurchschnittliche Streuung der Störungsdauer und damit verbunden eine tendenziell bessere Beherrschbarkeit dieser Ereignisse.

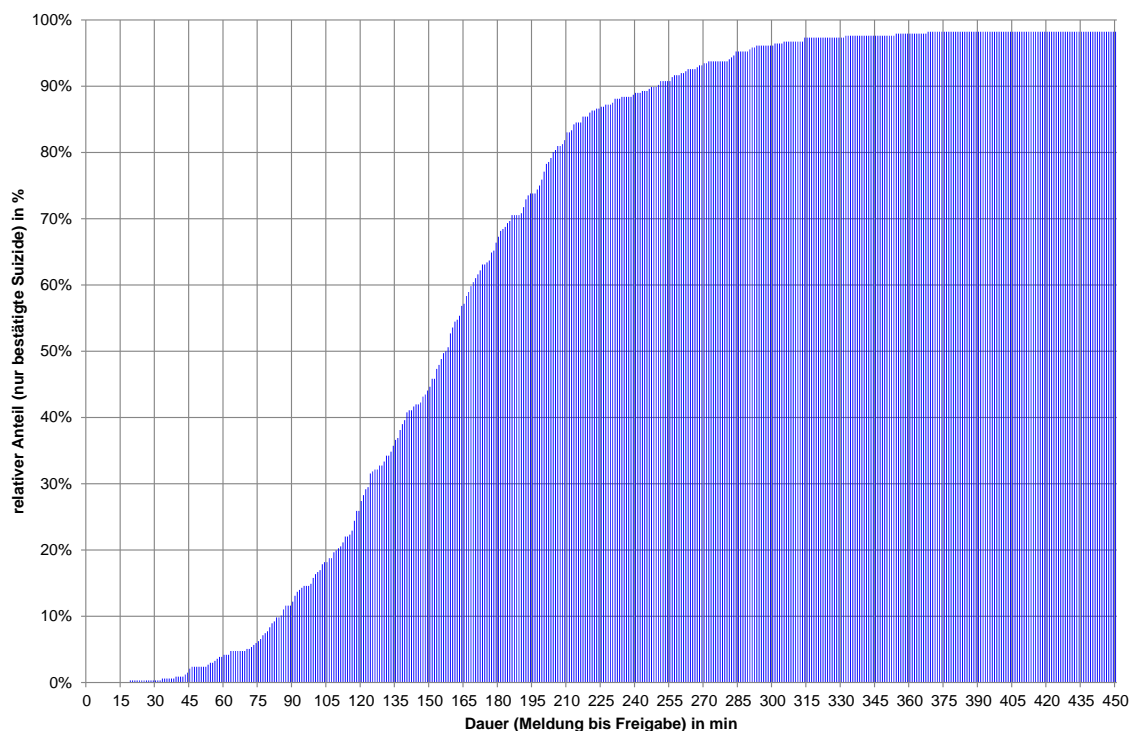


Abbildung 65: Summenkurve der Ereignisdauern der SBB-Bahnsuizide 2010 - 2012 (eigene Darstellung)

Intervention im Stadtbahnbereich

Stadtbahnbetreiber sind in der Regel recht kompakt organisierte Unternehmen. Die Datenerhebung konzentriert sich dort oftmals auf Ereignisse mit betrieblicher Auswirkung, wobei insbesondere die betriebliche Auswirkung über das Rechnergestützte Betriebsleitsystem (RBL) dokumentiert wird. Nur selten gelingt die Extraktion der rein technischen Interventionsdaten. In der Fallstudie der Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB), Center Infrastruktur, konnte auf Meldungen der Netzleitstelle zurückgegriffen werden. Dort sind Störungen der Bahnenergieversorgung (BEV, hier als „Fahrstrom“ bezeichnet), der elektrischen Weichen (EW) sowie der Bahnübergangs- (BÜ) und Fahrsignalanlagen (FSA) vollständig erfasst (siehe Tabelle 36). Weitere Störungen im Bereich der Strecken, Betriebshöfe, Haltestellen und Fahrzeuge sind aus Zuständigkeitsgründen nur rudimentär vorhanden.

Sämtliche Ereignisklassen sind neben der Ressource einem System bzw. Subsystem zugeordnet. Diese Logik folgt der Bottom-Up-Klassifizierung (siehe Kapitel 3.1.2), bezieht aber bei den rudimentär erfassten Ereignisklassen die unternehmensspezifische Klassifizierung ein. Abbildung 66 zeigt die Dominanz von Störungen an Weichen und Fahrstrom gegenüber den anderen dokumentierten Systemen auf. Weichenstörungen beinhalten dabei auch das Weichenstellen von elektrischen Weichen mit dem Stelleisen, also das Nichtansprechen der Weichensteuerung. Dies kommt verhältnismässig oft vor und erfordert eine Intervention. Beim Fahrstrom sind sämtliche Ereignisse mit Turmwageneinsatz subsummiert, was – wie noch zu zeigen ist – auch das Umhängen von Signaltafeln beim Wechsel in oder aus Bauzuständen beinhaltet.

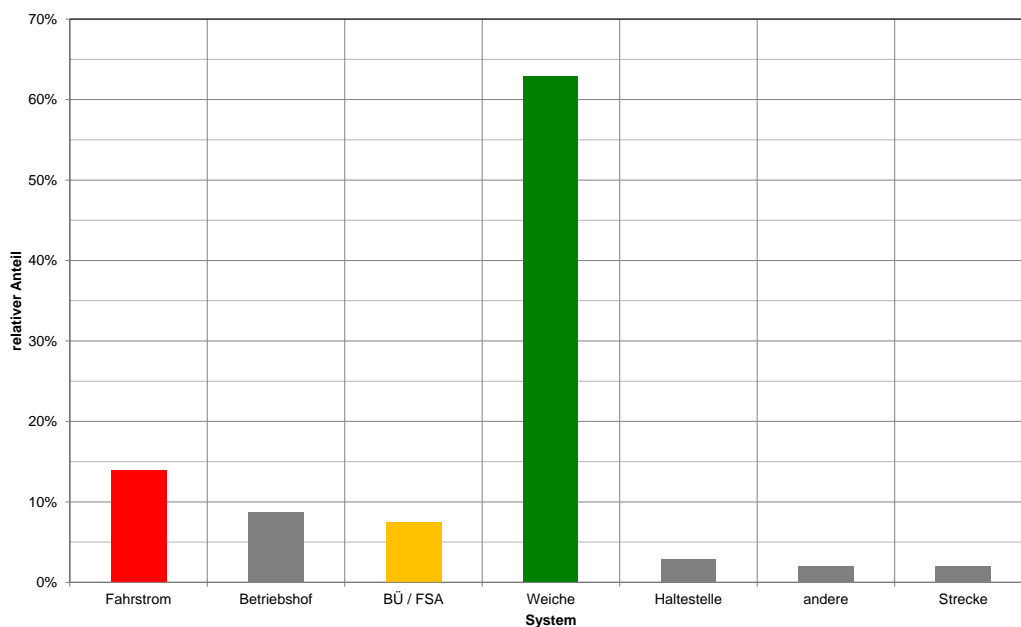


Abbildung 66: Meldungsanteil aus 2009 bezogen auf die betrachteten Systeme (eigene Darstellung)

Resource	System	Subsystem	Beispiel	Bemerkung	
Infrastruktur	einfache Weiche (W), elektrische Weiche (EW)	Aussenanlage	Zungenbetverreinigung, Gleiskreis, ...	bewegliches Fahrwegelement	
		Stellvorrichtung	keine Endlage, Dämpfer, Gestänge, ...		
	Bahnübergang (Bü), Fahrsignalanlage (FSA)	Steuerung	CPU-Fehlermeldung, Neusendung Gleiskreis, ...	sicherungstechnische Anlage	
		Weichenheizung	Heizstab, Temperaturfühler, ...		
	Bahnenergieversorgung (BEV) / Fahrleitungsanlage (FL)	Aussenanlage	Kabelfehler, Steuerschrank, ...	Einsatz Turmwagen, E-Personal	
		Steuerung	CPU-Fehlermeldung, Rottfahrt, ...		
		Fahrdraht	Tragsseil, Fahrdraht, Hänger, ...	nicht im Leistungsnetz	
		Fremdkörper	Ast in Fahrleitung, ...		
		Gleichrichterunterwerk (GUW)	Unterwerksfehler, ...		
		Mast	Abspannung, Mastschalter, Pkw-Unfall, ...		
Betriebshof	Prüfauftrag	Schaltkasten umgestossen, ...	ebenerdig, Einsatz Bautrupp		
	Schaltkasten	Langsamfahrstelle, Schienenbruch, ...			
Strecke	Signale (hängend)	Bahn unter Trenner, Lichtbogen, ...	Fahrgastanlagen		
	Trenner	Streckenauslösung, Polizeieinsatz, ...			
Fahrzeug	Halte stelle	Umschalten	Reset Btf-Steuerung, ...	nicht im Leistungsnetz	
		Btf-Steuerung	Zungenbetverreinigung, Gleiskreis, ...		
	Lichtsignalanlage (LSA)	Weiche, elektr. Weiche	Bake richten, ...	ebenerdig, Einsatz Bautrupp	
		Bake	Fremdkörper im Gleisbereich, ...		
	elektrischer Teil	Profil	Wiederanbringung, ...	Fahrgastanlagen	
		Schienenverbinder	Entfernen stehender Signale, ...		
	mechanischer Teil	Signale (stehend)	Informationstafel aufstellen, ...	Fahrgastanlagen	
		Beschilderung (Information)	Mülleimer zurückbringen, ...		
	Fahrzeug	Lichtsignalanlage (LSA)	Fremdkörper	Schloss defekt, ...	Fahrgastanlagen
			Pausenraum	Ausrichtung Spiegel, ...	
Fahrzeug	elektrischer Teil	Spiegel	Spritzschutz demoliert, ...	Fahrgastanlagen	
		Vandalismus	Haltestelle einrichten, ...		
Fahrzeug	mechanischer Teil	Verlegung	Bügelreißen, Bügelschaden, Sollbruchstelle, ...	Fahrgastanlagen	
		- irrelevant -	Fremdkörper auf Tram, ...		
Fahrzeug	elektrischer Teil	Stromabnehmer	Hilfleistung, ...	Fahrgastanlagen	
		Fremdkörper			
Fahrzeug	mechanischer Teil	Entgleisung		Fahrgastanlagen	

Tabelle 36: Klassifizierung technischer Störungen der DVB (eigene Darstellung)

Fortfahrend stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt im Jahres-, Wochen- und Tagesverlauf Störungsmeldungen der einzelnen Systeme auftreten. Diese Verhältnisse illustrieren die nachfolgenden Diagramme, welche ihrerseits auf die vollständig dokumentierten Systeme Fahrstrom, BÜ/FSA und Weiche aufgeschlüsselt sind.

Die Dominanz der Weichenstörungen schlägt auf den Jahresgang (Abbildung 67) in den Wintermonaten durch. Der Wochengang fällt hingegen recht homogen aus (Abbildung 68), wobei vor allem zu Wochenanfang zahlreiche Meldungen eingehen. Der Tagesgang (Abbildung 69) verzeichnet Spitzen um 06 Uhr, 14 Uhr und 22 Uhr. Dies resultiert aus den Dienstablösungen, weshalb nichtdringende neue Ereignisse dem ablösenden Dienst mitgeteilt werden und somit statistisch – und damit auch in dieser Zusammenstellung – erst zum Dienstbeginn auftreten.

Leider sind die Zeitdauern zwischen Meldungseingang und Störungsbehebung kaum dokumentiert und selbst über das jeweilige Tagesjournal der Betriebsleitstelle nicht rekonstruierbar, so dass ein Rückschluss auf Interventionsdauern nicht möglich war.

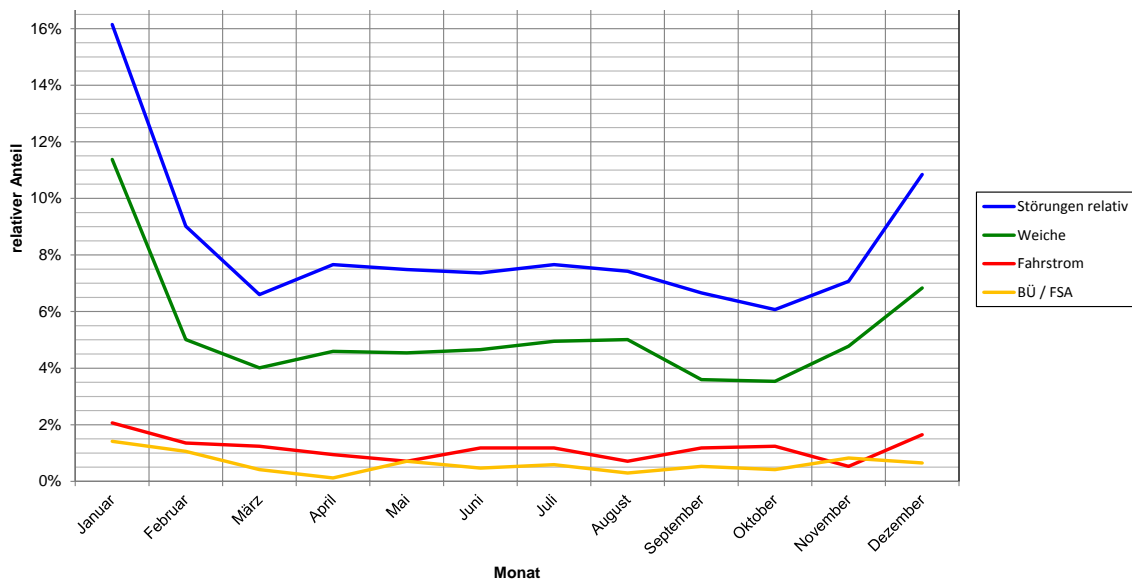


Abbildung 67: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Jahrgang 2009 (eigene Darstellung)

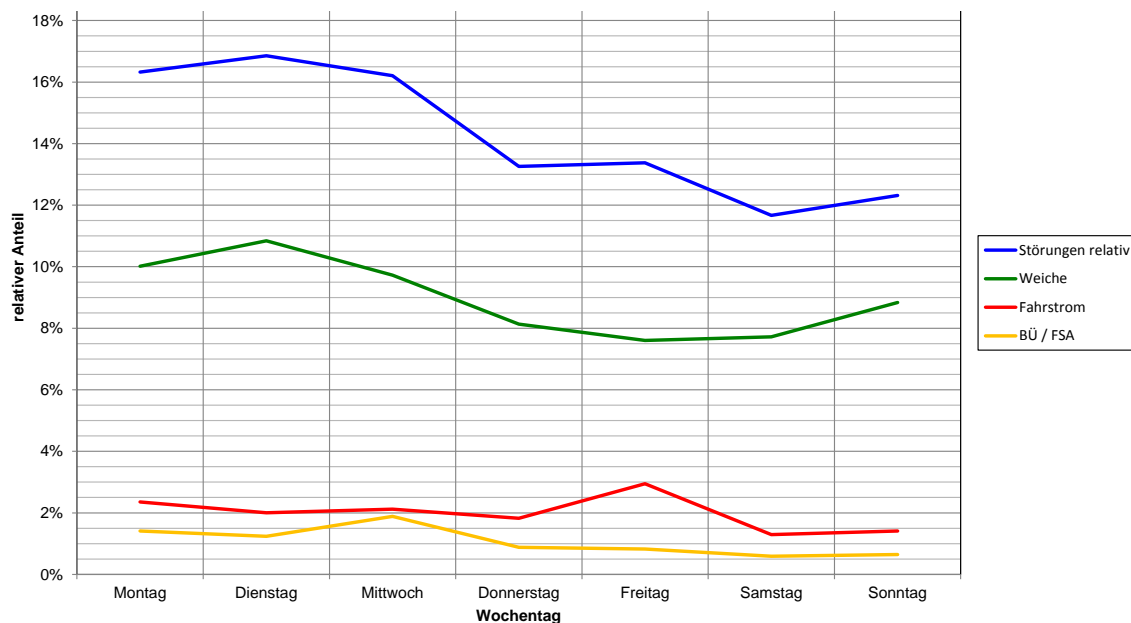


Abbildung 68: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Wochengang 2009 (eigene Darstellung)

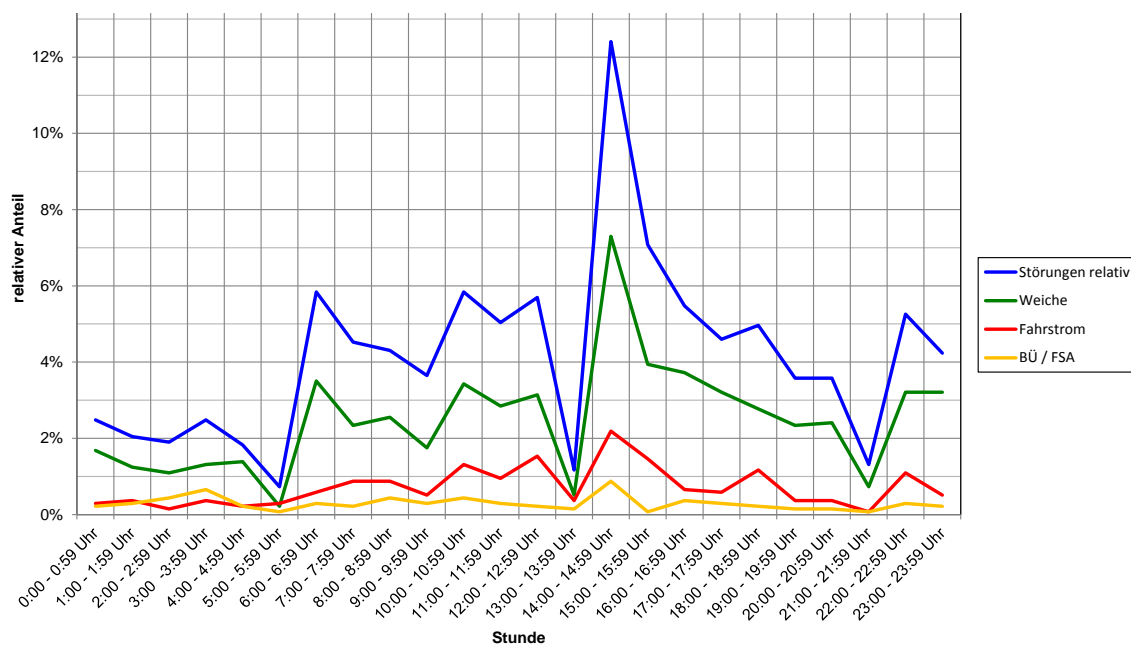


Abbildung 69: Meldungen zu DVB-Infrastrukturstörungen im Tagesgang 2009 (eigene Darstellung)

Bei der Analyse der Ursachen für die häufigen Weichenstörungen (Abbildung 70) fällt die Dominanz der Themenfelder Steuerung und Aussenanlage auf. Hierbei wird oftmals das manuelle Umstellen elektrischer Weichen erforderlich, was für die Intervention einen Reset an der Anlage erfordert. Dies bewirkt eine Vielzahl von Einsätzen an den jeweiligen Weichen. Das wird ebenso bei irrtümlichen Besetztmeldungen notwendig, wenn vom MIV überfahrene Weichen eine Belegmeldung ausgeben, was das elektrische Umstellen bis auf weiteres verhindert und eine Intervention vor Ort erfordert. Das Themenfeld „Aussenanlage“ wird oft durch Verunreinigung im Zungenbett ausgelöst, erfordert aber ebenso eine Reinigung vor Ort und damit einen Interventionseinsatz.

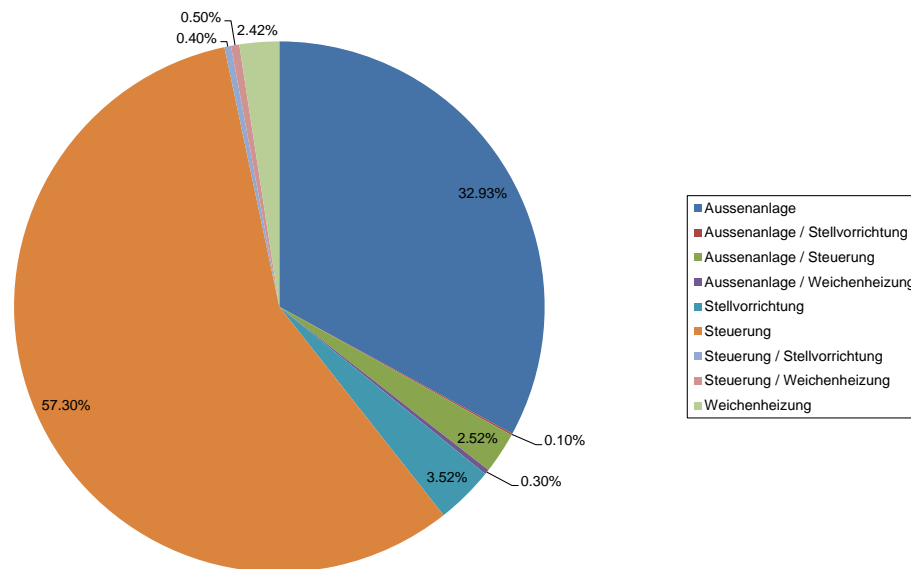


Abbildung 70: Subsystemanteil der Weichenstörungen 2009 (eigene Darstellung)

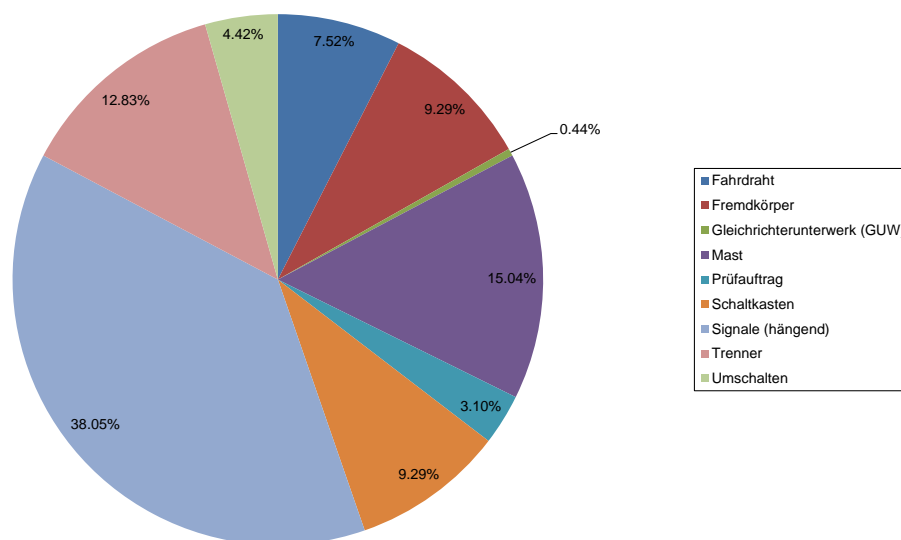


Abbildung 71: Subsystemanteil der Fahrstromstörungen 2009 (eigene Darstellung)

Die Meldungen vom Fahrstrom sind wie schon erwähnt mit den Einsätzen des Turmwagens verknüpft und somit eher irrtümlich von den Signaltafeln dominiert. Da deren Umhängen auch nach Abschluss von Bauarbeiten nötig wird (z. B. Aufheben einer Langsamfahrstelle), lässt sich die Freitagsspitze im Wochengang der BEV-Meldungen herleiten. Andere Häufigkeiten treten im Bereich der Fahrleitungsmasten auf, beispielweise die Kontrolle auf Standfestigkeit nach Pkw-Kollisionen. Einsätze treten auch an den bei Gleichstrombahnen häufigen Streckentrennern auf, deren Hörner gelegentlich nachzustellen sind, um ein Steckenbleiben von Fahrzeugen unter dem Trenner zu unterbinden. Die Störungsdominanz der (elektrischen) Weichen im Mischverkehr mit dem MIV bleibt davon aber unbeeindruckt.

Sowohl im Vollbahn- als auch im Stadtbahnbereich liegen Daten über technische Störungsdauern und die zugehörige Intervention vor. Allerdings ist die Durchgängigkeit der ausgewerteten Störungsdaten bisher noch nicht immer gross genug, um detaillierte Schlüsse zum Interventionsprozess ziehen zu können. Dennoch konnte ein generischer Interventionsprozess aufgestellt werden, in den die meisten Interventionsmuster eingeordnet werden können. Erst mit einem detaillierten Wissen über die technische Störungsdauer können auf betrieblicher Seite geeignete Dispositionskonzepte erstellt und durchgeführt werden. Als Konsequenz aus diesen Befunden ist die Datendurchgängigkeit sowohl im Vollbahnbereich als auch bei den Stadtbahn-systemen zukünftig zu stärken.

Im Interventionsprozess spielen innerbetriebliche Informationsflüsse eine wesentliche Rolle. In diesem Kapitel wurde darauf noch nicht eingegangen, da die statistischen Muster der technischen Störungsdauern im Mittelpunkt stehen sollten. Die innerbetrieblichen Meldekettens werden daher im Zusammenhang mit den Informationsflüssen an den Endkunden im folgenden Kapitel 6.3 betrachtet.

6.3 Ereigniskommunikation

6.3.1 Innerbetriebliche Meldekette im Ereignisfall

Die Kommunikation im Ereignisfall findet sowohl erstellerseitig als auch gegenüber dem Endkunden statt. Entsprechend den bisherigen Ausführungen zur internen betrieblichen wie technischen Entstörung wird zunächst die innerbetriebliche Meldekette (Kapitel 6.3.1) aufgezeigt, bevor das Informationsbedürfnis des Endkunden (Kapitel 0) und dessen Umsetzung in die Ereigniskommunikation (Kapitel 6.3.3) betrachtet werden.

Elementarprozesse mit Grundfunktionen

An der Entstörung und der damit relevanten Ereigniskommunikation sind Akteure (vgl. Kapitel 2.3.2) im gesamten Bahnsystem beteiligt. Diese Akteure sind die Infrastrukturbetreiber, die Verkehrsunternehmen und die Bahnbetriebsführung. Deren Zusammenwirken wird im Rahmen der „Meldekette“ hier untersucht. Die wichtigsten Elementarprozesse dieser Akteure werden dabei wie folgt aufgeschlüsselt:

- Operation (Einstellen und Überwachen des Fahrwegs)
- Disposition (betriebliche Störungsbehebung)
- Intervention (technische Störungsbehebung)
- Fahrbetrieb (Durchführung der eigentlichen Fahrt)

An der Störungsbehebung sind die betriebliche Operation (z. B. Fahrweg einstellen und überwachen), die Disposition (z. B. Priorisierung nichtkonfliktfreier Fahrten) und die Intervention (z. B. Störungsbehebung am Ereignisort) massgebend beteiligt (Schranil, et al., 2012). In der Top-Down-Betrachtung (siehe Kapitel 4.3) werden Störereignisse erst an deren Wirkung erkannt. Somit werden zunächst Abweichungen der Soll- von der Ist-Weg-Zeit-Linie identifiziert. Dies geschieht im realen **Fahrbetrieb** in Verantwortung der Verkehrsunternehmen und je nach Ausprägung der Betriebsführungsinstrumente parallel dazu in der Bahnproduktion (**Operation**), beispielsweise in der Betriebszentrale (Vollbahn) bzw. auf der Leitstelle (Stadtbahn).

Aus der Analyse des jeweiligen Störereignisses ist abzuleiten, welche technischen und betrieblichen Massnahmen zu ergreifen sind; dies ist das eigentliche Einsatzgebiet der Störungsprognose. Hierbei sind eine Vielzahl von Informationen zwischen den Akteuren auszutauschen. Betrieblich folgt nun das Abwägen verschiedener Massnahmeoptionen und das Entscheiden, Kommunizieren und Umsetzen der konkreten **Disposition**. Naturgemäss sind technische Störungen kaum allein durch betriebliche Massnahmen abzufangen. Vielmehr ist eine technische Entstörung erforderlich. Die **Intervention** bezeichnet die Gesamtheit der Massnahmen zur technischen Fehlerbehebung. Insbesondere beim Eingriff am Ort des Ereignisses ist eine Abstimmung zwischen Disposition und Intervention erforderlich.

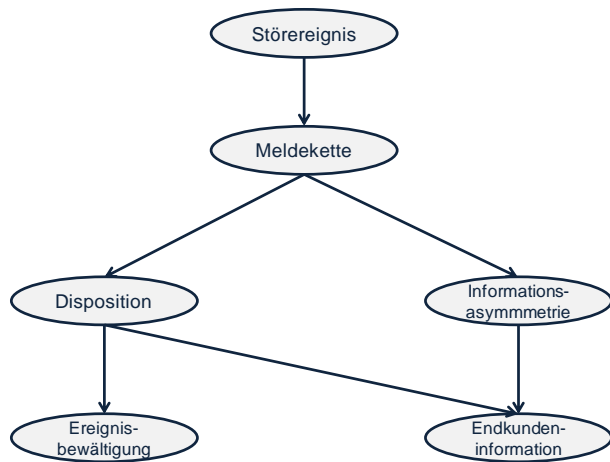


Abbildung 72: Interaktionen der Grundfunktionen (Schranil, et al., 2012)

Endkundenseitig ergibt sich aus den genannten Aspekten zunächst eine Informationsasymmetrie (Abbildung 72): Da der Endkunde von den tendenziell verborgenen innerbetrieblichen Prozessen praktisch nichts mitbekommt, ist die **Endkundeninformation** im Störfall unabdingbar. Andernfalls wären die vorgenannten erstellerseitigen Prozessschritte der Entstörung für den Nutzer des Bahnsystems nicht nutzbar und somit wertlos. Sollen Operation, Disposition, Intervention und Fahrbetrieb im Ereignisfall zusammenarbeiten, erfordert dies den Austausch vielfältiger Informationen. Für die Effizienz der Störungsbewältigung ist insbesondere die Meldekette vom Eintritt eines Ereignisses bis zur Auslösung einer Disposition/Intervention relevant. Dazu ist eine Abstraktion auf relevante Kernelemente der Ereigniskommunikation erforderlich, schematische Darstellungen dienen darauf aufbauend der Visualisierung. Abbildung 73 zeigt die im Folgenden verwendete Symbolik:

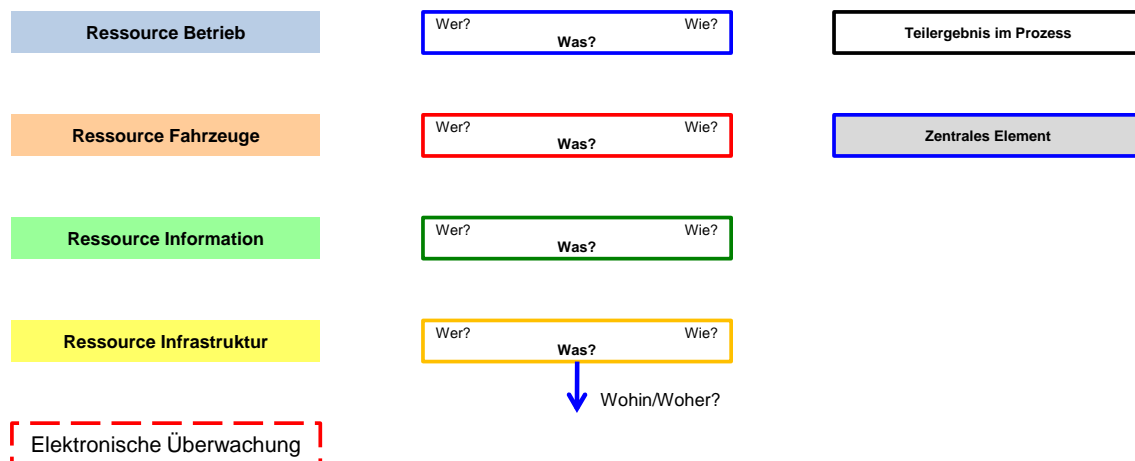


Abbildung 73: Legende zu den Meldekettendarstellungen (Schranil, et al., 2012)

Sobald abzuleiten ist, dass ein betrieblicher Einfluss für den Einzelzug zu verzeichnen ist, kann eine präzisierte Endkundenkommunikation als Ergebnis der Einzeldisposition durchgeführt werden. Den Ausgangspunkt der Meldekettensicht bildet der regulär geplante Fahrbetrieb, welcher bis zum Störungseintritt lediglich überwacht bzw. beobachtet wird. Eine Störung kann nun im Fahrbetrieb (z. B. Fahrzeugstörung), in der Betriebsführung (im Bereich von Operation oder

Disposition) oder auf der Seite der Infrastruktur (z. B. Stellwerksstörung) identifiziert werden und eine auszutauschende Erstmeldung auslösen. Zentral ist der Meldungseingang bei der Betriebsführung (betriebliche Störungsbehebung) sowie bei den Technikbereichen zur technischen Entstörung. Auf der Betriebsführungsseite ist die eingetretene Störung einer konkreten Disposition zuzuführen, welche an den Fahrbetrieb abzugeben und dort umzusetzen ist. Die Beobachtung dieser Umsetzung obliegt wiederum der Betriebsführung. Die technische Intervention läuft unabhängig von der Betriebsführung ab. Neben dem voraussichtlichen Interventionsende ist für den Fahrbetrieb die Freigabe oder die Entscheidung über eine Interventionsverschiebung relevant.

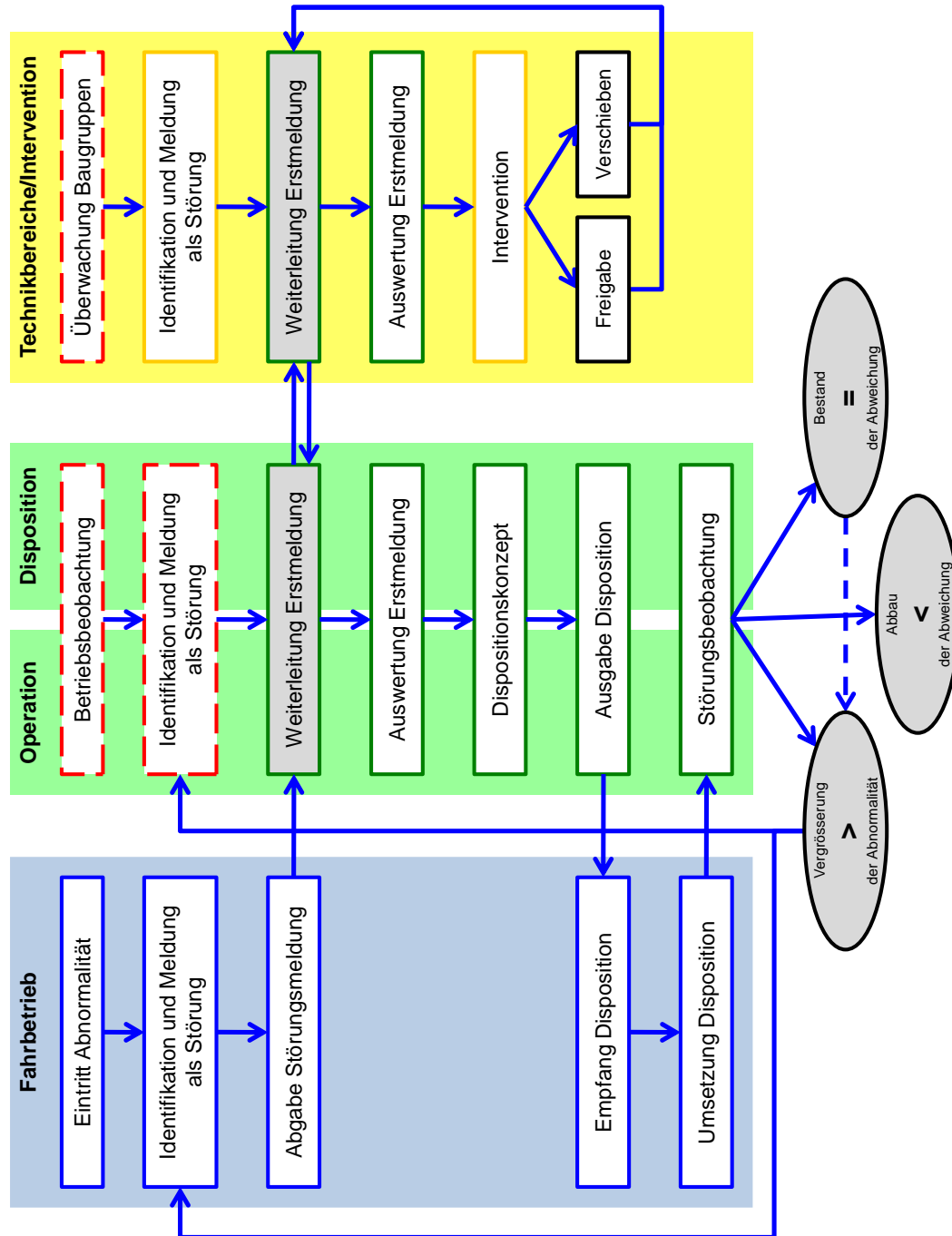


Abbildung 74: Allgemeine Meldekette in Bahnsystemen (Schranil, et al., 2012)

Die weitere betriebliche (Ent-) Störungsbeobachtung erfolgt nun durch die Betriebsführung, deren Sichtweise eher auf den Störungsort fokussiert ist. Die Sichtweise der Technikbereiche konzentriert sich hingegen auf die Störungsart (Schranil, et al., 2012). Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 74 dargestellt. Sie zeigt somit die Prozesssicht noch bewusst ohne konkrete Realisierungswege innerhalb der verschiedenen Bahnsysteme.

Meldeketteneispiele Vollbahn und Stadtbahn

Die nachfolgend gewählten Beispielbahnen zum Aufzeigen der Meldekette sind sehr heterogen in Systemart und Systemgrösse. Auch die Unternehmensgrössen unterscheiden sich, gleiches gilt für die Betriebskonzepte bzw. Betriebsweisen. Zentrale Gemeinsamkeit ist einmal mehr die Spurbundenheit, welche aus den technischen Überlegungen heraus gewisse Ähnlichkeiten der Meldekettenelemente erwarten lässt. So bestehen bei den gewählten Beispielen Parallelen, die sich in den konkreten Ausprägungen der jeweiligen Meldekettenelemente zeigen und gewissen Mustern gehorchen. Daraus lässt sich herleiten, an welcher Stelle letztlich die zentralen Dispositionsentscheidungen getroffen werden. Neben ihrer innerbetrieblichen Übermittlung und Umsetzung sind jene Massnahmen für die Endkundenkommunikation zu verwenden.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen konkret implementierten Meldekettenelementen verschiedener Bahnsysteme respektive Netzbetreiber herstellen zu können, ist es zweckmässig, in diese allgemeine Prozessbeschreibung zusätzlich die jeweiligen Zuständigkeiten zu benennen. Dies geschieht nun sowohl für die Vollbahn- als auch für die Stadtbahnsysteme an ausgewählten Beispielen:

- ausgedehnte **Vollbahn** (Abbildung 75) → Schweizerische Bundesbahnen SBB
- kleine **Vollbahn** (Abbildung 76) → City-Bahn Chemnitz CBC
- ausgedehnte **Stadtbahn** (Abbildung 77) → Dresdner Verkehrsbetriebe DVB
- kleine **Stadtbahn** (Abbildung 78) → Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau SVZ

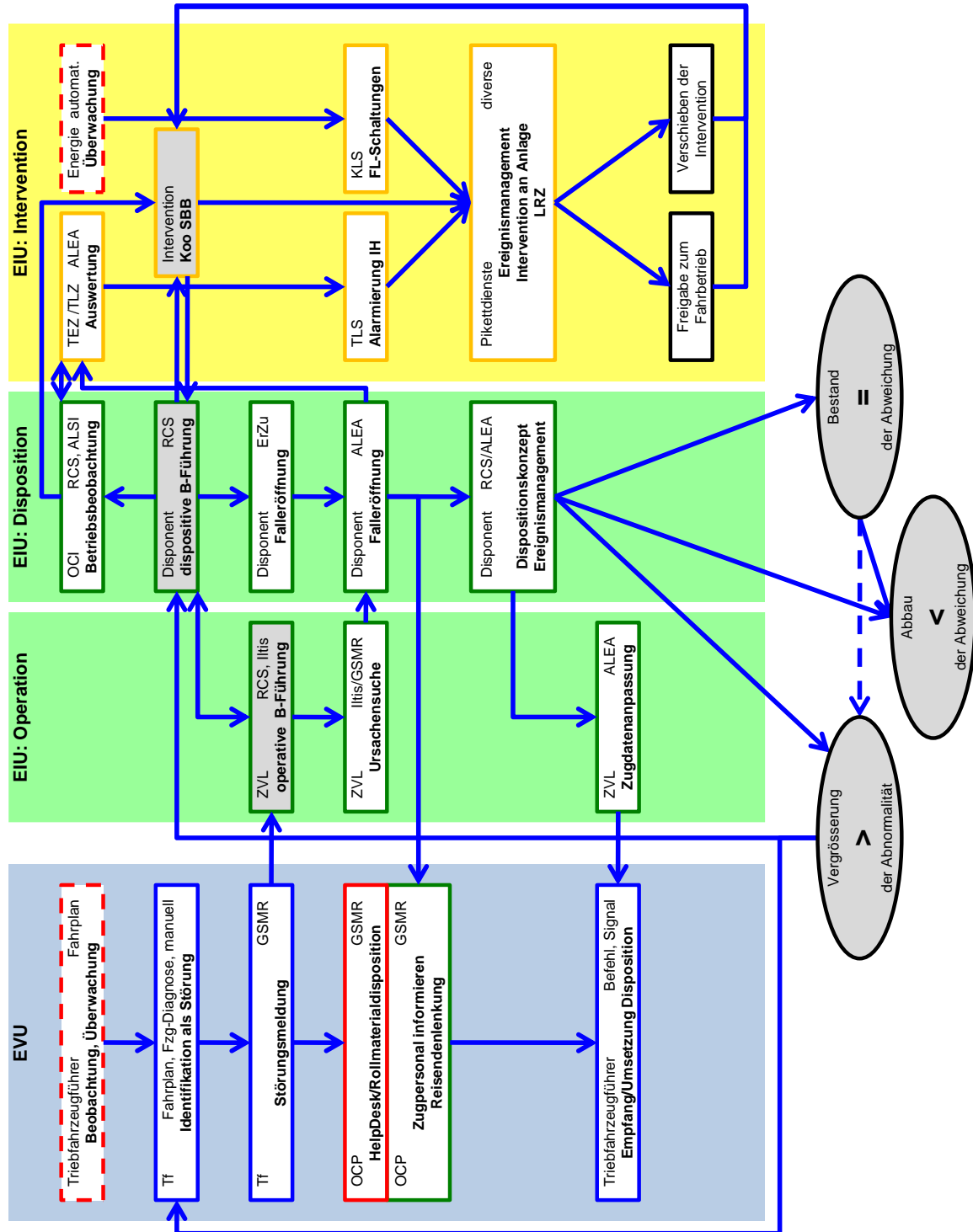


Abbildung 75: Meldekette der SBB (eigene Darstellung)

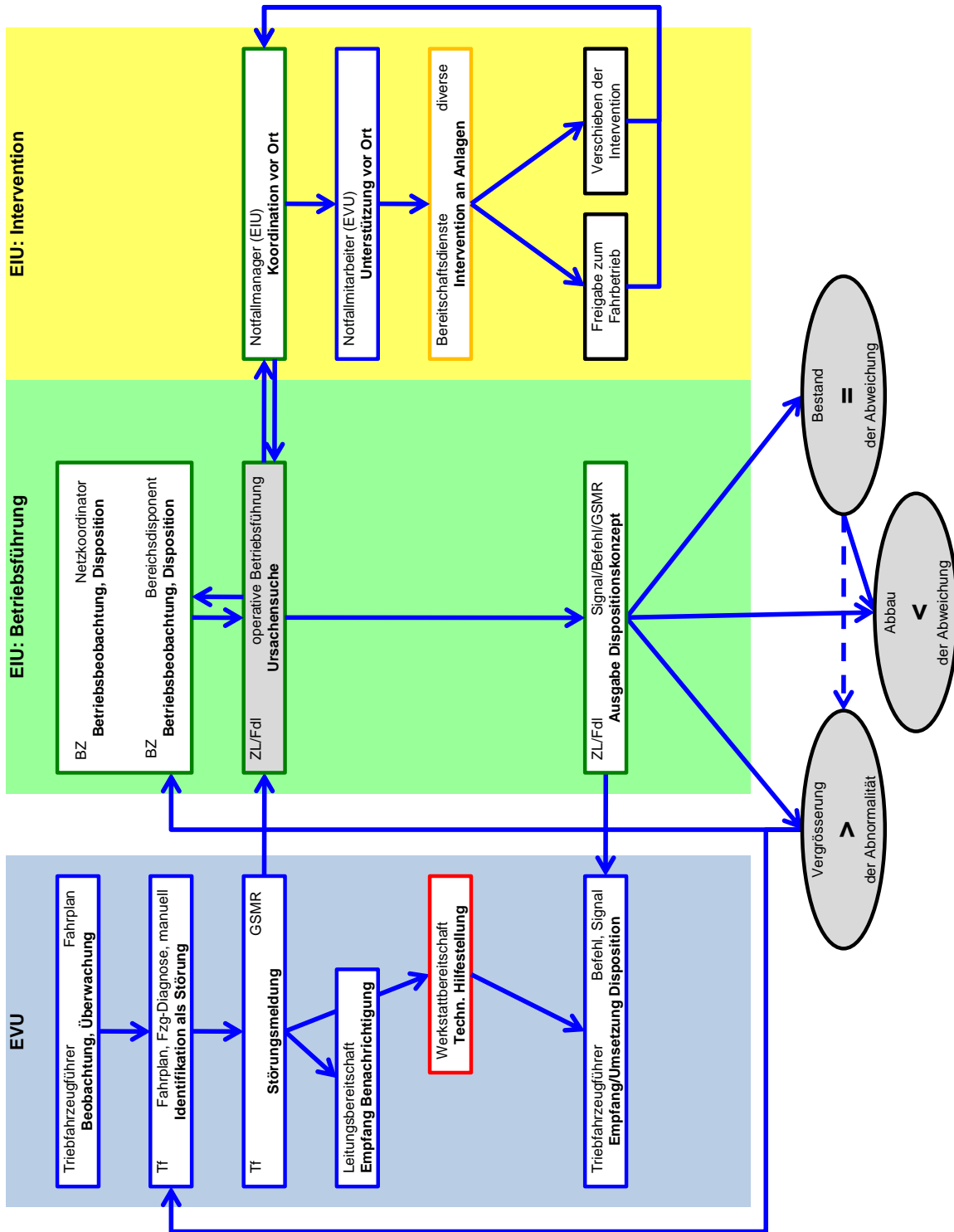


Abbildung 76: Meldekette der CBC (eigene Darstellung)

Bei der hier analysierten Realisierung der treten vor allem zwischen Vollbahnen und Stadtbahnen zentrale Unterschiede auf. Aufgrund der territorial grösseren Fläche des Betriebsgebietes sind die Zuständigkeiten im Störfall bei Vollbahnen regional und organisatorisch breiter gestreut als im Stadtbahnbereich. Bei der Stadtbahn ist vereinfachend kein oder nur geringer Mischbetrieb mit anderen Verkehrsunternehmen zu verzeichnen; es handelt sich praktisch um Inselnetze. Daher sind die Betriebsführungsprozesse bei Stadtbahnen in aller Regel schlanker organisiert als bei Vollbahnen.

Sowohl bei den zwei Vollbahnbeispielen als auch in den zwei Stadtbahnbeispielen ist die Intervention von der operativen Bahnbetriebsführung lediglich über Informationsschnittstellen mit der Betriebsführung verbunden. Darin widerspiegelt sich die Trennung zwischen operativem und technischem Geschehen im Bahnsystem. Dies gilt für die technische Infrastrukturentstörung und die Fahrzeugwerkstätten. Die Bahnbetriebsführung disponiert dabei nur über funktionsfähige Ressourcen.

Nachfolgende Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen Meldekettenschemata aus dem Bereich der Stadtbahnen. In Stadtbahnssystemen wird auf technisch gesicherte Fahrwege überwiegend verzichtet. Die Einstellung beweglicher Fahrweegelemente übernimmt der Fahrer, der Betrieb sieht meist keinen Streckenblock vor²⁵. Daher ist im Stadtbahnbetrieb kein Stellwerk im klassischen Sinn notwendig. Die hier üblichen Betriebsleitstellen entsprechen somit eher den EVU-Leitstellen aus dem Vollbahnbereich. Die Stadtbahnbetriebsleitstellen befinden sich damit auch organisatorisch näher am Fahrbetrieb. Die Intervention mit Aufgaben der technischen (Infrastruktur-) Entstörung agiert eigenständig.

²⁵ Ausnahmen finden sich in Tunnelstrecken, hier meist mit automatischem Block.

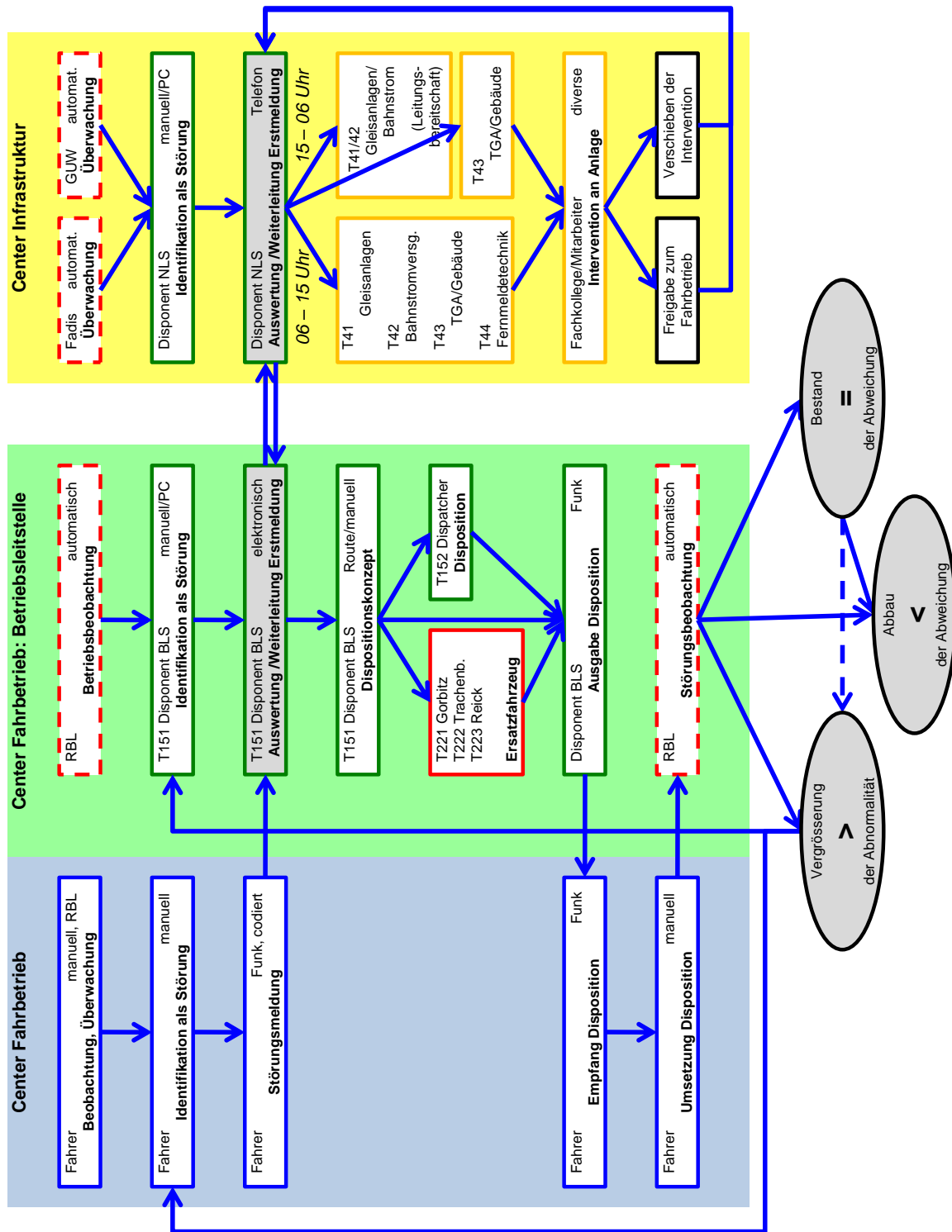


Abbildung 77: Meldekette der DVB (eigene Darstellung)

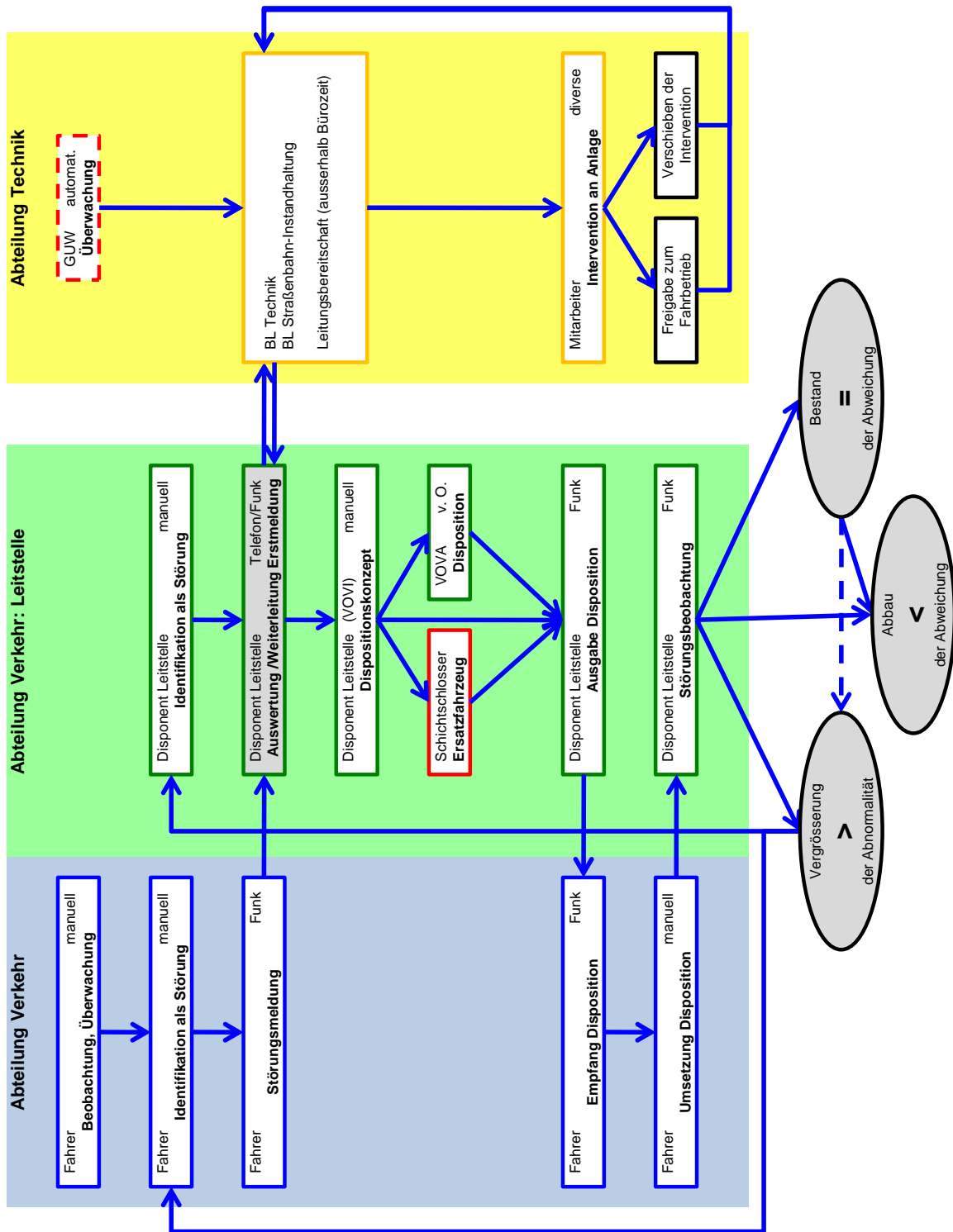


Abbildung 78: Meldekette der SVZ (eigene Darstellung)

Vergleich der Meldekettens Vollbahn und Stadtbahn

Unternehmen	SBB nationales Vollbahnnetz Operation/Center Infrastruktur (OC)	DB nationales Vollbahnnetz Netzkoordinator	ÖBB nationales Vollbahnnetz Verkehrsleitzentrale (VLZ)	CBC regionales EVU (Betriebszentrale (BZ) (Zugleiter (ZL))	DVB grosses Stadtbahnnetz Betriebsleitstelle (BLS)	SVZ kleines Stadtbahnnetz Betriebsleitstelle (BLS)
Art						
Netzdisposition						
Anzahl	1	1	1	1	1	1
Regionaldispo/Operation						
Anzahl	4	7	5	2	-	-
Technik/Intervention						
Anzahl	4	7	1	1	1	1
Bemerkungen	Zusammenführung von Disposition und Operation in BZs	BZs überwiegend für Hauptstrecken	Notfallkoordinator (Noko)	Werkstattbereitschaft	Netzleitstelle (NLS)	BL Technik/IH

Unterschiedliche Betriebsformen von Voll- und Stadtbahn widerspiegeln sich folglich auch in der Bahnbetriebsführung und dem Umgang mit Störereignissen. Beim Vergleich von Stadtbahn- und Vollbahn-Meldekettens fallen einige grundsätzlich abweichende Organisationsformen auf. So sind Operation, Disposition und Intervention bei der Vollbahn im Bereich der Infrastruktur angegliedert. Dies resultiert aus der Notwendigkeit technisch gesicherter Fahrwege (Schleicher, 2011) und bewirkt historisch betrachtet eine enge organisatorische Verzahnung dieser Aspekte. Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) können separate Leitstellen vorsehen; diese übernehmen dispositive Aufgaben der Personal- und Fahrzeugumlaufplanung statt operativer Aufgaben der Fahrwegeinstellung.

Tabelle 37 greift die Anzahl der zuständigen Stellen für die Systemführung des Bahnbetriebs heraus. In dieser hochaggregierten Betrachtung sind die verschiedenen Bahnsysteme recht gut vergleichbar. Das rührt zum grossen Teil daraus, dass die Netzdisposition bzw. Netzleitung sinnvollerweise an genau einer Stelle konzentriert wird. Die regionale Ebene richtet sich dann nach der Grösse des Bedienungsgebiets *und* dem dortigen Betriebsprogramm. Meist werden die Bereiche der Technik bzw. Intervention regional direkt angegliedert. So betrachtet, sind die Systemunterschiede zwischen Vollbahn und Stadtbahn bei allen betrieblichen, technischen und bisweilen rechtlichen Besonderheiten insgesamt jedoch klein.

Je nach Grösse des Bahnsystems bzw. des Bahnunternehmens verfügen die Meldekettens über eine grössere Anzahl zuständiger Instanzen. Dabei ist es grundsätzlich zweitrangig, ob die Bahnsysteme in Netz und Betrieb getrennt operieren. Jedoch sind die Schnittstellen im getrennten Szenario unternehmensextern. Dies ist prinzipiell zu beherrschen, jedoch sind hierbei entsprechende Informationsschnittstellen zu definieren und zu pflegen.

Tabelle 37: Zusammenstellung der zuständigen Stellen im Sinn der Meldekette (eigene Darstellung)

6.3.2 Informationsbedürfnis des Endkunden

Die betriebsrelevanten Einflüsse der Intervention (siehe Kapitel 6.2) sowie endkundenrelevante Entscheidungen der Disposition (siehe Kapitel 6.1) sind für die Endkunden spürbar. Daher sind diese Aspekte entsprechend zu kommunizieren. Im Störfall ist das eine Herausforderung, da auf Seite des Erstellers bereits eine eher grosse Menge an (innerbetrieblichen) Informationen zu verarbeiten ist und mitunter nur beschränkt Ressourcen für die Endkundeninformation bereitstehen. Dennoch ist die Endkundenkommunikation gerade im Störfall von zentraler Bedeutung für die subjektive Wahrnehmung und Bewertung des Bahnsystems, aber auch für elementare Fragen wie das Ausweichen auf andere Verbindungen. Den durchschnittlichen Nutzer interessieren betriebsinterne Aspekte der Bahnproduktion weniger. Er ist fokussiert auf die eigene Wege- oder Transportkette. Demzufolge ergeben sich drei Hauptaspekte, welche bei der Kommunikation mit dem Endkunden beachtet werden sollten (Schraniil, et al., 2011):

- **rechtzeitige Information bei Handlungserfordernis**

Ein Handlungserfordernis entsteht, wenn die Wegekette nicht in der geplanten Form durchgeführt werden kann. Dies ist beispielsweise bei Anschlussbrüchen der Fall, welche endkundenseitig Terminverschiebungen auslösen können.

- **zuverlässige Information bei voraussichtlichem Handlungserfordernis**

Neben allen verspätungsbedingten Folgen für den Endkunden (z. B. Nichteinhalten von Terminen), gibt es im Personenverkehr eine weitere sehr unangenehm empfundene Situation: Die Phase einer bemerkbaren Fahrplanabweichung *ohne* erkennbaren Grund, beispielsweise durch einen ausserplanmässigen Zwischenhalt. In diesem Moment sind für den Kunden weder Ursache noch voraussichtliches Ausmass transparent, was ein gewisses Unbehagen auslöst. Eine Information über die aktuelle Lage in derartigen Situationen ist vor allem im Interesse der Kundenzufriedenheit angebracht, auch wenn die Erstinformation möglicherweise im Ereignisverlauf präzisiert werden muss.

- **keine unnötigen Informationen**

Im Informationszeitalter werden auch Nutzer von Bahnsystemen mit Meldungen überhäuft. Eine Beschränkung auf wichtige *und* relevante Informationen ist somit wünschenswert²⁶. Dies betrifft beispielsweise Informationen bei Ankunft innerhalb der Pünktlichkeitsgrenze, aber ausserhalb der im Fahrplan angegebenen Minute. Hier ist in der Regel keine Information erforderlich und wird andernfalls vom Fahrgast als überflüssig wahrgenommen. Anders verhält es sich, sollten innerhalb der Pünktlichkeitsgrenze bereits Anschlüsse gefährdet werden; dies ist von Seiten der Angebotsplanung im Vorfeld zu vermeiden.

²⁶ In diese Rubrik fallen auch aus Marktüberlegungen resultierende Gastronomieansagen im Eisenbahnfernverkehr.

6.3.3 Information und Kommunikation im Ereignisfall

Im Ereignisfall sind sowohl die innerbetriebliche Meldekette (siehe Kapitel 6.3.1) als auch das Informationsbedürfnis des Endkunden (siehe Kapitel 0) in eine geeignete Kommunikation gegenüber dem Endkunden zu überführen. Im Kontext dieser Forschungsarbeit wird hiermit insbesondere die abgeleitete Forschungsfrage 5 (Ereigniskommunikation) adressiert.

Die Kommunikation ist immer dann zeitnah anzustossen, wenn es einer der drei Aspekte aus den Überlegungen zum Informationsbedürfnis des Endkunden erfordert. Im Ereignisfall im Bahnsystem ist zwischen der Kommunikationsseite gegenüber dem Endkunden und der innerbetrieblichen Toleranzseite zu unterscheiden. Die Kommunikationsseite definiert hierbei die konkrete Informationsabgabe an den Endkunden. Die Toleranzseite zeigt hingegen innerbetriebliche Zeitgranularitäten, welche zum Aufdecken von Abweichungen von Interesse sind (siehe Abbildung 79).

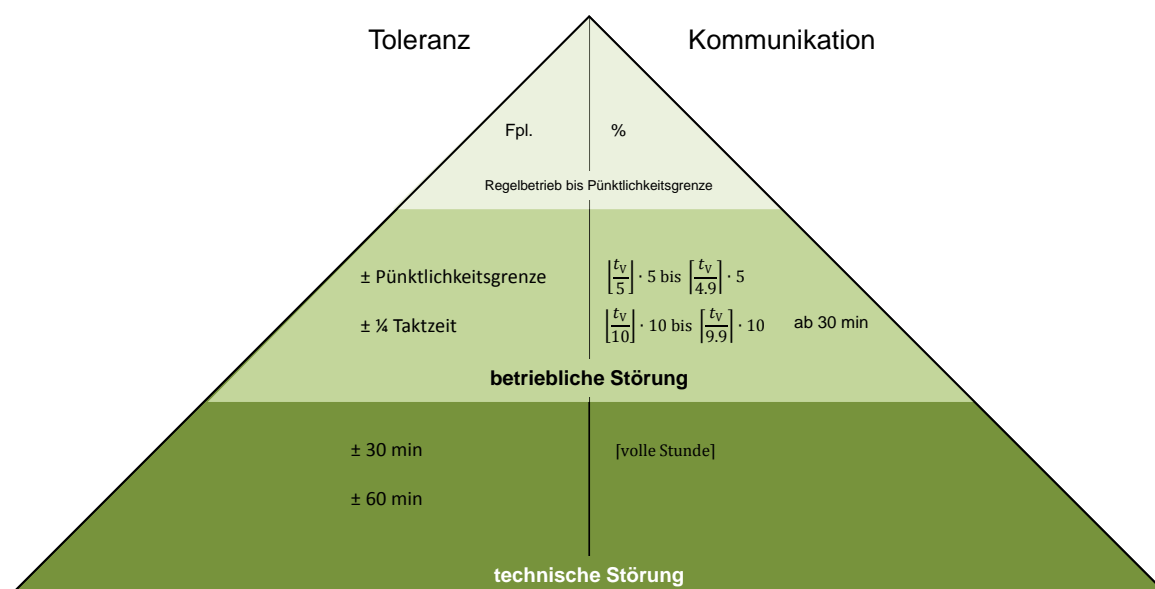


Abbildung 79: Toleranz- und Kommunikationsseite im Störungsfall (Schrani, et al., 2012)

Ausgehend von der Toleranz- bzw. Kommunikationsseite sind drei Situationen zu unterscheiden:

- Regelbetrieb bis Pünktlichkeitsgrenze
- betriebliche Störung
- technische Störung

Für jeden dieser Zustände sind unterschiedliche Prinzipien der Endkundeninformation im Ereignisfall ableitbar (vgl. Abbildung 79). Unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze sollen Abweichungen allenfalls innerbetrieblich erfasst, aber nicht an den Endkunden kommuniziert werden. Die Grösse der Fahrplanabweichung für den Einzelzug sollte in 5-Minuten-Intervallen abgegeben werden, beispielsweise „ca. 5 bis 10 Minuten später“ (statt „ca. 8 Minuten später“ oder nur „ca. 5 Minuten später“). Die voraussichtliche Dauer der technischen Störung kann als Hintergrundinformation aufgerundet auf volle Stunden abgegeben werden (z. B. „Fahrleitungsstörung bis ca. 12 Uhr“).

Von Relevanz für den Endkunden bleibt hingegen einzig die Fahrplanabweichung des einzelnen Zuges (Schranil, et al., 2012).

Die Betriebsführung im Störfall unterliegt ebenso wie der Regelbetrieb diversen systemimmanenten Einflüssen, welche die voraussichtliche betriebliche Störungsdauer ebenso treffen und erneut beeinflussen können. Daher erfolgt die betriebliche Endkundenkommunikation in 5-Minuten-Schritten und nicht minütlich; bei grösseren Abweichungen wird auf volle 10 Minuten gerundet. Dies unterbindet ein permanentes Korrigieren kommunizierter Abweichungen, wie es in der Praxis bisweilen leider üblich ist. Weiterhin wird das irrtümliche Darbieten einer zu kleinteiligen Prognosegranularität vermieden. Die detaillierte betriebliche Kommunikationsgranularität bildet nachfolgende Formel ab:

$$t_{v,komm} = \begin{cases} 0 \text{ (...} p) \\ p \text{ ...} 5 \\ \left\lfloor \frac{t_v}{5} \right\rfloor \cdot 5 \text{ bis } \left\lfloor \frac{t_v}{4,9} \right\rfloor \cdot 5 \\ \left\lfloor \frac{t_v}{10} \right\rfloor \cdot 10 \text{ bis } \left\lfloor \frac{t_v}{9,9} \right\rfloor \cdot 10 \\ 120 \text{ bis } > 120 \end{cases} \quad \text{für} \quad \begin{cases} t_v \leq p \\ p < t_v < 5 \\ 5 < / \leq t_v < 30 \\ 30 \leq t_v < 120 \\ \geq 120 \end{cases} \quad (39)$$

mit p Pünktlichkeitsgrenze in min
 t_v prognostizierte Zugverspätung in min
 $t_{v,komm}$ kommunizierte Zugverspätung in min

Weiterhin sollte auch im Störfall keine Abfahrt vor der kommunizierten Abfahrtszeit stattfinden. Daher muss die ursprüngliche geplante Abfahrtszeit in den nachgeführten Fahrplanauskunftsmedien ersichtlich bleiben und lediglich um die voraussichtliche Abweichung ergänzt werden. Ausserdem sollte die prognostizierte Abfahrtszeit ab etwa zehn Minuten vor der realen Abfahrt nicht mehr herabkorrigiert werden, um eine irrtümliche Fluktuation der Endkunden vom Zugangspunkt (z. B. Weglaufen in Warteraum) zu vermeiden. Eine – auch scheinbare – Verfrühung oberhalb der Pünktlichkeitsgrenze entspricht in der endkundenseitigen Wahrnehmung einem Ausfall der Fahrt.

Nunmehr sind für die entsprechend den obigen Überlegungen auszuführende Endkundeninformation geeignete Kanäle aufzuzeigen, um die entsprechenden Informationen an die Endkunden zu kommunizieren. Damit gelangt die Umsetzung der Endkundenkommunikation in den Betrachtungsfokus. Die Systematik dieser Kanäle wird im Folgenden grafisch dargestellt. Dabei werden die Informationspfade systematisiert nach der eingesetzten Ressource, dem bei der Kommunikation angesprochenem menschlichen Sinn und dem Informationsprinzip (Bringen bzw. Holen).

Beim Holprinzip wird zunächst der Endkunde aktiv, um eine Information zu erhalten – beispielsweise indem er eine Hotline anruft. Demgegenüber wird beim Bringprinzip zuerst der Ersteller aktiv, indem er beispielsweise eine Bahnsteigansage einleitet.



Abbildung 80: Legende zu den Kommunikationspfaden (eigene Darstellung)

Die Symbole aus Abbildung 80 werden für die Analyse der Kommunikationspfade verwendet. Auf Grund ihrer Verschiedenartigkeit erfolgen für Personenverkehr mit dem Fahrgast als Endkunden (Abbildung 81) und für den Güterverkehr mit dem Verloader als Endkunden (Abbildung 82) separate Analysen. Deren Ergebnisse ermöglichen eine kompakte Darstellung der Kommunikationspfade im Ereignisfall sowie eine Zusammenfassung ähnlicher Massnahmen separiert in Güter- und Personenverkehr. Der zentrale Unterschied ist, dass sich der Fahrgast im Personenverkehr selbst im Transportgefäss befindet und somit sich selbst informieren kann. Daraus folgen höhere Ansprüche an eine zeitnahe Information bei Ereigniseintritt. Weiterhin kann der Fahrgast seinen Erkenntnisstand direkt anderen Fahrgästen kundtun und eine Information weiterverbreiten. – Im Fall der Stadtbahn sind Verkehrsunternehmen und Infrastrukturbetreiber über die Betriebsleitstelle verknüpft, bei der Vollbahn besteht zwischen diesen die beschriebene Meldekette, da eine integrale Betriebsleitstelle meist fehlt.

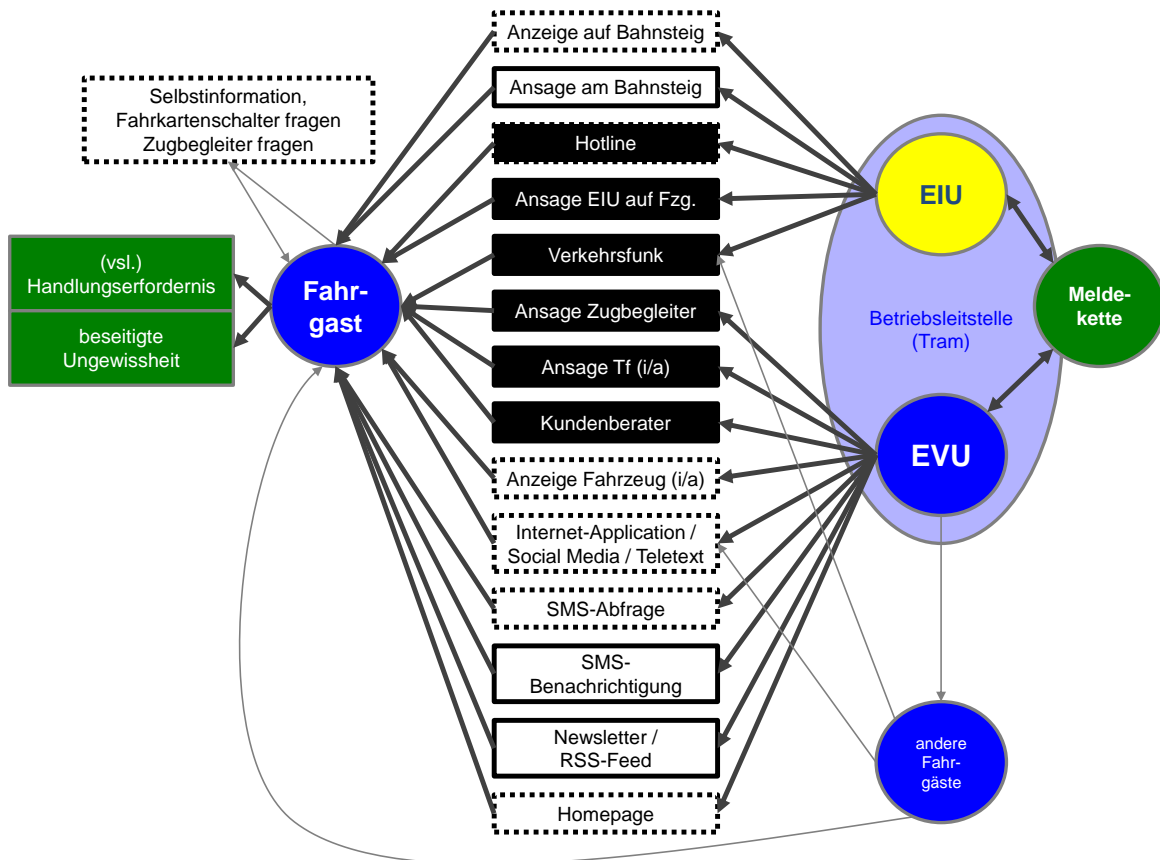


Abbildung 81: Kommunikationspfade zum Endkunden im Personenverkehr (eigene Darstellung)

Durch die Möglichkeiten moderner Informationsverarbeitung steigen auch die Möglichkeiten der Selbstinformation des Fahrgasts im Verkehrssystem. Selbst direkte Informationen zwischen den Fahrgästen ohne Einbeziehung der Instanzen des Bahnsystems sind realistisch. Eine Realtime-Information über mögliche Alternativverbindungen (beispielsweise als Smartphone-App) ist endkundenseitig bei dichtem Angebot, also zahlreichen Fahralternativen ab den folgenden Stationen, oder bei einem eher unsystematischem Angebot mit schlechter Merkbarkeit für den Endkunden von Nutzen. Dabei ist das Einpflegen der aktuellen Störungen seitens des Erstellers in die Auskunftssysteme essentiell und die Störungsprognose dafür nutzbar. Der zentrale Output dieser Kommunikationspfade bleiben jedoch die thematischen Aspekte Handlungserfordernis, vorausichtiges Handlungserfordernis und/oder schlicht beseitigte Ungewissheit. Der Infrastrukturbetreiber kann im Störfall diverse Kanäle der Endkundenkommunikation selbst betreiben oder diese Information über das Verkehrsunternehmen in Richtung der Endkunden weitergeben.

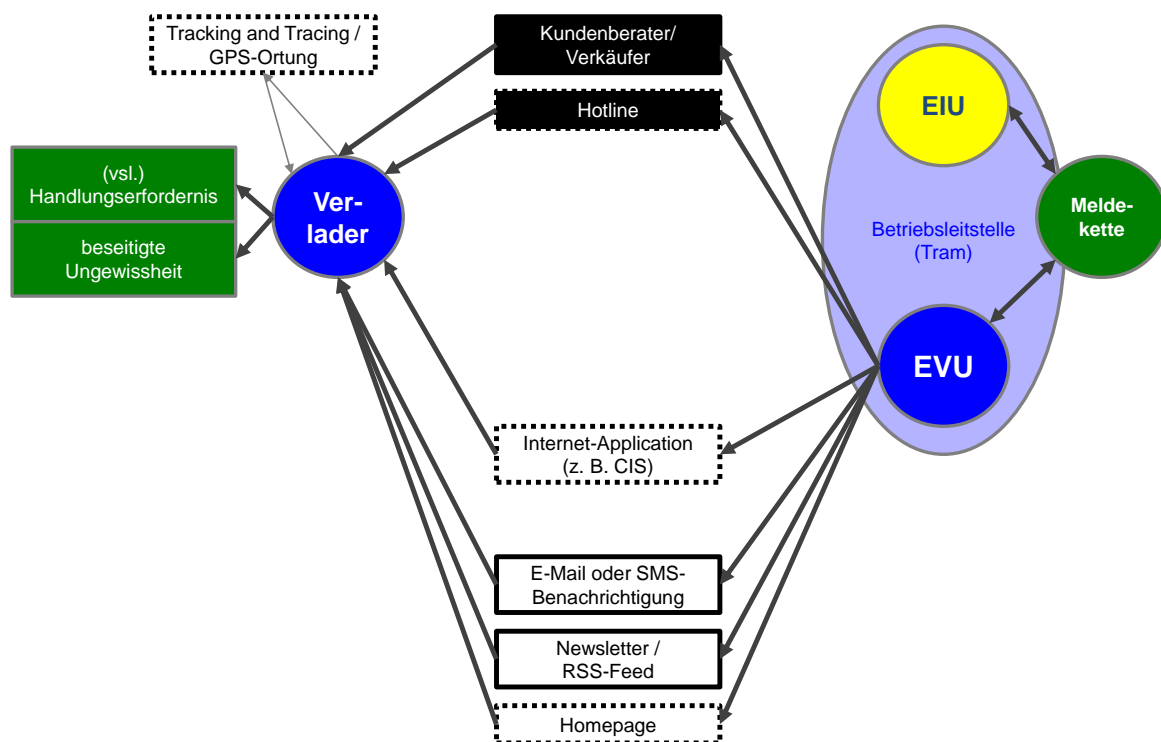


Abbildung 82: Kommunikationspfade zum Endkunden im Güterverkehr (eigene Darstellung)

Wechselt man für die Betrachtung der Kommunikationspfade nun in den Güterbahnbereich, zeigt sich ganz allgemein die Gemeinsamkeit der notwendigen Endkundenkommunikation im Ereignisfall (Abbildung 82). Hierbei fallen jedoch sämtliche Kommunikationspfade zum Transportgefäß als irrelevant weg; dieses dient ausschliesslich einer möglichen Datenerhebung im Sinne von Ort bzw. Zeit. Gleiches gilt für die Selbstinformation des Endkunden, welche im Güterfall wegfällt. Im Allgemeinen ist das EIU als Netzbetreiber nicht mehr an der Endkundenkommunikation beteiligt. Somit reduziert sich die Zahl möglicher Kommunikationspfade beachtlich. Andererseits kommen Varianten der Ladungsortung und -verfolgung (Tracking and Tracing) hinzu. Insgesamt verbleiben deutlich weniger grundverschiedene Kommunikationspfade. Die Anwendung einer Stadtbahn

als Güterbahn ist dabei eher unüblich (Ausnahmen sind die Cargotrams in Dresden und Zürich), wurde aber der Vollständigkeit halber als mögliche Verkehrsoption mitgeführt.

Information und Kommunikation im Ereignisfall verlaufen sowohl im Güterverkehr als auch im Personenverkehr über verschiedene Pfade und müssen dem Ziel dienen, beim Endkunden einen konkreten Nutzen zu stiften. Die dafür genutzten Informationen müssen vorher die innerbetriebliche Meldekette durchlaufen haben und entsprechend kalibriert worden sein. Die Informationsweitergabe an den Endkunden hat sich dabei an dessen Informationsbedürfnis zu orientieren. Dieses Bedürfnis unterscheidet sich deutlich von den innerbetrieblichen Aspekten in Granularität und Detaillierung der Information. Dies muss sich in einer entsprechenden Informationsaufbereitung und in der Kommunikationsgranularität widerspiegeln. Verbleibende Unsicherheiten sind mit einer Bandbreite der voraussichtlichen betrieblichen und technischen Störungsdauer realistisch anzugeben. Der Fokus der Endkundenkommunikation liegt dabei auf den jeweiligen Zugläufen, nicht auf der Umsetzung in mutmassliche Quell-Ziel-Beziehungen.

6.4 Zwischenfazit zu Kapitel 6

Das Beheben von Störereignissen ist ein sehr vielfältiges Themenfeld. Dahinein spielen die betriebliche Störungsbehebung (Disposition), die technische Störungsbehebung (Intervention) und die Ereigniskommunikation. Diese drei Aspekte interagieren mit der Störungsprognose. Die Überlegungen zur Disposition grenzen das Spektrum möglicher Dispositionsmaßnahmen ausgehend von der voraussichtlichen Fahrplanabweichung ein und können somit Disponenten bei der betrieblichen Entscheidungsfindung unterstützen. Der Erkenntnisgewinn der Interventionsanalysen liegt vor allem im Aufstellen eines quantifizierbaren Interventionsprozesses und im Erkennen grundsätzlicher Interventionsstrategien, wobei Fallstudien zum Verifizieren der Ansätze beitragen.

Für die Ereigniskommunikation ist zunächst die innerbetriebliche Meldekette von Interesse, da hierbei jene später an den Endkunden weiterzugebenden Informationen verarbeitet und aufbereitet werden. Das Informationsbedürfnis des Endkunden ist verstärkt in die Aussagen und Informationskanäle der Endkundenkommunikation zu integrieren. Dazu spielen neue Medien eine zunehmend stärkere Rolle. Besonders im Ereignisfall kommt der Endkundenkommunikation eine grundsätzlich zu stärkende Rolle zu. Hierbei ist der Spagat zwischen beseitigter Ungewissheit und eintretender Informationsflut zu lösen. Bisweilen dominiert jedoch nach wie vor die fehlende Kommunikation im Ereignisfall. Zukünftig sollte sich die Professionalität der Bahnbetriebsführung verstärkt auch im unvermeidlichen Fall von Bahnstörungen in einer endkundengerechten Ereigniskommunikation widerspiegeln.

7 Prognoseprozess im Störfall

7.1 Ansatz und Inputs für den Prognoseprozess

7.1.1 Typen der Störfprognose

Die Störfprognose wird sich mit der Abschätzung technischer und betrieblicher Störfdauern befassen. Der dazu aufzubauende Prognoseprozess greift verschiedene Aspekte der vorangegangenen Kapitel auf, um sie im Sinne des möglichst professionellen Umgangs mit eingetretenen Störungen des Bahnbetriebs zu verknüpfen. Es wird noch zu zeigen sein, in welcher Form dabei prozessuale und statistische Aspekte Verwendung finden. In der praktischen Bahnbetriebsführung wird der Störfall heute sehr stark auf den Einzelfall bzw. auf hinterlegte betriebliche Lösungskonzepte fokussiert. Dabei erlaubt die in der Regel grosse Anzahl dokumentierter Daten genauere Analysen ähnlich gelagerter Fälle aus der nahen Vergangenheit. Somit kann das Expertenwissen durch analytisches Wissen ergänzt werden. Der Prozess der Störfprognose ist dabei für die Bahnproduktion von zentraler Bedeutung.

Ein qualifiziertes Agieren im Fall derartiger Ereignisse kann helfen, die Auswirkungen eingetretener Störungen für den Endkunden einzugrenzen. Eine Implementierung von Aspekten der Störfprognose ist unmittelbar in den bestehenden Tools der Bahnproduktion möglich. Hierbei geht es vor allem um den Umgang mit Unsicherheiten beim Eintritt einer Störung: Obwohl noch recht spärliche Informationen vorliegen, gilt es, betriebliche Notfallkonzepte hochzufahren und die technische Intervention durch Aufbieten geeigneter Fachkräfte nebst zugehöriger Ausrüstung anzugehen. Die Störfprognose hilft hierbei durch Verknüpfung von Vergangenheitsdaten mit den im Einzelfall aktuell anzustossenden Teilprozessen im Sinne einer zeitlichen Quantifizierung.

Zunächst gilt es, die für den späteren Prognoseprozess zentralen Punkte dieser Arbeit zusammenzufassen, um sie anschliessend in die weiteren Überlegungen einbeziehen zu können: Mit dem Ziel einer generischen und durchgängigen Behandlung von Ursachen und Auswirkungen über alle Bahnsysteme wurde im Rahmen der Bahnbetriebsforschung eine ressourcenbasierte Definition des Störfbegriffs entwickelt (Kapitel 2.2). Eine jede Störung im Bahnsystem lässt sich dann aus Sicht des Bahnbetreibers (Ersteller) nach Störfursache bzw. aus Sicht der Nutzer nach der Auswirkung klassifizieren. Beide Klassifizierungen sind gleichberechtigt, für die

Störungsanalyse bietet die ursachenbasierte Bottom-Up-Betrachtung (Kapitel 4.1) jedoch tiefere Einblicke in die Ursachenseite.

Jedes Störereignis kann dabei eine technische *und* eine betriebliche Störungsdauer aufweisen. Die technische Störung endet mit der Wiederherstellung aller Funktionalitäten einer Ressource, die betriebliche Störungsdauer fokussiert auf die operativen Auswirkungen des Ereignisses. Daraus ergeben sich drei grundsätzliche Anforderungstypen: betriebliche (Typ I), kombiniert technische und betriebliche (Typ II) oder rein technische Störungsprognose (Typ III, siehe Abbildung 83).



Abbildung 83: Prognosetypen der Störungsprognose (eigene Darstellung)

Je nach den Randbedingungen des einzelnen Ereignisses findet eine Verknüpfung aus prozessualen und statistischen Aspekten Verwendung für die Prognose. Unkritische Ereignisse werden mit Erkenntnissen aus der Statistik ähnlicher Störungen in der nahen Vergangenheit bearbeitet, bei kritischen Ereignissen kommen die anzustossenden Prozesse der aktuellen Störungsbehebung zur Prognosemethodik hinzu.

7.1.2 Technische und betriebliche Störungsaspekte

Die stringente Schlussfolgerung von der technischen auf die betriebliche Störungsdauer (bzw. umgekehrt) ist eine nichttriviale Fragestellung. Dabei bestehen zwei zentrale Herausforderungen:

- Datenlage für technische und betriebliche Aspekte identischer Störereignisse
- nichtkausale Zusammenhänge technischer und betrieblicher Störungsfolgen

Das Problem der Datensituation lässt sich über die Anlage geeigneter Fallstudien zumindest für grössere Bahnsysteme ansatzweise beherrschen, da dort Störereignisse mit grösserer Grundgesamtheit und in tendenziell grösserer Detailierungstiefe vorliegen. Anders verhält es sich beim Zusammenhang zwischen technischen und betrieblichen Störereignissen. Grundsätzlich besteht zwischen beiden ein Zusammenhang. Die technische Störung kann sich durch Nichterfüllen notwendiger Funktionalitäten auf die Betriebsführung auswirken und dort betriebliche Abweichungen hervorrufen. Andererseits kann das Auftreten betrieblicher Störungen eine zugrunde liegende technische Störung offenbaren. Die Dauer beider Störungsaspekte ist jedoch nicht zwingend korreliert. Dies folgt aus der Abhängigkeit der technischen Störungen von Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Komponenten und (Teil-) Systeme im Gegensatz zur Abhängigkeit betrieblicher Störungen vom konkreten aktuellen Betriebsprogramm.

Beispielsweise kann eine technische Triebfahrzeugstörung auf freier Strecke beim aktuellen Zuglauf direkt auf die betriebliche Abweichung durchschlagen. Selbst wenn dieses Ereignis vor Ort durch den Triebfahrzeugführer behebbar ist (z. B. durch Wiederaufrüsten des Fahrzeugs) entstehen Fahrstrassenkonflikte mit nachfolgenden (Doppelspurbetrieb) oder/und entgegenkommenden Zügen (Einspurbetrieb). Das Ausmass dieser Folgekonflikte beeinflusst die Totalverspätung aus diesem Störereignis. Die Grösse dieser Totalverspätung hängt dabei vom konkreten Betriebsprogramm ab, insbesondere von der Anzahl entstehender Folgekonflikte in Form der Sekundärverspätung. Ein technisch identisches Ereignis innerhalb eines Bahnhofs kann durch mögliche Gleiswechsel auch ohne Folgekonflikte stattfinden. Erfolgt das Ab- und Wiederaufrüsten des Triebfahrzeugs innerhalb eines ohnehin geplanten Aufenthalts bewirkt diese technische Störung keinerlei betriebliche Abweichungen. Dieses Beispiel verdeutlicht exemplarisch die heterogenen Zusammenhänge zwischen technischer bzw. betrieblicher Störung und illustriert die Nichtkausalität zwischen beiden.

Dennoch lässt sich eine Gegenüberstellung zwischen technischen und betrieblichen Störungfolgen erarbeiten. Dazu müssen technische und betriebliche Störungsdaten vergleichbarer Störungsklassen vorliegen. Andernfalls sind die Störungsklassen unterschiedlicher Datenbanken desselben Bahnsystems untereinander auf Basis der Bottom-Up-Klassifizierung zu „übersetzen“. Weiterhin ist zu eruieren, welche technischen und betrieblichen Grössen verglichen werden sollen, da die klassenweisen Störungsdauern schwanken. Aus der Abwägung der Anforderungen an die Störungsquantile (siehe Kapitel 5.3.1) wurde hier jeweils das 0.67-Quantil für die technische Störungsdauer (Abszisse) und das 0.80-Quantil für die betriebliche Störungsdauer (Ordinate) ausgewählt, um die tendenziell grössere Streuung der technischen Störungsdauern abzumildern. Abbildung 84 bezieht sich dabei auf die VU-Meldungen der DB Netz Südost aus dem Jahr 2010. Die Ereignisse sind nach Ressourcen farbcodiert. Anhand der betrieblichen und technischen Störungsdauern wurden die Quantile mithilfe einer adaptierten Exponentialverteilung berechnet. Die ins Diagramm eingezeichnete Gerade kennzeichnet die Hauptdiagonale und zeigt, dass die technische Störungsdauer mit Ausnahme der Ereignisklasse „Sonstiges“ die Zusatzverspätungen überschreitet. Das rührt daher, dass das Vorhandensein einer technischen Störung nicht zwangsläufig genau eine betriebliche Störung in gleicher Zeitausdehnung nach sich zieht. Dies betrifft vor

allein die Infrastrukturstörungen (gelb). Rein prozessuale Betriebsstörungen (blau) und insbesondere Fahrzeugstörungen (rot) sind im Allgemeinen – und diese Aussage ist aus der Quantilbetrachtung ableitbar – in betrieblicher und technischer Störungsdauer jeweils recht nah beieinander. Dies rührt daher, dass die Ereignisse in der betrieblichen wie in der technischen Betrachtung ähnlich lang dauern.

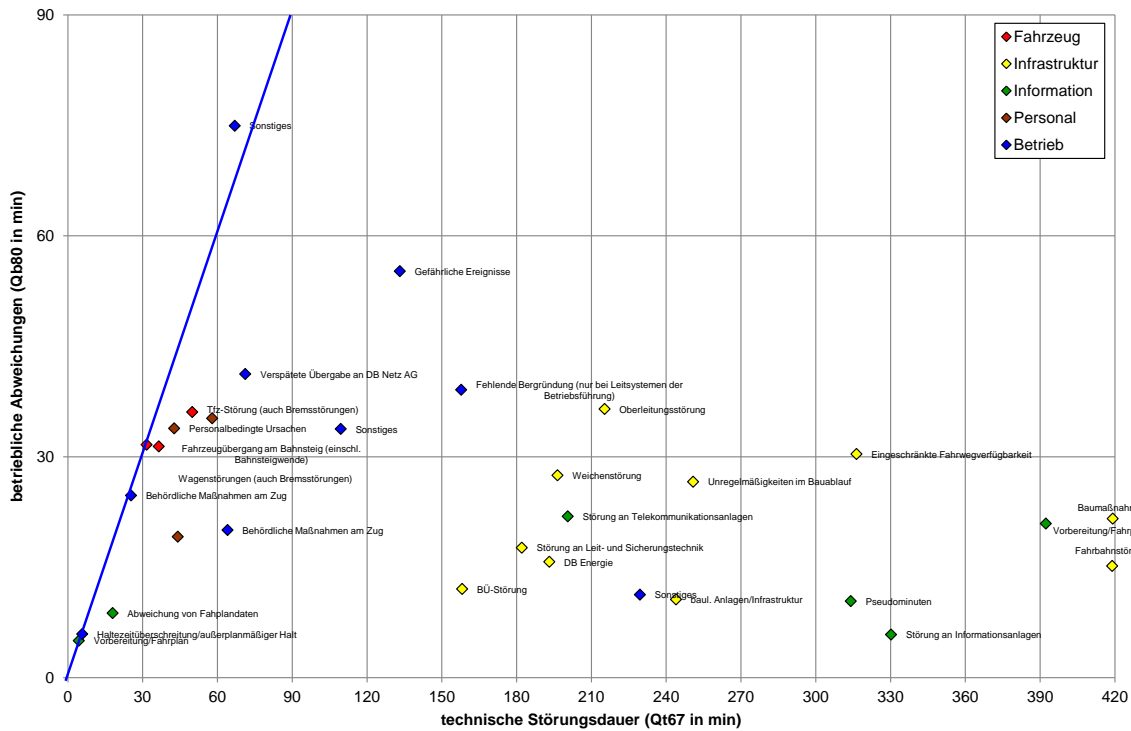


Abbildung 84: Technische und betriebliche Störungsquantile der DB-Fallstudie 2010 (eigene Darstellung)

Die „Übersetzung“ betrieblicher und technischer Störungsklassen im Bereich der SBB ist nur bedingt möglich, da die zugehörigen Störungsdaten nicht in jedem Fall derselben Klassifizierung unterliegen. Abbildung 85 zeigt eine entsprechende Darstellung. Es war dabei anzunehmen, dass die prozessualen Aspekte (Ressource Betrieb, blau) keine technischen Ursachen haben; sie finden sich daher auf der Ordinate wieder. Der Grossteil der Fahrzeugstörungen fällt trotz der beschriebenen Abweichungen von dieser Logik im Betrieblichen wie im Technischen identisch aus und liegt in dieser Abbildung auf der Hauptdiagonale, sonst in der Realität nahe der Hauptdiagonalen. Einzig für die Infrastrukturstörungen (gelb) war eine konkrete Übersetzung der technischen Störungsdauer (SIP-Quantile) in die betrieblichen Abweichungen (ErZu-Quantile) möglich. Wie in der DB-Fallstudie liegen die meisten Infrastrukturstörungen weit unterhalb der Hauptdiagonale und schlagen daher unterproportional (aber mitunter dennoch nennenswert) auf die Bahnproduktion durch. Weitere Ausnahmen bilden wenige ErZu-Codes der Ressource Infrastruktur ohne direktes SIP-Pendant, die (scheinbar) auf der Ordinate angeordnet sind. Für die übrigen Fallstudien waren derartige Aussagen hingegen nicht ableitbar, da entweder das technische Pendant zur betrieblichen Störungsdauer oder das betriebliche Pendant zur technischen Störung in den Datenbanken nicht ersichtlich war.

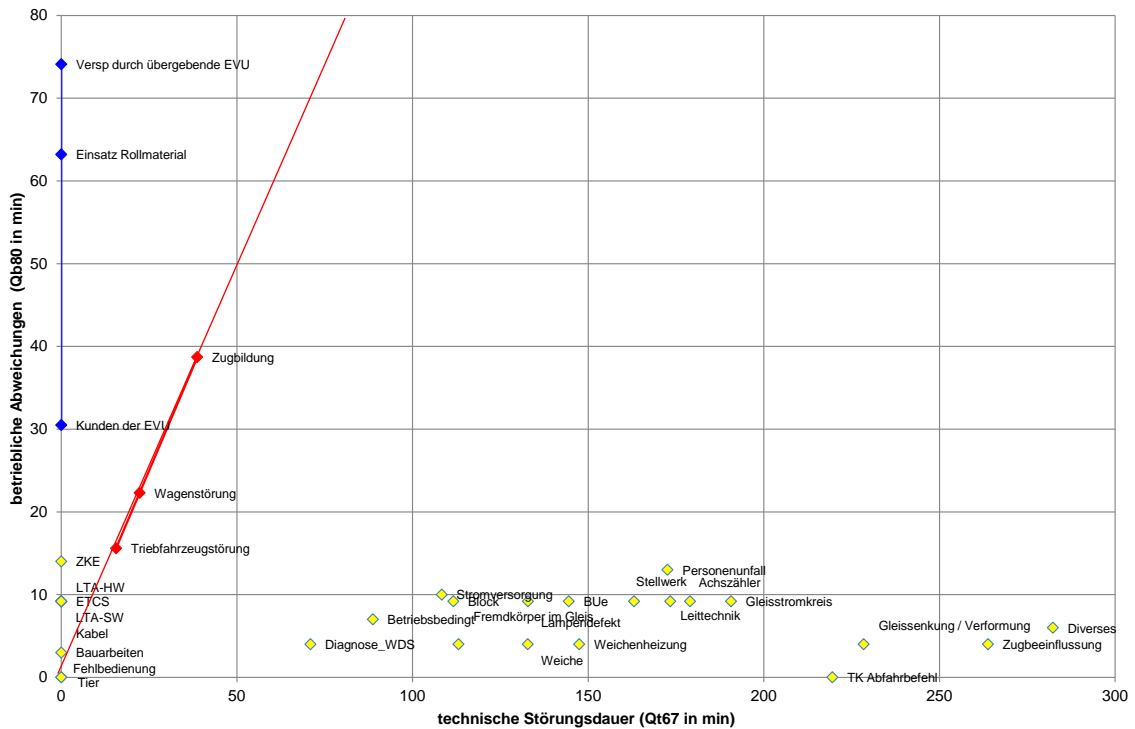


Abbildung 85: Technische und betriebliche Störungsquantile der SBB-Fallstudie 2011 (eigene Darstellung)

Aus all diesen Inputs zur technischen und betrieblichen Störungsprognose sind fortfolgend Prognosegranularitäten für beide Prognosearten herzuleiten und zu begründen. Da eine Übersetzung von der technischen in die betriebliche Störungsdauer nicht pauschal möglich ist und je nach Prognosetyp mitunter auch nur die technische oder die betriebliche Störungsdauer massgebend ist, werden beide Störungsprognosen im Folgenden weiterhin separat geführt.

7.1.3 Bestimmungsgrößen für die Prognosegranularitäten

Für die zu erstellende Störungsprognose ist die erforderliche Prognosegranularität abzuklären. Darunter ist die zeitliche Detaillierung der zu erstellenden Prognose zu verstehen. Dabei stellt sich die Frage, welche Anforderungen die Folgeprozesse der Störungsprognose an die Prognosegranularität stellen. Die Folgeprozesse entsprechen den zentralen Aspekten des Behebens von Störereignissen in Kapitel 6. Diese Folgeprozesse sind Indikatoren möglicher Anwendungsfälle für die Überlegungen aus der Störungsprognose:

- Disposition
- Intervention
- (Endkunden-) Kommunikation

Seitens der Disposition ist zwischen umfangreichen Massnahmen (z. B. Busersatzverkehr bei Inselbetrieb, im Folgenden „Grossdisposition“) und eher kleineren Massnahmen (z. B. dem Tausch der Zugfolge durch Priorisierung, im Folgenden „Kleindisposition“) zu trennen. Dazwi-

schen liegen einige eher mittlere Massnahmen wie z. B. das Stellen eines Ersatzzuges. Zur Abgrenzung des Einsatzes dieser Massnahmen ist vor allem die voraussichtliche betriebliche Störungsdauer relevant. Weiterhin spielen die Nachfrage der Endkunden (z. B. überfüllte Züge verunmöglichen eine zusätzliche Kundenlenkung darauf) und die Tageszeit (erstellerseitige Grosszügigkeit bei letzter Verbindung vor Betriebsschluss) eine Rolle. Eine Kleindisposition ist selbst bei Abweichungen unterhalb der Pünktlichkeitsgrenze sinnvoll möglich. Die Grossdisposition kommt wegen des grossen betriebstechnologischen Aufwands und der erforderlichen Vorlaufzeit erst bei grösseren Ereignisdauern ab der Taktzeit in Betracht²⁷. Mittlere Dispositionsmassnahmen erscheinen bei drohenden Abweichungen ab der Pünktlichkeitsgrenze auch unterhalb der Taktzeit als geeignet, da hier die zu erwartende Abweichung einen grösseren betrieblichen – also dispositiven – Einsatz rechtfertigt, jedoch der Aufwand einer Grossdisposition zu hoch und die Vorlaufzeit dafür zu gering ist. Zunächst genügt die Unterteilung in kleiner als Pünktlichkeitsgrenze, kleiner und grösser als (Strecken-) Taktzeit. Ab der Entscheidung für eine Disposition kann die neue Fahrpläne mindestens in Minutengranularität ermittelt werden.

Etwas gröber sind die Anforderungen der Störungsprognose für die technische Störungsbehebung geartet. Bei der Intervention beeinflussen vor allem Interventionsort und die Frage des aufzubietenden Personals bzw. der erforderlichen Ausrüstung die voraussichtliche Interventionsdauer. Zur Abschätzung der technischen Störungsdauer ist eine Auflösung in ganzen Stunden zunächst hinreichend, da sie mit tendenziell grossen Unsicherheiten behaftet ist und lediglich als Hintergrundinformation für die Betriebsführung gilt. Die betriebliche Störungsbehebung sollte einen Puffer gegenüber dem technischen Störungsende vorsehen, um den Effekt des unerwarteten Überschreitens der prognostizierten Störungsdauer möglichst zu vermeiden.

Die vorläufig strengsten Anforderungen folgen aus der Endkundenkommunikation im Personenverkehr. Hier dominiert der Aspekt der beseitigten Ungewissheit bei Ereigniseintritt. Selbst die anschliessende Frage nach einem Handlungserfordernis oder einem voraussichtlichen Handlungserfordernis (z. B. Übergang auf eine Alternativverbindung) erfordert eine zuverlässige Aussage über die voraussichtliche betriebliche Störungsdauer, welche, wie in Kapitel 6.3.3 vorgeschlagen, auf Zeitintervalle diskretisiert werden sollte, um ein permanentes Nachkalibrieren gegenüber dem Endkunden zu vermeiden.

Bündelt man diese Anforderungen an die Prognosegranularität, dominieren bei Eintritt eines Ereignisses Anforderungen der Endkundenkommunikation, vor allem im Personenverkehr, vor den Fragen der Disposition. Die Intervention liefert lediglich den Input, mit welcher technischen Störungsdauer zu rechnen ist. Erst im weiteren Verlauf des Ereignisses wird die Granularität der Disposition bestimmend für den Gesamtprozess. Auf der Seite der Prognoseerstellung bestimmen Störungsklasse, Einzelfall und singuläre Informationen die voraussichtliche betriebliche wie technische Störungsdauer, welche methodisch bedingt in Minuten ausgegeben werden kann, jedoch

²⁷ Hierbei ist der Vollbahnbetrieb mit Halbstunden- oder Stundentakt gemeint. Dichter verkehrende (Stadtbahn-) Systeme verwenden Grossdispositionen ebenso erst ab ca. einer halben Stunde erwarteter Störungsdauer.

auf ein Intervall \pm Pünktlichkeitsgrenze (technische Prognose auf \pm halbe Stunde) zu diskretisieren ist. Abbildung 86 stellt diese Überlegungen als Grundlage für den Prognoseprozess dar.

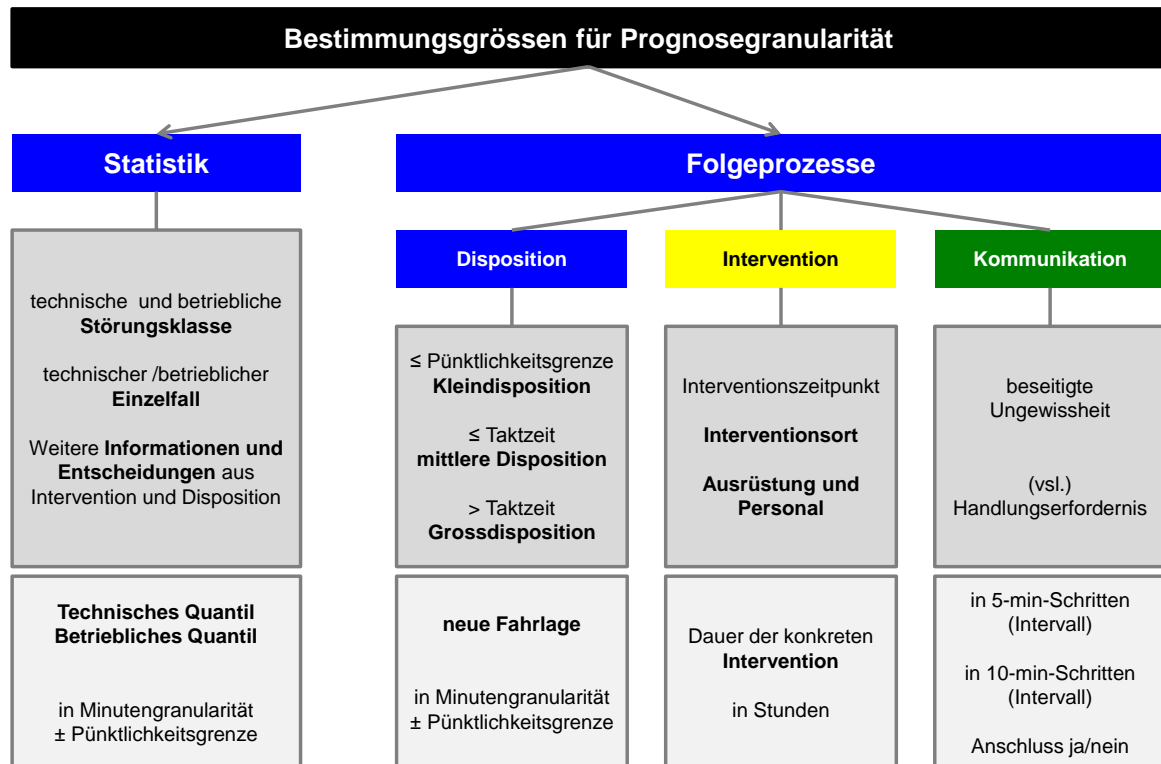


Abbildung 86: Morphologie der Prognosegranularität (eigene Darstellung)

Kehrt man die Stochastikinversion erneut um, so lässt sich jene Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit welcher ein Ereignis einer Störungsklasse eine definierte Dauer maximal erreicht. Aus den vorangegangenen Überlegungen sind folgende Zeitgrenzen von Interesse für die betriebliche Störungsdauer:

- Pünktlichkeitsgrenze \rightarrow darüber Einsatz von mittlerer Disposition
- Taktzeit (i. S. v. 30 ... 60 min) \rightarrow darüber Einsatz von Grossdisposition

Wird die Frage nach der erwarteten Zuverlässigkeit einer aufgestellten Störungsprognose aufgeworfen, ist diese invertierte Betrachtungsweise mit den angegebenen Zeitgrenzen ebenso von Interesse. Somit lassen sich Aussagen bezüglich der Wahrscheinlichkeit des Überschreitens oben aufgeführter Zeitgrenzen herleiten, was der Entscheidungsunterstützung im Ereignisfall dient.

7.2 Der Prognoseprozess inklusive Detailprozessen

7.2.1 Konzeption der Störungsprognose

Das Aufstellen des Prognoseprozesses bedingt einige konzeptionelle Vorüberlegungen in diesem Unterkapitel. Dabei wird die Einzelprognose in drei Ebenen aufgeteilt und es wird dargelegt, welcher Konzeption die statistische Prognose folgen wird. Für die generische Störungsprognose kombiniert Kapitel 7.2.2 statistische als auch prozessuale Überlegungen dieser Arbeit. Mehrere Detailprozesse werden dabei eingebunden. Aussagen zur Prognosegenauigkeit bzw. ihrer Implementierung (Kapitel 7.2.3) runden das Kapitel 7.2 ab.

Ebenen der Einzelprognose

Die Einzelprognose wird als Ergebnis dieser Arbeit in drei aufeinander aufbauende Ebenen gegliedert. Zwischen den Ebenen erfolgt jeweils eine Prognoseverbesserung durch Erkenntnisgewinn. In der grafischen Interpretation nähert sich das Variantenspektrum daher dem Kern des Einzelfalls (Abbildung 87). Die hier zu betrachtenden Ebenen sind:

- statistische Verteilung der Störungsklassen
- Ermittlung des konkreten Ablesepunktes in den statistischen Verteilungen
- singuläre Detaillierung der Störungsprognose

Anhand dieser Prognoseebenen lässt sich die Einzelprognose eingrenzen und verbessern. Die nachfolgende Beschreibung beginnt in Abbildung 87 aussen.

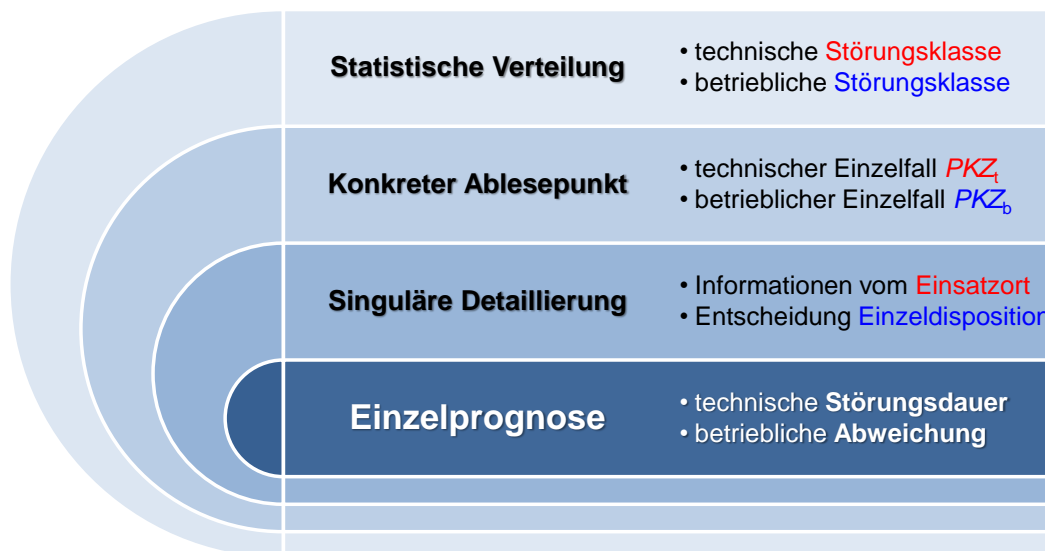


Abbildung 87: Ebenen der Einzelprognose in der Bahnproduktion (Schraniil, et al., 2013)

Den Ansatzpunkt für die Einzelprognose bilden zunächst die im konkreten Fall klassifizierten Störereignisse. Über Ereignisse aller in Frage kommenden Ereignisklassen sind auf Grund umfangreicher Datenauswertungen jeweils **statistische Verteilungen** vorhanden, welche im Fortgang der Störungsprognose verwendet werden. Bereits hier wird zwischen der technischen

und der betrieblichen Störungsklasse unterschieden. Dahinter liegen in aller Regel separate Verteilungen. Für den statistischen Teil der Störungsanalyse bestimmt jene Klassenzuordnung die Art der Verteilung, welche im nächsten Schritt weiter ausgewertet wird.

Der **konkrete Ablesepunkt** innerhalb dieser Verteilung resultiert aus der Konstellation des Einzelfalls nebst seinen technischen bzw. betrieblichen Rahmenbedingungen. Dazu zählen die Interventionsstrategie zur technischen Entstörung und die Alternativressourcen für die betriebliche Störungsbehebung. Ihr Abwägen auf Grundlage des Einzelfalls liefert über die Prognosekennzahl das Störungsquantil und somit die zunächst prognostizierte Störungsdauer. Im Verlauf der technischen bzw. betrieblichen Störung kommen nun weitere Einzelinformationen zum Störungsbild hinzu und ermöglichen die **singuläre Detaillierung** der Prognose. Dies sind bei der technischen Störung beispielsweise eingehende Informationen vom Schadensplatz oder bei der betrieblichen Störungsbetrachtung die Entscheidung über eine konkrete Einzeldisposition für den jeweiligen Zuglauf.

Aus diesen Informationen wird schlussendlich eine **Einzelprognose** im jeweiligen Störfall ermöglicht, welche in den Prognoseprozess einfließt. Somit sind neben den prozessualen Aspekten der Störungsbehebung vor allem die statistischen Auswertungen von Interesse. Erst die Kombination aus beiden ermöglicht jedoch eine qualifizierte Störungsprognose und somit die optimierte Störungsbehebung.

Konzept der statistischen Prognose

Für den statistischen Teil der Störungsprognose sind nacheinander folgende vier Prozessschritte abzuarbeiten:

- Detektion einer Störung
- Klassifizierung der Störung
- technische bzw. betriebliche Prognose der Störungsdauer
- Variantenvorschlag für die Disposition bzw. Zeitbedarf der Intervention

Hierbei wird ebenso zwischen technischer und betrieblicher Störungsprognose unterschieden, siehe Abbildung 88. Bereits im Vorfeld der eigentlichen Störungsprognose sind mehrere Vorstufen zu passieren, wie den Ausführungen im rechten Teil der Grafik entnommen werden kann. Das Monitoring des Bahnsystems in technischer und betrieblicher Hinsicht ist die Grundlage der Betriebsführung, da das jeweilige Bahnsysteme hierdurch auf Abweichungen und Störungen überwacht wird und derartige Ereignisse somit erkannt werden können. Als Störung detektierte Abweichungen werden klassifiziert und als Ziel des späteren Prognoseprozesses einer Prognose unterzogen. Diese Prognose ist wiederum Voraussetzung für die mehrere Folgeprozesse.

Von besonderer Relevanz für die Störungsprognose ist die Kalibrierungsschleife nach der Entscheidung für eine Disposition zurück in Richtung Monitoring/Klassifizierung (Schließung des Regelkreises in Abbildung 88). Erst durch dieses permanente Nachführen der Informations- und Datenlage lässt sich eine qualifizierte Betriebsführung im Störfall umsetzen. Konkrete Rand-

bedingungen wie die Diagnose am Schadensplatz, die aktuell verfügbaren Ressourcen sowie konzeptionelle Überlegungen der Disposition, Intervention und Kommunikation beeinflussen die technische und betriebliche Störungsbehebung. Sie sind daher in die Prognose einzubeziehen.

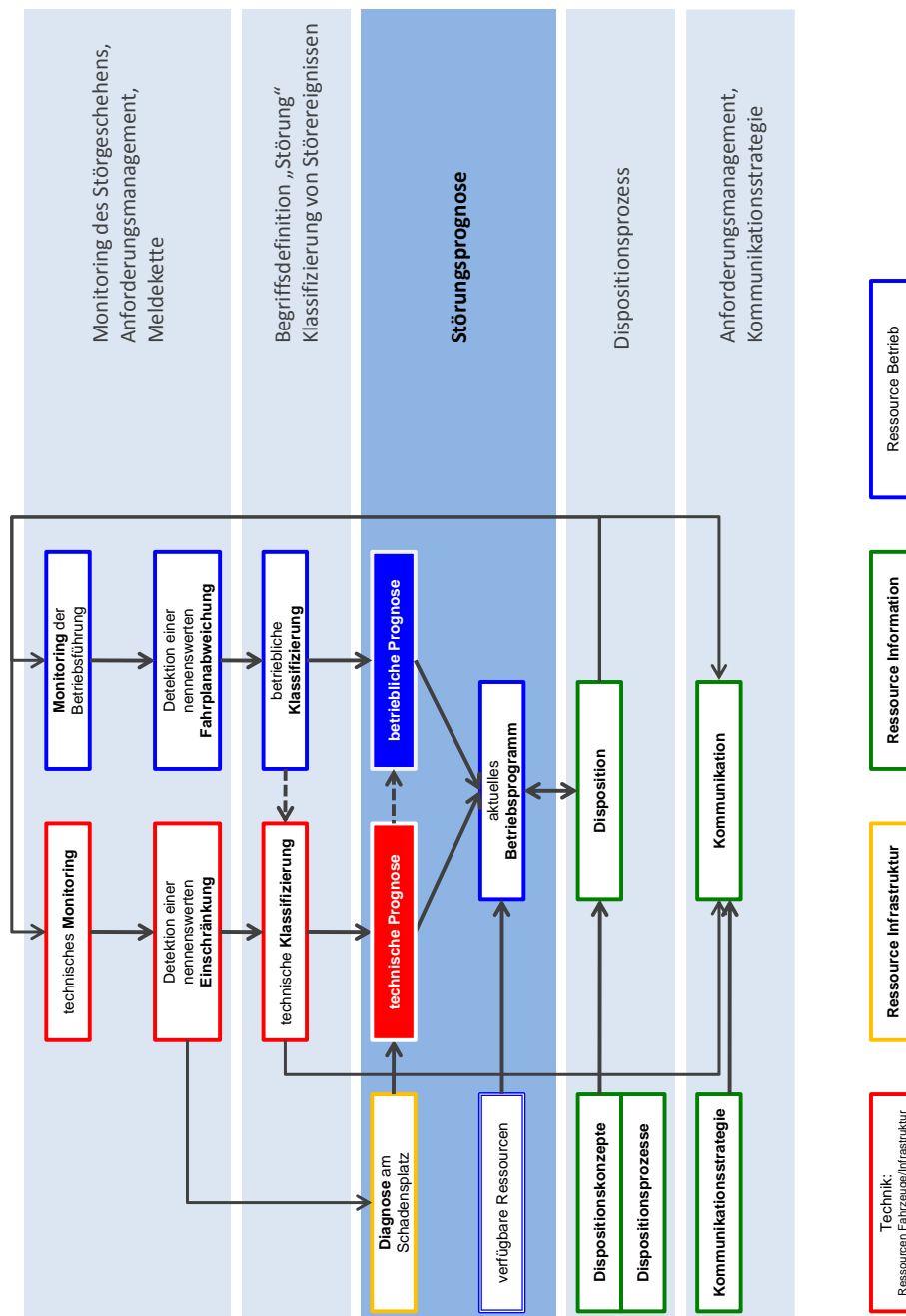


Abbildung 88: Konzeptionelle Übersicht über die Störungsprognose (eigene Darstellung)

Die konzeptionelle Übersicht (Abbildung 88) gibt eine Übersicht zum regelkreisbasierten konzeptionellen Ablauf der Störungsprognose für die Bahnproduktion. Insbesondere die Schnittstelle zwischen statistischen und prozessualen Überlegungen ist nachfolgend aufzuarbeiten. Weiterhin sind für die Folgeprozesse die jeweiligen Überlegungen aus Kapitel 6 geeignet einzubinden; daraus resultiert nun anschließend der Prognoseprozess.

7.2.2 Generischer Prozess der Störungsprognose nebst Teilprozessen

Nach den konzeptionellen Vorüberlegungen aus Kapitel 7.2.1 kann nunmehr der detaillierte regelkreisbasierte Prognoseprozess aufgestellt werden, in den anschliessend separate Folgeprozesse eingebunden werden. Die Beschreibung des Prognoseprozesses beginnt links oben in Abbildung 89 und arbeitet sich den einzelnen Prozessschritten folgend nach rechts unten vor.

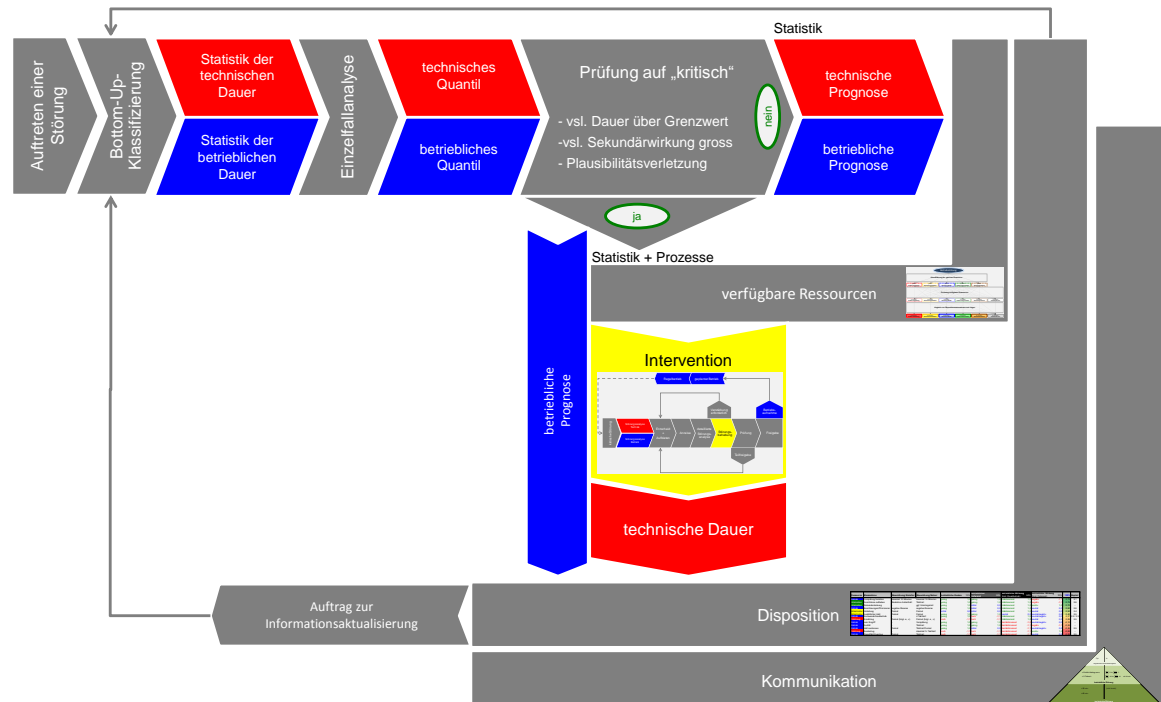


Abbildung 89: Generischer Prozess der Störungsprognose (Schranil, et al., 2013)

Der Prozess der Störungsprognose wird durch eine auftretende Störung angestossen (vgl. Kapitel 7.2.1). Die aufgetretene Störung ist zu klassifizieren und wird nun technisch (rote Felder) und betrieblich (blaue Felder) separat geführt. Die Einzelfallanalyse evaluiert schliesslich das statistisch relevante Quantil. Nunmehr ist zu prüfen, ob das vorliegende Ereignis als kritisch einzustufen ist. Kriterien für diese Einstufung sind gemäss Abbildung 89:

- Voraussichtliches Überschreiten eines zeitlichen **Grenzwertes**; dabei ist die Taktzeit geeignet, da darüber hinaus die Rückführung in den Regelbetrieb betriebstechnologisch anspruchsvollere Massnahmen unter Einbeziehung der Folgezüge erfordert²⁸.
- Voraussichtlich grosse **Sekundärwirkung**; vor allem bei betrieblich neuralgischen Punkten wie hochbelasteten Hauptstrecken und Knoten oder zusätzlich aufzubietender technischer Ausrüstung nebst zusätzlichem Personal. Hierbei ist vor allem die Netzwirkung im Sinne der Störungsausbreitung kritisch.
- **Plausibilitätsverletzung** innerhalb der bereits bekannten Informationen wie offensichtliche Fehlklassifizierung oder absehbare Ausreisser.

²⁸ Bei den SBB werden bei Ereignissen ab ca. 2.0 Stunden Störungsdauer vorgefertigte Checklisten verwendet, weshalb diese Ereignisse definitiv als kritisch einzustufen sind und nicht mehr mit reiner Statistik zu behandeln sind.

Für als unkritisch eingestufte Ereignisse genügt die Weiterbehandlung mithilfe statistischer Größen, da ein starker Bezug auf bekannte Störungsmuster zu erwarten ist (in Abbildung 89 stringent weiter nach rechts). Erst bei kritischen Ereignissen sind die konkreten Entstörungsprozesse hinzuzuziehen (in Abbildung 89 senkrecht nach unten). Die Evaluation verfügbarer Betriebsressourcen, die Disposition und der Output als Endkundenkommunikation folgen in beiden Szenarien, also einheitlich für als kritisch und als unkritisch eingestufte Störungen. Die zusätzlich eintreffenden Informationen ermöglichen eine fortschreitende Kalibrierung der mutmasslichen Störungsdauer und schliessen den gesamten Regelkreis.

Disposition, Intervention und Kommunikation sind im generischen Prognoseprozess die zentralen Folgeprozesse der Bahnbetriebsführung im Störfall. In diesen Prozess sind jene Detailprozesse verkleinert eingezeichnet, deren Detaillierung aus vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit entnommen wurde. Daher werden die folgenden Teilprozesse hier lediglich aufgegriffen:

- Evaluation von **Disposition**salternativen (siehe Kapitel 6.1, hier Tabelle 29)
- Eruiierung der **Interventions**prozesszeiten (siehe Kapitel 6.2, hier Abbildung 62)
- geeignete (Endkunden-) **Kommunikation** (siehe Kapitel 6.3, hier Abbildung 79)

Die Einzelfallanalyse in Abbildung 89 greift die Prognosekennzahl aus Kapitel 5.3.2 auf und ist hier nur stilisiert. Neben der Prognosefähigkeit, welche aus Klassifizierung, Priorisierung und Standardisierung des Störfalls resultiert, spielt für die technische Störungsprognose die im konkreten Einzelfall auszuwählende Interventionsstrategie eine zentrale Rolle.

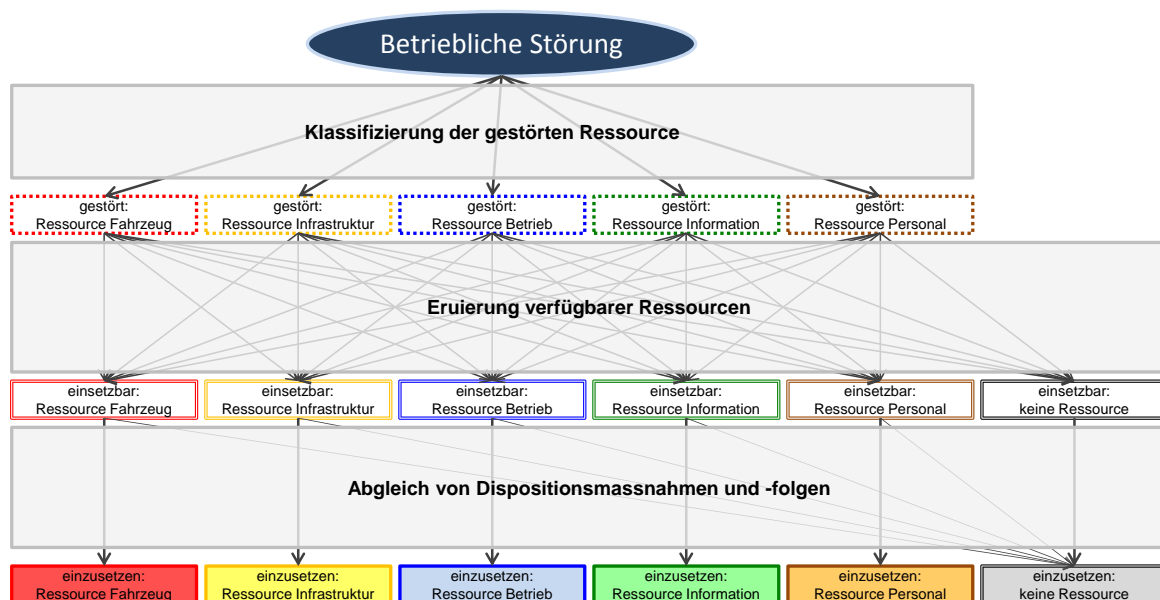


Abbildung 90 :Gestörte und zur betrieblichen Entstörung einzusetzender Ressource (eigene Darstellung)

Für die betriebliche Störungsprognose sind die alternativ einzusetzenden Ressourcen zu evaluieren, siehe Abbildung 90. Die Alternativressourcen bilden das aktuelle betriebstechnologische Umfeld der einzelnen Störung zum Zeitpunkt der betrieblichen Störungsbehebung ab und sind unabhängig vom eigentlichen Störungszustand. Nach Klassifizierung einer (betrieblichen) Störung

ist zunächst noch nicht offenbar, welche Ressource zur (betrieblichen) Entstörung zu verwenden ist; diese Eruiierung wird als Teil des generischen Prognoseprozesses nun angestossen. Beispielsweise fällt eine Streckenbelegung wegen Fahrzeugstörung für die Folgefahrten betrieblich weit weniger ins Gewicht, wenn eine Alternativroute (Infrastruktur) über ein zweites Gleis oder eine separate Strecke zur Verfügung steht, auf der eine freie Fahrplantrasse (Information) vorhanden ist, welche aktuell umbestellt werden kann (Betrieb). Erst nach Abgleich der konkret möglichen Dispositionsmaßnahmen und deren Folgen können die einzusetzenden Ressourcen in einem nächsten Schritt festgelegt werden.

Von weiterer Bedeutung ist bei allen betriebstechnologischen Überlegungen die Einbeziehung der Endkundenkommunikation (rechts unten in Abbildung 89). Dabei kann bereits die Information über den Umstand einer eingetretenen Störung Ungewissheit beseitigen und erste Unzufriedenheit abwenden.

Bei der Gestaltung des Prognoseprozesses wurde bisher von einer *kontinuierlichen* Kalibrierung gemäss dem Regelkreis aus Abbildung 89 ausgegangen. Sowohl aus der Perspektive des dazu erforderlichen Arbeitsaufwands als auch aus dem Blickwinkel des Erkenntnisgewinns kann auf diese Kontinuität verzichtet werden. Die Prognosekalibrierung wird dann nur noch zu diskreten Zeitpunkten im Ereignisverlauf durchgeführt, bleibt aber grundsätzlich erhalten. Dazu muss die Kalibrierung der Störungsprognose beim Wechsel zwischen der Störungsphasen stattfinden (vergleiche dazu Abbildung 20 auf Seite 67). Wichtig ist darüber hinaus, dass bei allen betrieblichen Entscheidungen ein Informationsvorlauf von mindestens einer halben Taktzeit besteht, um die betriebstechnologischen Aspekte einzubeziehen und Endkunden noch geeignet informieren zu können. Der Prozess der Störungsprognose sollte daher mindestens zu folgenden Zeitpunkten durchlaufen werden:

- Beginn der Chaosphase (Störungsoffenbarung)
- Aufnahme des geplanten Betriebs (Ende der Chaosphase)
- (Wieder-) Aufnahme des Regelbetriebs (Ende des geplanten Betriebs)
- Abtastung im Störungsverlauf alle ≤ 30 Minuten (Prognosefortschreibung)

Der dargestellte generische Prognoseprozess führt die wichtigsten Aspekte der bisherigen Arbeit zusammen. Die Komplexität der Störungsbehebung für betriebliche und technische Aspekte im Bahnsystem erfordert dieses interdisziplinäre Vorgehen, um optimal auf Ereignisse reagieren zu können und geordnet in den Regelbetrieb zurückkehren zu können. Die Besonderheit dieses Ansatzes besteht in der Verknüpfung prozessualer und statistischer Aspekte inklusive der Schnittstellendefinition zwischen beiden Betrachtungsweisen. Zentral ist darüber hinaus das Verständnis der Störungsbehebung als Regelkreis. Herausfordernd ist dabei die Erstprognose, da hier die Informationslage meist unvollständig ist und dennoch eine Prognose aufzustellen ist. Dabei dienen die im Verlauf eines Ereignisses nach und nach detaillierter eintreffenden Informationen der Kalibrierung. Dies bewirkt wiederum eine stetige Verbesserung der Störungsprognose während des Ereignisses und im Nachgang ein Lernen aus diesen Daten.

7.2.3 Prognosegenauigkeit und -implementierung

Aufbauend auf den Prognoseprozess ist nun aufzuzeigen, in welcher Genauigkeit Störungsprognosen typischerweise erstellt werden können und wie eine Implementierung dieses Prozesses erfolgen kann. Der Output aus dem generischen Prognoseprozess erfolgt in Minutengranularität. Dies hat den Hintergrund, dass betriebliche Abweichungen ab einer vollen Minute für den Endkunden nachweisbar und bei technischen Störungen erst dann sinnvoll dokumentierbar sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine prognostizierte Störungsdauer von x Minuten genauso in der Realität eintritt, darf hingegen als eher gering eingeschätzt werden. Dies resultiert aus den Streuungen der technischen wie betrieblichen Ereignisdauer und den verbleibenden Unsicherheiten. Im betrieblichen Kontext ist mit weiteren Folgekonflikten zu rechnen, welche darüber hinaus zusätzliche (Klein-) Abweichungen provozieren können. Entsprechend der in Kapitel 7.1.3 vorgestellten Bestimmungsgrößen für die Prognosegranularitäten wird folgende Prognosegenauigkeit angestrebt:

- betriebliche Störungsdauer \pm Pünktlichkeitsgrenze
- technische Störungsdauer \pm 30 Minuten

Die Pünktlichkeitsgrenze schwankt zwischen den Bahnsystembetreibern und teilweise auch zwischen den Verkehrsarten. Sie wird an dieser Stelle jedoch systemspezifisch für die Prognosegranularität übernommen. Sollten gröbere oder keine Angaben über die Pünktlichkeitsgrenze vorliegen, ist die UIC-Definition (UIC 450-2, 2009) mit $\leq |5|$ Minuten Abweichung (Zeigersprung-Kriterium) eine praktikable Alternative, welche nebenbei eine Vergleichbarkeit zu Betreibern mit exakt diesem Verspätungsverständnis bewahrt.

Für den statistischen Teil der Störungsprognose lässt sich mit diesen Kriterien die Abweichung zwischen prognostizierter und realer Störungsdauer darstellen. Da das auszuwählende Störungsquantil aber auf den Randbedingungen der einzelnen konkreten Störung beruht, erfolgt diese Gegenüberstellung basierend auf den Fallstudien und exemplarisch jeweils für die Quantile 0.50, 0.67 und 0.80 bei technischen Störungsdauern bzw. 0.50, 0.67, 0.80 und 0.90 bei betrieblichen Störungsdauern. Zur besseren Visualisierung werden die Abweichungen zwischen gerechneten und in den Fallstudien gemessenen Quantilen farblich codiert. Unterschiede kleiner der angestrebten Genauigkeit sind grün eingefärbt, darüber erfolgt eine gelbe Farbcodierung bis zu einer Viertelstunde (betrieblich) bzw. vollen Stunde (technisch). Darüber ist die Abweichung nicht tolerierbar und rot markiert (Tabelle 38).

Betriebliche Störungsdauer	Technische Störungsdauer
$\leq \pm$ Pünktlichkeitsgrenze oder 5 Minuten	$\leq \pm$ 30 Minuten
$\leq \pm$ 15 Minuten	$\leq \pm$ 60 Minuten
$> \pm$ 15 Minuten	$> \pm$ 60 Minuten

Tabelle 38: Farbcodierung der Prognosegenauigkeit (eigene Darstellung)

Diese Farbcodierung wird nun über die Fallstudien der Praxispartner dieser Arbeit (vergleiche Kapitel 3.2) gelegt. In der folgenden Zusammenstellung sind alle Ereignisklassen wiedergegeben, deren Distance mindestens 5.0 % beträgt (Tabelle 39).

Fallstudie	Ressource	Code	Codebeschreibung	Anzahl	Distance	Messwerte			Stichprobe	Messquantile				Fehler bei Berechnung (UIC)				
						StdAbw	Mittel	VX		0.50	0.67	0.80	0.90	0.50	0.67	0.80	0.90	
Vollbahn, EZU 2009, SBB	Betrieb	45	Verspaltung ab Vorbahn	27871	23.71%	52.2	35.7	1.46	821	ja	16	31	55	91	9.5	8.5	10.7	-14.7
	Infrastruktur	62	Fahrleitung	110	12.45%	11.7	5.7	2.05	1619	nein	3	5	9	17	3.0	3.0	3.0	-10.5
	Fahrzeug	12	Triebfahrzeugdefekt	13494	12.26%	17.9	10.2	1.75	1183	ja	6	8	12	20	2.0	2.3	2.8	3.5
	Fahrzeug	13	Wagendefekt	8929	8.42%	22.1	12.1	1.83	1282	ja	5	8	15	27	5.5	7.1	5.4	0.0
	Personal	1	Lokpersonal	9792	8.35%	31.8	16.6	1.92	1410	ja	6	10	21	41	4.1	5.1	-0.6	-0.3
	Infrastruktur	69	Übriges FW	165	7.64%	24.0	7.9	3.04	3546	nein	4	5	7	10	1.5	2.6	2.7	1.8
	Infrastruktur	61	Sicherungsanlagen	6167	7.20%	6.8	5.6	1.21	566	ja	4	6	8	11	1.3	1.0	0.7	-0.5
	Information	88	Baustellen	7874	6.98%	1.1	0.1	1.10	46483	nein	0	0	0	0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Betrieb	4	Zugbildung	8150	6.95%	24.0	21.9	11.00	481	ja	15	23	32	47	2.3	2.9	4.0	-2.1
	Betrieb	41	Kunden der EVU	7820	6.78%	22.2	12.5	1.78	1212	ja	5	8	16	31	3.9	4.6	7.1	-3.4
	Betrieb	89	Übriges Externe / Verschiedenes	2208	6.24%	24.8	10.8	2.30	2026	ja	4	6	10	26	1.1	1.7	0.1	-13.5
	Infrastruktur	85	Entgleisung / Kollision	44	5.96%	17.5	6.6	2.65	2701	nein	0	0	8	22	1.5	2.5	-4.7	-12.0
	Fahrzeug	43	Witterungseinflüsse Zugführung	517	5.53%	16.0	7.9	2.03	1576	nein	4	5	7	11	2.4	3.8	4.3	3.0
	Vollbahn, EZU 2011, SBB	Betrieb	45	Versp durch übergehende EVU	30864	55.56%	88.5	45.1	1.96	1479	ja	19	37	63	110	14.7	13.1	11.1
Fahrzeug		12	Triebfahrzeugstörung	12007	10.78%	18.8	10.9	1.72	1143	ja	6	9	13	22	2.3	2.8	2.8	-2.2
Betrieb		2	Einsatz Rollmaterial	6560	10.55%	59.0	39.0	1.51	879	ja	20	32	51	86	9.0	12.7	12.2	1.8
Personal		1	Lokpersonal	8592	10.51%	44.6	25.7	1.74	1157	ja	11	22	35	58	6.9	8.1	2.5	-8.1
Betrieb		41	Kunden der EVU	8264	8.72%	33.6	18.9	1.78	1214	ja	7	14	27	46	7.9	9.1	-3.5	-8.9
Fahrzeug		4	Zugbildung	6515	7.67%	31.6	24.0	1.32	686	ja	15	24	33	52	3.7	5.8	3.7	0.8
Fahrzeug		13	Wagenstörung	7898	7.48%	25.2	13.8	1.83	1281	ja	6	9	16	31	5.3	7.5	6.3	-3.5
Information		88	Geplante Baustellen	9097	7.37%	2.0	0.2	10.00	38416	nein	0	0	0	0	2.9	2.9	3.0	3.0
Infrastruktur		61	Sicherungsanlagen	6621	5.53%	7.7	5.7	1.35	701	ja	4	6	7	10	1.6	1.3	2.2	1.2
Fahrzeug		12	Triebfahrzeugstörung	1188	22.72%	19.5	11.6	1.68	1086	ja	6	9	15	24	-0.6	-0.8	-4.2	-10.7
Vollbahn, EZU 2010, BLS	Personal	1	Lokpersonal	1162	18.41%	32.3	18.8	1.72	1134	ja	9	15	26	41	4.9	5.6	2.2	-3.7
	Fahrzeug	3	Traktionswechsel Lok / Pendel	916	14.84%	14.8	18.1	0.82	257	ja	15	21	26	33	-0.4	0.7	3.0	7.5
	Fahrzeug	4	Zugbildung	585	11.95%	25.2	27.5	0.92	323	ja	23	29	38	59	-3.6	0.5	3.0	-4.3
	Infrastruktur	61	Sicherungsanlagen	645	11.39%	5.1	5.3	0.96	356	ja	4	5	7	10	-0.6	-0.6	-1.6	-3.7
	Information	88	Geplante Baustellen	590	10.81%	31.0	15.4	5.97	12336	nein	0	0	0	0	2.9	2.9	3.0	3.0
Vollbahn, SIP 2011, SBB (beir. Distance, techn. Dauer)	Infrastruktur	-	Lampendefekt	11621	23.22%	229.4	119.8	1.91	1408	ja	66	92	120	181	11.1	31.4	57.1	
	Infrastruktur	-	Stellwerk	5909	12.82%	236.4	147.1	1.61	992	ja	95	128	174	240	-0.9	23.2	43.1	
	Infrastruktur	-	Weiche	3418	7.75%	160.4	119.8	1.34	689	ja	83	108	141	199	-0.9	15.8	36.1	
	Infrastruktur	-	Achszähler	5835	11.81%	263.0	151.4	1.43	1085	ja	105	143	198	265	1.6	20.9	50.3	
	Infrastruktur	-	Betriebsbedingt	4432	8.85%	0.0	80.0	0.00	0	ja	80	80	80	80	-98.2	5.7	39.6	
Vollbahn, SIP 2011, SBB (beir. Distance, bet. Dauer)	Infrastruktur	-	Gleisstromkreis	3358	8.26%	688.9	172.0	4.01	6165	nein	93	119	152	197	17.3	5.7	10.7	
	Infrastruktur	-	KS Permanent	145	2.95%	1153.6	629.8	1.83	1289	nein	274	366	486	695	105.9	21.6	46.6	
	Infrastruktur	-	Diverses	2203	4.41%	226.1	254.6	0.89	303	ja	166	288	362	532	-3.4	-26.0	11.2	
	Infrastruktur	-	KS momentan	1124	6.22%	7359.6	2490.7	2.95	3354	nein	176	291	322	565	106.3	20.7	40.0	
	Infrastruktur	-	Lampendefekt	11621	23.26%	7.0	0.5	13.79	73014	nein	0	0	0	0	2.6	2.9	2.9	-3.0
	Infrastruktur	-	Stellwerk	5909	15.92%	71.0	13.0	5.46	11453	nein	0	0	8	23	0.9	2.6	-4.4	-10.8
	Infrastruktur	-	Weiche	3418	9.73%	88.0	13.0	6.75	17487	nein	0	0	4	23	-0.1	1.8	-0.5	-10.8
	Infrastruktur	-	Achszähler	5835	12.48%	23.4	4.6	5.13	10102	nein	0	0	0	0	1.1	2.3	3.9	-8.7
	Infrastruktur	-	Betriebsbedingt	4432	8.90%	12.3	1.2	10.11	39250	nein	0	0	0	0	2.5	2.7	3.8	-8.8
	Infrastruktur	-	Gleisstromkreis	3358	8.38%	29.2	8.5	3.45	4565	nein	0	0	8	19	1.6	3.0	-3.9	-13.8

Tabelle 39: Prognosegenauigkeit der Störeignisklassen (> 5 % Distance) der Fallstudien (eigene Darstellung)

Um für diese Übersicht eine Vergleichbarkeit zwischen der Prognostizierbarkeit der Ereignisklassen herzustellen, wurde die Pünktlichkeitsgrenze ausnahmsweise einheitlich auf fünf Minuten gesetzt. Im Interesse der Erkennbarkeit blau gedruckte Werte sind berechnete Werte. Für die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Quantilen gilt als Konvention, dass positive Werte in der Rechnung zu gross ausfallen, negative Werte fallen bei Berechnung zu klein aus. Die Abweichungen sind gemäss Tabelle 38 im rechten Teil der Tabelle 39 farbcodiert. So fällt beispielsweise das berechnete 0.80er Quantil im Code 45 (Verspätung ab Vorbahn) der SBB-ErZu-Daten 2009 mit 55.7 Minuten knapp eine Minute zu gross aus, ist damit innerhalb der Toleranz und in der Fehlerbetrachtung grün markiert.

Verschafft man sich einen Überblick über die auftretenden Prognoseungenauigkeiten, so dominieren hierbei Störungsarten, die stark vom Einzelfall und weniger von der Ereignisart geprägt sind. Dies betrifft insbesondere die technische Störungsprognose. Eine weitere wichtige Quelle von Prognoseungenauigkeiten sind statistisch betrachtet zu gering besetzte Ereignisklassen (siehe „nein“ im Spaltenfeld „Stichprobe“ (Tabelle 39) und minimaler Stichprobenumfang in Kapitel 3.2.2). Beide Szenarien würden im Implementierungsfall (vgl. Abbildung 89, Seite 181) als „kritisch“ eingestuft und nicht mehr der rein statistischen Prognose unterzogen.

Ein Grossteil jener in der reinen Statistikbetrachtung auftretenden Ungenauigkeiten lässt sich durch die methodische Kombination aus Prozessschritten mit zugehörigen Teilprozesszeiten abmildern, da hierbei die Spezifität des Einzelfalls besser als in der Betrachtung der Gesamtstörung abgebildet wird. Im Gegenzug wird dabei der wichtige Input der Statistik auf signifikante Fragestellungen wie die Verfügbarkeitsreparaturzeit (vgl. RAMS) zurückgedrängt. Dies ist – besonders bei der technischen Störungsprognose – realistischer. Die im rein statistischen Ansatz bestehenden Ungenauigkeiten verdeutlichen, dass ein Beschränken auf rein statistische Aspekte nicht genügt. Hingegen ist die Verifikation des kombinierten Ansatzes aus Prozessen und Statistik bei der aktuellen Datenlage wegen der Notwendigkeit des Wissens über die einzelnen Störungsrandbedingungen vorerst nicht möglich gewesen. Auf Grund der Fülle der darzustellenden Informationen fällt die Schriftgrösse recht klein aus. Detailliertere Übersichten mit weiteren charakteristischen Grössen befinden sich daher im Anhang 7.

Implementierungsphasen

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist erkennbar, dass der Prognoseprozess nebst den gezeigten statistischen Werten und den diskutierten statistischen Ungenauigkeiten für die Implementierung innerhalb der Bahnbetriebsführung geeignet ist. Diese Implementierung erfordert drei verschiedene Phasen, die aufeinander aufbauend wie folgt abgegrenzt werden:

- Phase 0 Definitionen (Forschung in dieser Arbeit)
- Phase 1 statische Auswertung (Forschung in dieser Arbeit)
- Phase 2 dynamische Auswertung (Anwendung im Bahnsystem)

Die nachfolgende Abbildung 91 zeigt die wichtigsten Implementierungsschritte der Störungsprognose in der Bahnbetriebsführung.

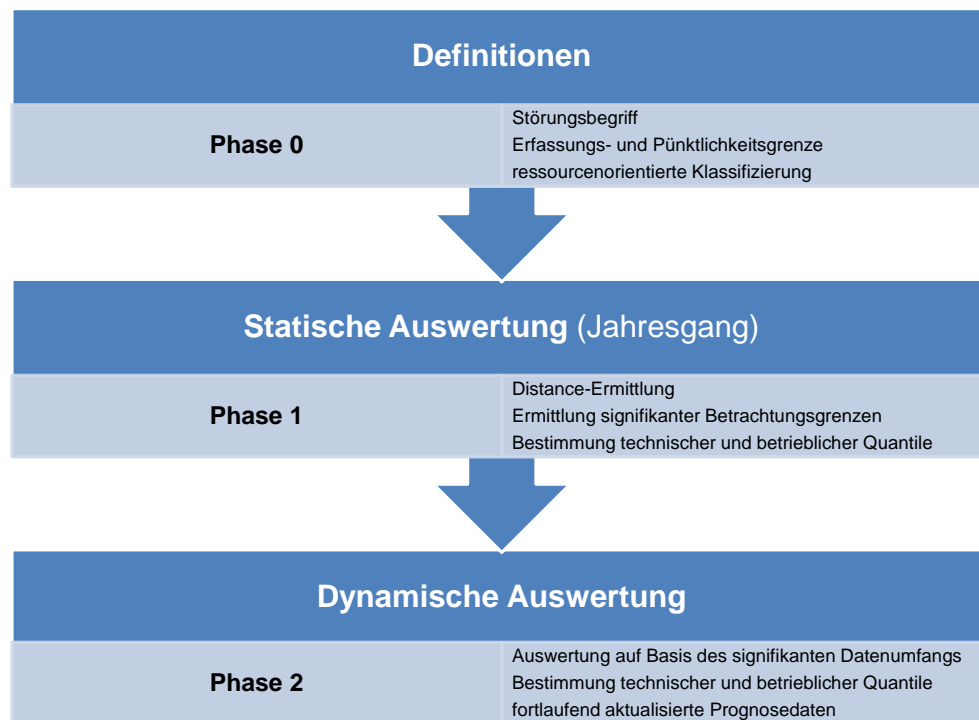


Abbildung 91: Implementierung einer Störungsprognose in die Bahnproduktion (Schranil, et al., 2013)

Phase 0 der Prognoseimplementierung in Abbildung 91 ist durch die initiale Abklärung verschiedener definitorischer Prognoseaspekte gekennzeichnet. Zum Kalibrieren dieser Überlegungen und zum Nachweis der Machbarkeit dient Phase 1, in der mit Daten aus jeweils einem Jahresgang statistische Auswertungen durchgeführt werden. Für die Entscheidungsunterstützung der Bahnbetriebsführung genügt dieser Ansatz allein jedoch noch nicht; hier ist ein Übergang auf eine dynamische Datenrückschau erforderlich, welche je nach Störungsklasse mindestens einen Jahresgang umfasst. Das Entfernen alter Datensätze für die Störungsauswertung stellt sicher, dass beispielsweise Zuständigkeitswechsel oder geänderte Entstörungskonzepte in die aktuelle Störungsprognose einfließen und somit eine kontinuierliche Erneuerung der Auswertungsdatenbanken stattfindet.

Darüber hinaus ist eine weitere Implementierungsstrategie denkbar: Anhand der ausgewerteten Störereignisklassen lässt die Störungsprognose Rückschlüsse auf geeignete Konzepte der technischen wie betrieblichen Entstörung zu. Mit diesem Wissen lassen sich in einigen Punkten Interventionszeiten verkürzen und interne Betriebsabläufe zur Rückführung in den Regelbetrieb optimieren. Somit kann die Störungsprognose mit dem dargelegten Prognoseprozess neben der eher operativen Bahnbetriebsführung als Kernziel ebenso für die strategische Betriebsplanung auf konzeptioneller Ebene praktische Anwendung finden.

8 Synthese und Fazit

8.1 Erkenntnisse aus der aktuellen Störungsforschung

Die vorliegende Dissertation ist aus der Frage nach der Prognostizierbarkeit von Störereignissen in der Bahnproduktion und des Umgangs mit eingetretenen Störungen initiiert. Sie leitet eine ressourcenorientierte bahnsystemübergreifende Störungsdefinition ab und unterscheidet dabei stets zwischen technischen und betrieblichen Aspekten des jeweiligen Störereignisses. Auf dieser Definition bauen sämtliche Analysen der Arbeit auf. So werden die Störereignisse diversen Ereignisklassen zugewiesen und Muster innerhalb der Ereignisklassen aufgezeigt. Diese Muster sind für die generelle Prognosefähigkeit und den konkreten Prognoseprozess zentral. Der strukturierten Rückkehr in den Regelbetrieb mit der Überführung in einen geplanten Betrieb als möglichen Zwischenschritt kommt eine besondere Bedeutung zu. Sowohl die technische als auch die betriebliche Entstörung werden im Zuge dieser Arbeit analysiert. Der angewandten Forschungsmethodik liegen hierbei die übergeordnete Forschungsfrage und weitere daraus abgeleitete Forschungsfragen bzw. Forschungshypothesen (siehe Kapitel 1.2) zu Grunde. Auf der zurückliegenden Forschungsarbeit basierend fokussiert dieses Kapitel auf deren Beantwortung. Hierzu sind jeder abgeleiteten Forschungsfrage zwei Hypothesen beigelegt. Anschliessend widmet sich Kapitel 8.2 dem weiteren Forschungsbedarf und Kapitel 8.3 zieht in Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage ein Fazit.

FRAGE 1: WELCHE STATISTISCHEN MUSTER, VERTEILUNGEN ODER GESETZMÄSSIGKEITEN WEISEN STÖRUNGEN AUF?

Hypothese 1.1:

Neben vielen Arten extrem seltener Betriebsstörungen zeigen sich in den Analysen vor allem wenige Klassen vergleichsweise häufiger Ereignisse.

Dies konnte gezeigt werden. Die Analyse betrieblicher Störungen zeigt bezüglich der eingetretenen (Fahrplan-) Abweichungen die Dominanz der Häufigkeit von Kleinereignissen gegenüber den länger andauernden mittelgrossen oder gar grossen Ereignissen. Dies rührt vor allem aus relativ häufigen prozessual bedingten kleinen Abweichungen innerhalb der Bahnproduktion (z. B. verlängerter Fahrgastwechsel im Personenverkehr). Grössere Abweichungen mit dahinter liegenden technischen Störungen treten vergleichsweise selten auf.

Die Frage, ab wann eine betriebliche Abweichung als Störung aufzufassen ist, beantwortet die ressourcenorientierte Störungsdefinition mit den Aspekten der unerwarteten negativen Abweichung vom Regelbetrieb und dem Erfordernis zusätzlicher Ressourcen zur Entstörung. Die zeitliche Grenze, ab welcher eine Fahrplanabweichung als Verspätung zu *bewerten* ist, hängt dabei vom jeweiligen Bahnsystem ab. Zielführend ist dazu die sogenannte Pünktlichkeitsgrenze und damit die zu unterstellende Betrachtungsgrenze der Ressource Zeit des Endkunden.

Tritt eine als Verspätung bewertete Abweichung auf, handelt es sich um eine (betriebliche) Störung. Diese Pünktlichkeitsgrenze ist erneut bahnsystemabhängig und wird bisher unterschiedlich gehandhabt. Liegt keine engere Eingrenzung des Verspätungsbegriffs vor, eignet sich die Anwendung der internationalen UIC-Standards mit fünf Minuten als Pünktlichkeitsgrenze. Diese Abgrenzung hilft, die relevante Datenmenge einzugrenzen. Abweichungen unterhalb dieser Betrachtungsgrenze sind für die Bahnbetriebsführung im Sinne einer Feinjustierung vor allem in hoch belasteten Bahnnetzen sinnvoll, jedoch für die Störungsforschung weniger im Fokus, da sie keinen Eingriff (ausserplanmässige Ressource) und somit keine Störung im eigentlichen Sinn darstellen.

Hypothese 1.2:

Inbesondere für eher häufige Störereignisse und Betriebsstörungen von vergleichbarer Natur zeigen sich deutliche Ähnlichkeiten im Ablauf und entsprechende statistische Verteilungen.

Dies konnte gezeigt werden. Auf Grund der Dominanz von Kleinereignissen bei der betrieblichen Störungsanalyse bietet sich dort die Modellierung mittels adaptierter Exponentialverteilungen an. Die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Störungsdauern sind meist recht klein (einzelne Minuten). Die erforderlichen Adaptionen rühren aus der Erfassungsgrenze betrieblicher Störungen; bei einigen Betreibern sind diese identisch mit der Pünktlichkeitsgrenze. Um diese zeitliche Grenze und die Häufigkeit der darunter nur rudimentär erfassten Störungsdaten sind die Verteilungen im Sinne der Störungsprognose anzupassen.

Beim Übergang auf technische Störungsdauern ist die Dominanz der Kleinereignisse zwar weiterhin feststellbar, jedoch nimmt die Streuung der Ereignisdauern und somit auch die Streuung der technischen Störungsdauer von der Störungsoffenbarung bis zur Wiederherstellung aller Funktionalitäten stark zu. Dies erschwert in der Regel eine stochastische Modellierung als Störungsverteilung. Eine Ursache dafür liegt in der Bedeutung der Logistik für die technische Entstörung, welche sich besonders bei der Intervention am Ereignisort offenbart. Für die technische Störungsprognose bietet sich die Zerlegung in Teilprozesse der Intervention an, um die Störungsdauer basierend auf den typischen Dauern der Teilprozesse zu prognostizieren. Nur wenige technische Ereignisklassen erlauben basierend auf ihren stochastischen Parametern die Abbildung der gesamten technischen Störungsdauer mittels adaptierter Normalverteilung.

FRAGE 2: WIE ERFOLGT EINE SINNVOLLE KLASSIFIZIERUNG VON BETRIEBSSTÖRUNGEN IM HINBLICK AUF DIE PROGNOSTIZIERBARKEIT IHRER AUSWIRKUNGEN?

Hypothese 2.1:

Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz liefern vergleichbare Ergebnisse zur Störungsklassifizierung.

Dies konnte teilweise gezeigt werden, da beide Ansätze unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen. Grundsätzlich lassen sich Störungen sowohl nach der Störungsursache bottom-up als auch nach der Grösse der betrieblichen Abweichungen top-down klassifizieren. Beide Klassifizierungen sind gleichberechtigt, haben jedoch einen separaten Analysefokus. Der betrieblich besseren Vergleichbarkeit diverser Störungsarten der Top-Down-Betrachtung steht die technisch tiefergehende Analyse bei der Realisierung der Bottom-Up-Betrachtung gegenüber. Insofern liefern beide Klassifizierungsarten eine eindeutige Zuordnung einer Störung zu jeweils einer Ereignisklasse, fokussieren jedoch auf Störungsursache (Bottom-Up-Klassifizierung) oder auf die Störungswirkung (Top-Down-Klassifizierung).

Zentrale Herausforderung beim Umgang mit klassifizierten Störereignissen ist die Anzahl von Ereignissen je Störungsklasse. Je nach Ereignisart verunmöglicht dies statistisch abgesicherte Aussagen, da die Mindestanzahl von Ereignissen für eine gewisse Störungsklasse bei gegebener Irrtumswahrscheinlichkeit in der nahen Vergangenheit für das reale Störungsgeschehen deutlich zu hoch ausfällt.

Hypothese 2.2:

Für betriebliche Fragestellungen ist der Top-Down-Ansatz geeigneter.

Dies konnte gezeigt werden. Die Top-Down-Klassifizierung ordnet die Störungsdauer in ein zeitliches Raster ein. Daraus entsteht eine endliche Anzahl von Störungsklassen. Dies bietet vor allem bei betriebstechnologischen Fragestellungen den Vorteil, dass eine Vergleichbarkeit der zeitlichen Störungswirkung von Ereignissen auf den Endkunden (Fahrgast oder Verloader) ermöglicht wird, was in besonderem Masse dem Dienstleistungsgedanken entspricht. Weiterhin ist diese Top-Down-Betrachtung im Kontext von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Systeme und Komponenten (RAMS-Thematik) zur Applikation weiterer Kennzahlen nutzbar.

Somit ist die Top-Down-Betrachtung für rein prozessuale Betrachtung der Bahnbetriebsführung besonders geeignet. Eine Aussage über die (technische) Störungsursache folgt aus der Top-Down-Betrachtung hingegen weniger. Für diese eher technischen Fragestellungen bietet sich die Bottom-Up-Betrachtung an. Eine Kombination aus beiden erlaubt – sofern die Datenlage dies ermöglicht – eine umfassende Sicht auf das Störungsgeschehen hinsichtlich Ursache und Auswirkung.

FRAGE 3: WELCHER MELDEPROZESS LIEGT ZWISCHEN DEM STÖRUNGSEINTRITT UND DER AUSLÖSUNG EINER DISPOSITION, WELCHE DISPOSITIONEN ERFOLGEN UND WIE IST DIESER PROZESS OPTIMIERBAR?

Hypothese 3.1:

Meldeprozesse sind in verschiedenen Bahnsystemen und abhängig vom Betreiber stark heterogen, vor allem in Vollbahnsystemen aber tendenziell komplex.

Dies konnte gezeigt werden. Definierte Meldekettens und Meldeprozesse sind in der modernen Bahnbetriebsführung quasi Standard. Die Zuständigkeiten sind dabei an die jeweiligen Spezifitäten angepasst. Dabei prägen Art und Grösse des Bahnsystems die Komplexität der Meldeprozesse im Ereignisfall. In diesem Kontext lassen sich zentrale Unterschiede zwischen den tendenziell kompakteren Tramnetzen und den flächenmässig weitläufigeren Vollbahnnetzen aufzeigen. Die vereinfachte Betriebsform von Tramsystemen ermöglicht eine eher schlanke Organisation der Meldekette mit vergleichsweise wenig Instanzen.

Insbesondere Bahnnetze mit umfangreichem Verkehr in und aus Nachbarnetzen bzw. mehreren Betreibern auf dem Netz sind bezüglich der Meldeprozesse anspruchsvoll; dies betrifft vor allem die Vollbahnen. Hier sind im Ereignisfall entsprechend viele Stellen mehr oder weniger standardisiert involviert, was zu umfangreichem Informationsaustausch und damit umfangreichen Meldekettens führt. In kleineren Bahnsystemen wie den Stadtbahnen gelingt wegen der Überschaubarkeit und der damit möglichen hohen Systemverantwortung für das Fahrpersonal (z. B. Einstellen des Fahrwegs) die Beschränkung auf verschlankte Strukturen. Daraus entsteht gleichzeitig eine kompaktere Organisation der relevanten Akteure (z. B. im Tramsystem Fahrer/Leistelle, bei Vollbahn Triebfahrzeugführer/Zugführer/Fahrdienstleiter/Disponent). Dies korreliert jeweils mit Netzlänge bzw. Betriebsprogramm auf diesem Netz.

Nichts desto trotz lassen sich aber auf funktionaler Ebene der innerbetrieblichen Kommunikation Gemeinsamkeiten zwischen Voll- und Stadtbahnen aufzeigen, da im Ereignisfall meist zentral Informationen gesammelt und ausgewertet werden sowie abgeleitete Informationen (Entscheidungen) generiert werden, welche dann ihrerseits wieder zu distribuieren sind. Andererseits ist im Kontext der Trennung von Netz und Betrieb der Spagat zwischen effizientem Informationsaustausch und funktionaler Separierung der infrastrukturseitigen und verkehrlichen Aspekte zu meistern.

Hypothese 3.2:

Das Layout des Meldeprozesses von Betriebsstörungen und die Effizienz der Disposition werden vom Stand der technischen Ausrüstung determiniert; klare Verantwortlichkeiten sollten definiert werden.

Dies konnte gezeigt werden. Die zentrale Herausforderung in der Bahnproduktion ist das Umgehen mit dem Ungewissen. Im Umkehrschluss gelingt eine Reaktion auf Störungsereignisse umso besser, je schneller umfassende Informationen über das Ereignis vorliegen. Bei aller Erfahrung

der beteiligten Akteure ist jedoch ein detailliertes Wissen über den konkreten Einzelfall fundamental, was die Bedeutung der Instrumente der Lageführung unterstreicht. Heutzutage ist es Stand der Technik, dass Betriebszentralen oder Leitstellen diese Informationen elektronisch in Echtzeit verfügbar haben, was betriebliche wie technische Entscheidungen massiv vereinfacht und beschleunigt. Sobald aktuelle Informationen der Bahnbetriebsführung quasi online und zeitgleich an mehreren Stellen vorliegen, wird das Zuweisen der Zuständigkeiten bedeutsam. So ist von vornherein festzulegen, wer in welchem Ereignisfall welche Rolle einnimmt. Andernfalls kostet die Abklärung dieser Zuständigkeitsfragen im Störfall wertvolle Ressourcen, insbesondere Zeit, welche besser in die konkrete Störungsbehebung zu investieren ist.

Moderne Betriebsleitsysteme schlagen dem Disponenten mehrere Dispositionsvarianten zur betrieblichen Störungsbehebung vor. Dies bietet vor allem den Vorteil, in kürzerer Zeit ein grösseres Variantenspektrum in die Überlegungen einzubeziehen und setzt Ressourcen zur fokussierten Störungsbehebung frei. Der mitunter sicherheitsrelevante Letztentscheid sollte jedoch auch aus Gründen des betrieblichen Systemüberblicks beim Disponenten verbleiben. Dies bildet darüber hinaus die Basis innovativer betrieblicher Lösungen, wenn dies der Störfall ad hoc erfordern sollte.

FRAGE 4: WIE KANN EINE PRAXISTAUGLICHE STÖRUNGSPROGNOSE REALISIERT WERDEN UND WAS KANN SIE BEI EINER KONKRET EINGETRETENEN BETRIEBSSTÖRUNG LEISTEN?

Hypothese 4.1:

Auf Grundlage der Felddatenauswertung sind typische Verläufe von Betriebsstörungen darstellbar; Grenzen bestehen jedoch bei Störungen durch Elementarereignisse.

Dies konnte gezeigt werden. Grundsätzlich bestehen zwei Varianten der Annäherung an die technische bzw. betriebliche Störungsprognose. Das Lernen aus Vergangenheitsdaten mittels Statistik (oder künstlicher Intelligenz) bildet die Zustände aus eben dieser Vergangenheit ab. Das Analysieren von Prozessen und Zuständigkeiten ermöglicht darüber hinaus eine zeitgerechtere Adaption an geänderte Randbedingungen und den konkreten Einzelfall. Für die Störungsprognose wird daher eine Kombination aus prozessualen und statistischen Aspekten aufgezeigt.

Herausforderung bei statistischen Ansätzen sind stets die Streuung und die für eine konkrete Störungsklasse meist geringe Anzahl von Felddaten aus der nahen Vergangenheit. Für betriebliche Prognosen ist die Statistik dennoch recht gut nutzbar. Die technische Prognose hängt hingegen sehr stark vom Einzelfall mit seiner konkreten Interventionsstrategie ab. Dementsprechend bietet der Aspekt der prozessualen Prognose Vorteile. Besonders seltene und besonders grosse Störereignisse – beispielsweise mit nationalen Auswirkungen – sind für die Prognose recht anspruchsvoll. Der Fokus liegt daher vor allem bei kleineren und mittleren Störereignissen, da hier sowohl für die technische als auch für die betriebliche Entstörung ein vergleichsweise grosses Variantenspektrum verbleibt.

Hypothese 4.2:

Mithilfe der Störungsprognose lassen sich eintretende Betriebsstörungen hinsichtlich Dauer und Wiederherstellungsalgorithmen objektiv prognostizieren.

Dies konnte gezeigt werden. Der Fokus der Störungsprognose liegt im Eruiere der betrieblichen und technischen Störungsdauer. Hierbei sind neben der Art des Ereignisses auch die jeweiligen Randbedingungen in die Prognose einzubeziehen. Mit diesem Wissen lässt sich eine Störungsprognose als Handlungsabfolge realisieren. Sie ist jedoch im Ereignisverlauf zu kalibrieren, da mit der Zeit konkrete Einzelinformationen sowohl vom Ort des Geschehens (technische Fragestellungen) als auch für die zu verwendende Einzeldisposition (betriebliche Fragestellungen) eintreffen und das Fortschreiben der Prognose ermöglichen.

Über das Setzen von Zielfunktionen lassen sich Dispositionsmaßnahmen methodisch sauber evaluieren. Die Intervention folgt hingegen der Zielsetzung einer Wiederherstellung aller Funktionalitäten der technischen Systeme in sinnvoller Reihenfolge und Zeitdauer. Diese Dauer lässt sich über die Kombination der Prozesse mit der Statistik der Teilprozesse ebenso prognostizieren. Durch sauber definierte Prozesse und klare Anwendungskriterien statistischer Applikationen lässt sich die Störungsprognose als Ganzes plausibilisieren und letztlich auch objektivieren.

FRAGE 5: WIE KANN DIE INFORMATIONSTRATEGIE IM FALL VON BETRIEBSSTÖRUNGEN ANGE- SICHTS EINER VERBESSERTEN STÖRUNGSPROGNOSE ANGEPASST WERDEN?

Hypothese 5.1:

Auf Grund der Störungsprognose wird die betriebliche Disposition effizienter.

Dies konnte gezeigt werden. Am Anfang eines Ereignisses liegen nur wenige und unvollständige Informationen vor, welche die betriebliche Entscheidungsfindung erschweren. Gerade hier kann die Störungsprognose einen wertvollen Beitrag leisten, indem die mutmassliche Störungsdauer frühzeitig in die Entscheidungen der Bahnbetriebsführung einbezogen wird. Auf Grundlage definierter Randbedingungen ermöglicht die Störungsprognose eine konkrete Auswahl aktuell relevanter Dispositionsmaßnahmen. Der Wichtung aller Aspekte der betreiberabhängigen Zielfunktion kommt dabei eine zentrale Rolle zu, da sie relevante von irrelevanten Dispositionsmaßnahmen separiert und somit die Entscheidungsfindung vorbereitet.

Der Umgang mit der Ungewissheit ist eine zentrale Herausforderung für die betriebliche Störungsbehebung in Form der Disposition. Ungünstigerweise nimmt der Endkunde exakt diesen Aspekt der Leistungserstellung wahr und bildet daraus sein Urteil über die Bahnbetriebsführung respektive das Gesamtsystem Bahn. Daraus resultiert der drohende Imageverlust im Fall von Störereignissen, welcher durch ungeeignete Dispositionsmaßnahmen verstärkt werden kann.

Hypothese 5.2:

Durch eine verbesserte Störungsprognose können Endkunden geeigneter informiert werden.

Dies konnte gezeigt werden, da mit den Informationen aus der Störungsprognose Endkunden bereits in einer frühen Phase der Störereignisse zuverlässig informiert werden können. Den Endkunden im Bahnsystem ist folglich auch vor dem Hintergrund des intermodalen und intramodalen Wettbewerbs ein adäquater Service zu bieten. Dies gilt auch im auf lange Sicht unvermeidlichen Fall von Störereignissen. Hierbei ist bereits die beseitigte Ungewissheit ein zentraler Aspekt. Andererseits zeigen Endkundenbefragungen in diversen Bahnsystemen wiederholt, dass aus Nutzersicht die Informationslage im Ereignisfall bislang vielfach zu wünschen übrig lässt.

Die Erkenntnisse der Störungsprognose sollten zukünftig verstärkt in die Endkundeninformation integriert werden. Geeignete Ressourcen innerhalb der Bahnproduktion sind dafür vor- und bereitzuhalten, da der Ereignisfall von einer Menge verarbeitungsrelevanter Informationen determiniert ist. Die Endkundenkommunikation geht dabei vielfach schlichtweg unter oder wird zu gering priorisiert. Über die Einbindung der Störungsprognose in die Endkundeninformation lässt sich die Phase der Informationsverarbeitung auf der Seite der Bahnproduktion beschleunigen, was Synergien im Interesse der Endkundenkommunikation birgt. Im Störungsfall lässt sich Unzufriedenheit durch Beseitigung der Ungewissheit des Endkunden abwenden.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Dissertation konzipiert eine prozessorientierte Störungsprognose, welche sich parallel dazu analytisch auf statistische Grössen abstützt. Der konzeptionelle Charakter der Arbeit wird an geeigneter Stelle um konkrete Aspekte der Umsetzbarkeit und möglicher Implementierungsphasen ergänzt, erhebt jedoch nicht den Anspruch, ein „Störungsprognosetool“ zu offerieren. Stattdessen wird die Implementierung in die bestehende Systemlandschaft der Bahnbetriebsführungsinstrumente favorisiert, um die Heterogenität der bereits heute bestehenden Systeme nicht zu vergrössern und darüber hinaus Synergien zu nutzen.

Einzelne Punkt dieser Dissertation sollten Anlass zu weiteren Untersuchungen bieten. Von besonderem Interesse können dabei die rein technischen Störungen mit ihren Ereignisdauern sein. Auf Grund der Datenlage trat hier bislang das Problem zu geringer Stichprobengrössen in Kombination mit zu geringer Datendetaillierung zu Tage. Um Abhilfe zu schaffen sind technische Störungsdauern nebst den Zeiten der Teilprozesse zu erfassen und auszuwerten. Entsprechende Datenbanken sind bei grösseren Bahnbetreibern bereits vorhanden, jedoch fehlt bisher das konsequente Einpflegen der zeitlichen Aspekte, die für eine solche Auswertung benötigt würden.

Die datenseitige Erschliessung der Prozesszeiten einzelner Interventionsschritte böte die Möglichkeit einer weiter vertieften statistischen Analyse, ähnlich wie dies in der vorliegenden Arbeit für betriebliche Aspekte der Störereignisse bereits möglich war. Hierbei ist vor allem der Frage nach jeweils zu adaptierenden statistischen Verteilungen nachzugehen. Ungeachtet dessen ist für die Interventionsprozesse die Quantilbetrachtung ebenso in Erwägung zu ziehen; dabei können Felddaten auch ohne Modellierung einer Verteilung analysiert werden.

Die Fallstudien dieser Dissertation bilden zumeist einen Jahresgang von Störereignissen ab. Sofern bei den Betreibern grössere Zeitreihen zur Verfügung stehen, ist der Frage nachzugehen, wie sich das Störungsgeschehen und die charakteristischen Störungszeiten über die Jahre verändert haben. Daraus liesse sich möglicherweise ableiten, in welchem Umfang organisatorische Veränderungen die Effizienz der Störungsbehebung beeinflussen. Dadurch sollte ein Rückschluss auf die lokal und temporal optimierte Allokation betrieblicher wie technischer Entstörungsinstrumente ermöglicht werden.

Insgesamt ist eine praktische Applikation der Überlegungen dieser Arbeit in die Bahnbetriebsführung anzustreben. Das Kapitel 7.2.3 zeigt dazu eine stufenweise Abfolge aus prozesstechnischer Sicht auf. Neben diesem Aspekt ist weiterhin die Einbindung in die Prozesse der Bahnproduktion vor einer Anwendung zu vertiefen. Nicht zu vergessen ist darüber hinaus die Einbeziehung der Anwender in eine geänderte Prozessarchitektur, um frühzeitig Verständnis und vor allem Akzeptanz für die eintretenden Veränderungen durch die Unterstützung bei der Störungsbewältigung zu schaffen. Die nachfolgende Abbildung 92 illustriert die Verkettung der drei Aspekte Technik, Mensch und Organisation in kompakter Form.

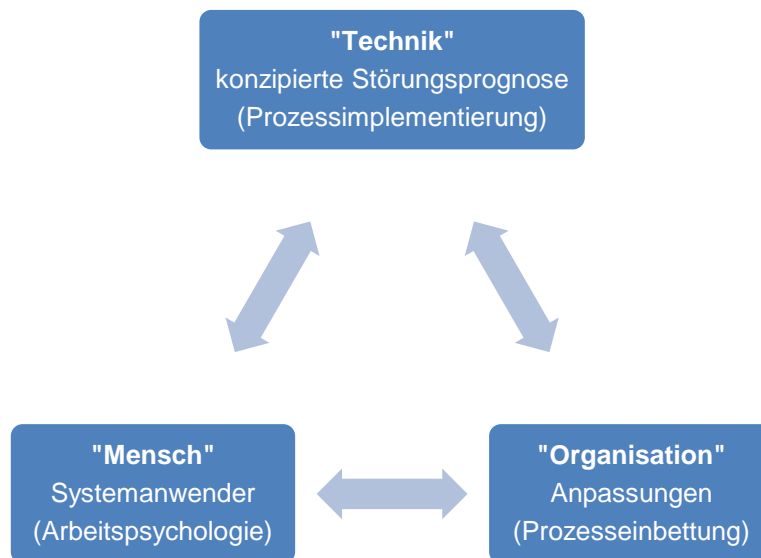


Abbildung 92: Verknüpfung von Technik, Mensch und Organisation bei der Störungsprognose (eigene Darstellung)

Die dargelegten Überlegungen zur Konzeption einer Störungsprognose sind dank der Einbeziehung diverser Bahnbetreiber und ihrer spezifischen Belange prinzipiell praxistauglich; dies ist gegebenenfalls in einer weiteren und grösseren Feldstudie zu dokumentieren. Daraus könnte sich eine ergänzende Kalibrierung der technischen bzw. betrieblichen Prognosekennzahl ergeben. Sinnvollerweise sollte die Störungsprognose in einem kompletten (Teil-) Netz erfolgen, um in vertretbarer Zeitspanne eine statistisch repräsentative Datenmenge zu gewinnen.

Die Überlegungen zur Störungsprognose bilden die Grundlage zur generischen Bewertung von Massnahmen zur technischen und betrieblichen Entstörung. Daraus entstehen Synergien mit verwandten Anwendungs- und Forschungsfragen. Hierzu zählen beispielsweise Fragen der Netzstabilität von Bahnsystemen, wo die Störungsprognose durch Angaben zur Dauer möglicher Ereignisse integriert werden kann. Eine weitere Verknüpfung ist zur Ausfallprognose von Komponenten und technischen Systemen denkbar, da hierbei bereits Aussagen zu möglichen Ereignisdauern abgeleitet werden können und daraus Instandhaltungsstrategien angepasst werden können. Betrieblich liesse sich eine Verknüpfung zwischen der Störungsprognose und dem Rescheduling erarbeiten. Aus dieser operativen Stärkung der Bahnbetriebsführung sind aktuell bestehende Dispositionsstrategien zu vertiefen beziehungsweise adäquat weiterentwickelbar.

8.3 Fazit

Abschliessend wird auf die übergeordnete Forschungsfrage zurückgekommen.

Übergeordnete Forschungsfrage:

Ist es möglich, eingetretene Bahnstörungen so zuverlässig zu prognostizieren, dass die Störungsprognose für Dispositionsprozess und Kundeninformation genutzt werden kann?

Der zentrale Ansatz der Störungsprognose ist die Kombination aus prozessualen und statistischen Aspekten. Erst dadurch lässt sich das Wissen aus Vergangenheitsdaten nutzen, um die Spezifität des aktuellen Störungfalls ergänzen und die Beherrschbarkeit eingetretener Ereignisse erhöhen. Die Schnittstelle zwischen den statistischen Betrachtungen und der Verwendung von Prozessdaten ist von entscheidender Bedeutung für die Störungsprognose. Der konzipierte Prognoseprozess ist für die Anwendung in der Bahnbetriebsführung verschiedenartiger Bahnsysteme mit allenfalls geringen Adaptionen implementierbar.

Die Störungsprognose ist selbst mit dem Anwendungsfokus der Disposition bzw. Endkundeninformation realistisch, da die mutmassliche Dauer von betrieblichen und technischen Ereignissen mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits in einem frühen Stadium des Ereignisses abgeleitet werden kann. Diese Arbeit zeigt auf, welche konzeptionellen Überlegungen erforderlich sind und wie die Umsetzung in der Bahnbetriebsführung erfolgen soll. Im Verlauf der Bearbeitung wurde von der ursprünglichen Beschränkung auf „Bahnbetriebsstörung“ zu allgemeinen Störereignissen („Bahnstörungen“) generalisiert, welche in betrieblichen und technischen Aspekten analysiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass eine jede Prognose mit Unsicherheiten verbunden ist, da die Zukunft auch im konkreten Kontext der Bahnbetriebsführung nie mit *absoluter* Sicherheit vorhersagbar sein kann. Verbleibende Unsicherheiten flankieren den Prognoseprozess, so dass deren Beherrschung für die Implementierung in der Bahnbetriebsführung zentral wird. Die vorgeschlagene Störungsprognose in Kombination mit einem sinnvollen Toleranzintervall und die Ergänzung der Aussage, mit welcher Sicherheit die Prognose voraussichtlich eintritt, tragen zur praktischen Beherrschbarkeit der genannten Unsicherheiten entscheidend bei. Dabei ist zu bemerken, dass sich ein unerwartetes Überschreiten der prognostizierten Ereignisdauer in der Lösungsfindung der Bahnproduktion anspruchsvoller darstellt als ein unerwartetes Unterschreiten der Störungsdauer. Daher wurde die Störungsprognose an diesen beiden Randbedingungen sowie am Umgang mit Ausreissern kalibriert und optimiert.

Mit Disposition, Intervention und (Endkunden-) Kommunikation konnten die drei zentralen Folgeprozesse der Störungsprognose als Kernprozesse identifiziert und analysiert werden. Diese Aspekte bewirken unterschiedliche Ausrichtungen der Störungsprognose auf die betriebliche Störungsbehebung (Disposition), die technische Störungsbehebung (Intervention) und die Weitergabe von Informationen innerhalb sowie an die Nutzer des Bahnsystems (Kommunikation). Erst die Einbindung dieser drei Folgeprozesse ermöglicht eine erfolgreiche Störungsprognose.

Anhang

	Seite
Anhang 1: Ansprechpartner für Fachfragen.....	199
Anhang 2: Arbeitspakete der Forschungsarbeit.....	200
Anhang 3: Gesamtübersicht der Fallstudien.....	201
Anhang 4: Strecken- bzw. Liniennetz der Forschungspartner.....	202
Anhang 5: Weitere Auswertungen der Fallstudien zur Knotenpünktlichkeit.....	209
Anhang 6: Codierlisten der Praxispartner.....	216
Anhang 7: Detaillierte Übersicht zur Prognosegenauigkeit.....	224
Anhang 8: Formelsammlung dieser Dissertation.....	226

Anhang 1: Ansprechpartner für Fachfragen

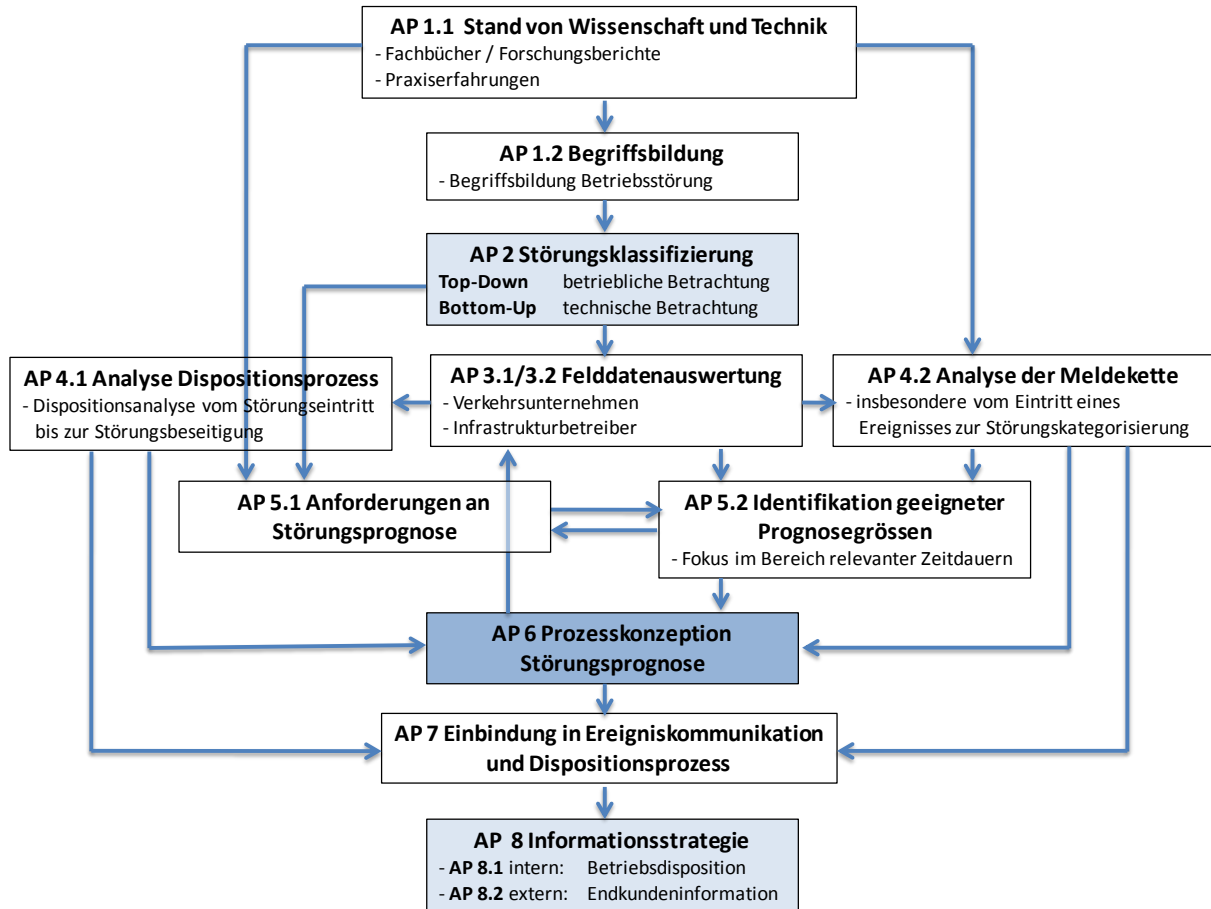
Tabellarische Übersicht der im Kontext dieser Dissertation kontaktierten Experten:

Name	Vorname	Titel	Unternehmen	Funktion	Themenfelder für Dissertation
Angermair	Niklas	Dipl.-Ing.	DB Netz / Bereich Südost	BZ Leipzig: Netzdisposition I.NP-SO-B(N)	DB-Fallstudie
Bepperling	Sonja-Lara	Dr.-Ing.	ETH Zürich / IVT	Postdoc, heute Ernst Basler+Partner	Normung
Berthold	Peter	Dipl.-Phys.	DVB Center Fahrbetrieb	Informationssysteme	DVB-Fallstudie
Bruckmann	Dirk	Dr.-Ing.	ETH Zürich / IVT	Senior Scientist	Logistik/Produktion
Conte	Samuel		SBB Infrastruktur	Anforderungsmanagement I-B-APM	Anforderungsmanagement
Federer	Alexandra	MSc ETH	SBB Infrastruktur	Sicherheit Betrieb, Fachspezialisten statistische Methoden	Statistik
Fink	Olga	Dipl.-Ing. oec.	ETH Zürich / IVT	Doktorandin	RAMS
Fretter	Sarah	Dipl.-Ing.	SVZ Verkehr	Bereichsleiterin Verkehr	SVZ-Fallstudie
Funk	Ullrich	Dipl.-Ing. (FH)	DVB Center Fahrbetrieb	Leiter Center Fahrbetrieb, Betriebsleiter	DVB-Fallstudie
Grossenbacher	Peter	Dr. rer. pol.	SBB Infrastruktur	Bereichsleiter Entwicklung I-B-APM	Forschungsunterstützung SBB
Hahndorf	Frank	Dipl.-Ing.	SVZ Verkehr	Bereichsleiter Verkehr (bis 2011)	SVZ-Fallstudie
Hammer	Sabine	Dr.-Ing.	TU Dresden / VW / EB	Wissenschaftlicher Rat	Forschungsunterstützung TUD
Inderbitzin	Heinz		SBB Infrastruktur	Leiter Technisches Lagezentrum SBB-I-B-OCI-OPN-TLZ	SBB-Fallstudien
Köpping	Lutz		DVB Center Fahrbetrieb	Leiter Betriebslenkung	DVB-Fallstudie
Küffer	Ruth		SBB Infrastruktur	Mitarbeiterin I-B-APM	Prozesserstellung
Labermeier	Helga	Dr.	SBB Infrastruktur	Projektleiter I-RSQ-KP, heute Fahrplan- und Netzdesign	SBB-Fallstudien
Lademann	Anne		Gymnasium Unterstrass	Gymnasiallehrerin Mathematik/Chemie	Statistik, Quantilevaluation
Jäger	Dietmar		DVB Center Infrastruktur	Meister Kabelanlagen/Netzleitstelle	DVB-Fallstudie
Schleicher	Gert	Dipl.-Ing. (FH)	City-Bahn Chemnitz	Stellvertretender Eisenbahnbetriebsleiter	CBC-Fallstudie, Meldekettten
Schöning	Jürg	Dipl.-Ing.	Stadler Rail	Systemengineering	Gesamtsystem Bahn
Schrötter	Torsten	Dipl.-Ing.	DB Training	Trainer	Gesamtsystem Bahn
Shaha	Jonathan	PhD, dipl. Chem.	SBB Sicherheit	Projektleiter Zentralbereich Sicherheit Risikomanagement	SBB-Fallstudien
Seibel	Markus		BLS Netz	Prozess- und Qualitätsverantwortlicher	BLS-Fallstudie
Stephan	Arnd	Prof. Dr.-Ing.	TU Dresden / VW / EB	Professor für Elektrische Bahnen	Forschungsunterstützung TUD
Strässle	Stefan		SBB Infrastruktur	Operation Center Infrastruktur (vormals BZ Ost)	SBB-Fallstudien, Disposition
Täubler	Hans		CNS	Senior Consultant	Meldekettten
Thiede	Jens	Dipl.-Ing.	DVB Center Infrastruktur	Instandhaltungsbereichsleiter Bahnstromversorgung	DVB-Fallstudie
Unterberger	Stefan		SBB Infrastruktur	Leiter Kommandoraum BZ Ost	SBB-Fallstudien
Weidmann	Ulrich	Prof. Dr.	ETH Zürich / IVT	Professor für Verkehrssysteme	Dissertationsleiter, Bahnbetrieb
Wyss	Theresa		SBB Sicherheit	Projektleiterin Arbeits- und Verfahrenssicherheit	SBB-Fallstudien

Weitere Informationen zu den Forschungspartnern finden sich im Kapitel 3.2.4.

Anhang 2: Arbeitspakete der Forschungsarbeit

Projektansatz der vorliegenden Dissertation (Schrani, 2010):



Anhang 3: Gesamtübersicht der Fallstudien

Fallstudien und Präsentationen:

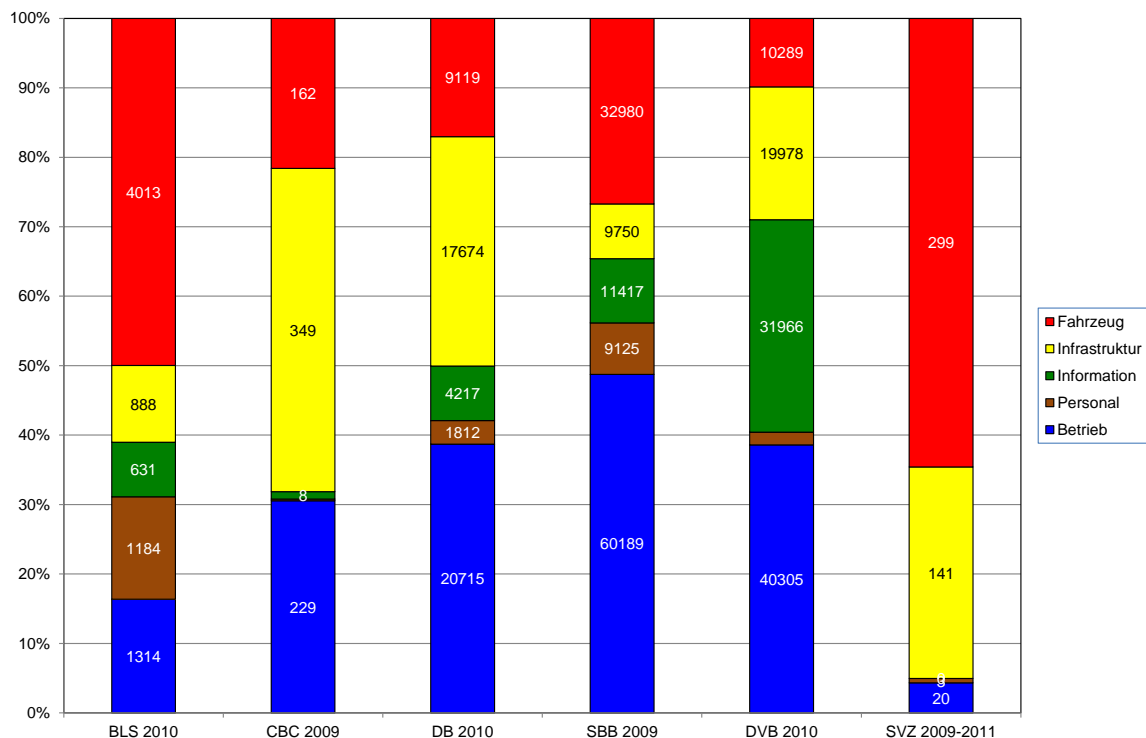
Fallstudie	Zeitraum	Präsentation	Fokus	Datensätze
Städtische Verkehrsbetriebe Zwickau	05 - 06/2010	05.07.2010	Systematik, Betriebsstörungen Tram	198
	01 - 02/2012	-	Betriebsstörungen Tram	468
City-Bahn Chemnitz	02 - 08/2010	24.08.2010	Betriebsstörungen Vollbahn (regional)	753
Dresdner Verkehrsbetriebe	08 - 10/2010	27.10.2010	Infrastrukturstörungen Tram	1697
	12/2011 - 01/2012	-	Betriebsstörungen Tram	130564
Knotenpunkte Schweizerische Bundesbahnen	10/2010 ff.	-	Top-Down-Betrachtung*	4801
	11/2010 - 02/2011	11.02.2011	Betriebsstörungen Vollbahn (national)	117649
Bern-Lötschberg-Simplon AG	09/2011 - 02/2012	-	Infrastrukturstörungen Vollbahn	50084
	02/2012	-	Betriebsstörungen Vollbahn (national)	123461
Deutsche Bahn AG	06/2012 - 01/2013	-	Bahnsuizide	464
	05 - 07/2011	20.07.2011	Anwendung Analysemethodik	8030
Deutsche Bahn AG	07 - 10/2011	02.10.2011	Anwendung Analysemethodik	53537
	07 - 09/2012	17.09.2012	Anwendung Analysemethodik	473682
5	10	4		965388

* zuzüglich automatischer Datensätze:

2120882

Weitere Forschung	Zeitraum	Präsentation
Forschungsplan	01 - 05/2010	30.03.2010
Definition	05 - 06/2010	
Systematik Betriebsstörung	07 - 08/2010	01.07.2010
Klassifizierung	10 - 11/2010	01.11.2010
Dispositionsprozess / Disposition im Kontext der Störungsprognose	02 - 08/2011	22.08.2011 / 13.02.2012
Meldekette	02 - 06/2011	10.04.2011
Anforderungsmanagement, relev. Größen	02 - 08/2011	07.06.2011
Prognoseprozess	05/2011 - 04/2012	31.10.2011 / 07.03.2012
Informationsstrategie / Kommunikation	04 - 10/2012	16.04.2012 / 03.10.2012
Zwischenstand (DB-Kontakttreffen)		01.06.2010
Zwischenstand (IFOR)		15.06.2010
Zwischenstand (IVT-Doktorandentreffen)		03.08.2010
Zwischenstand (IFOR)		26.10.2010
Ressourcenorientierter Ansatz (DVWG)		02.04.2011
Zwischenstand (IFOR)		30.06.2011
Einführung für SBB-Betriebsführung		05.07.2011
Präsentation für SBB-Betriebsführung		12.04.2012
Präsentation für Externe		01.10.2012
Präsentation auf TRB Washington D. C.		16.01.2013
Präsentation auf IT.Rail Zürich		18.01.2013
Präsentation auf VBZ-Kontakttreffen		25.06.2013

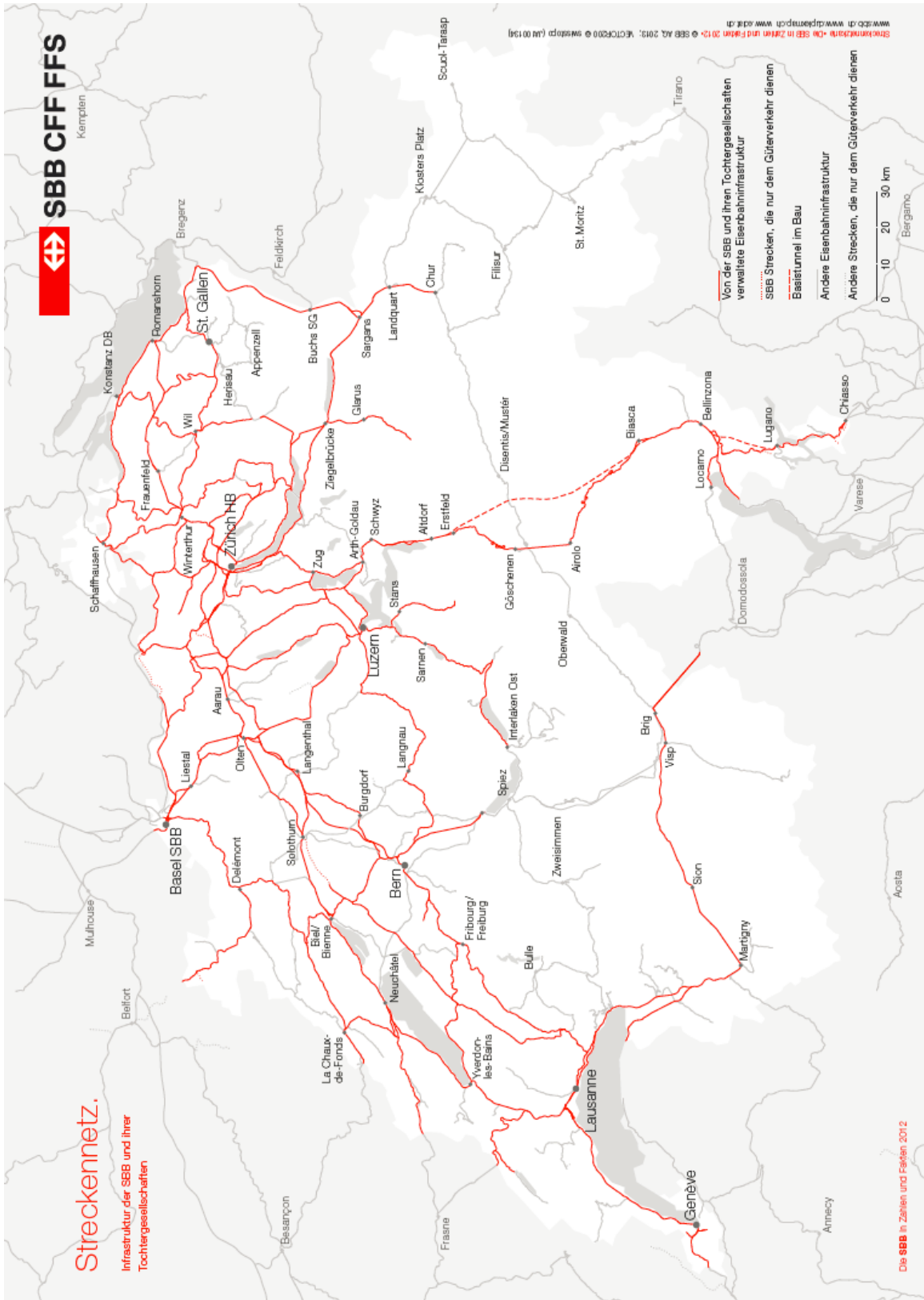
Ressourcenaufteilung der Datensätze ausgewählter Fallstudien:



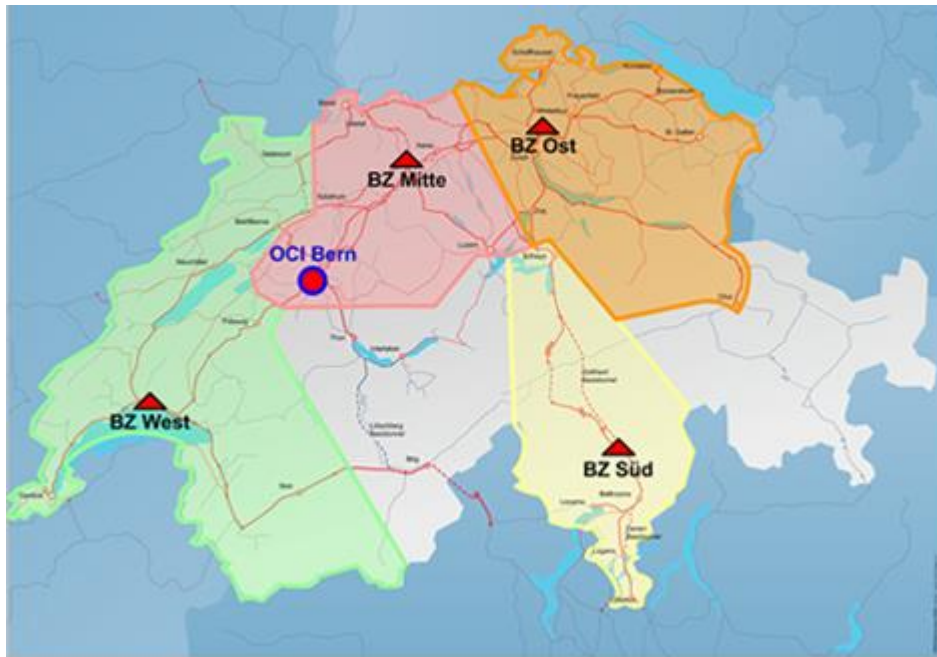
Weitere Angaben zu den Fallstudien finden sich in Kapitel 3.2.

Anhang 4: Strecken- bzw. Liniennetz der Forschungspartner

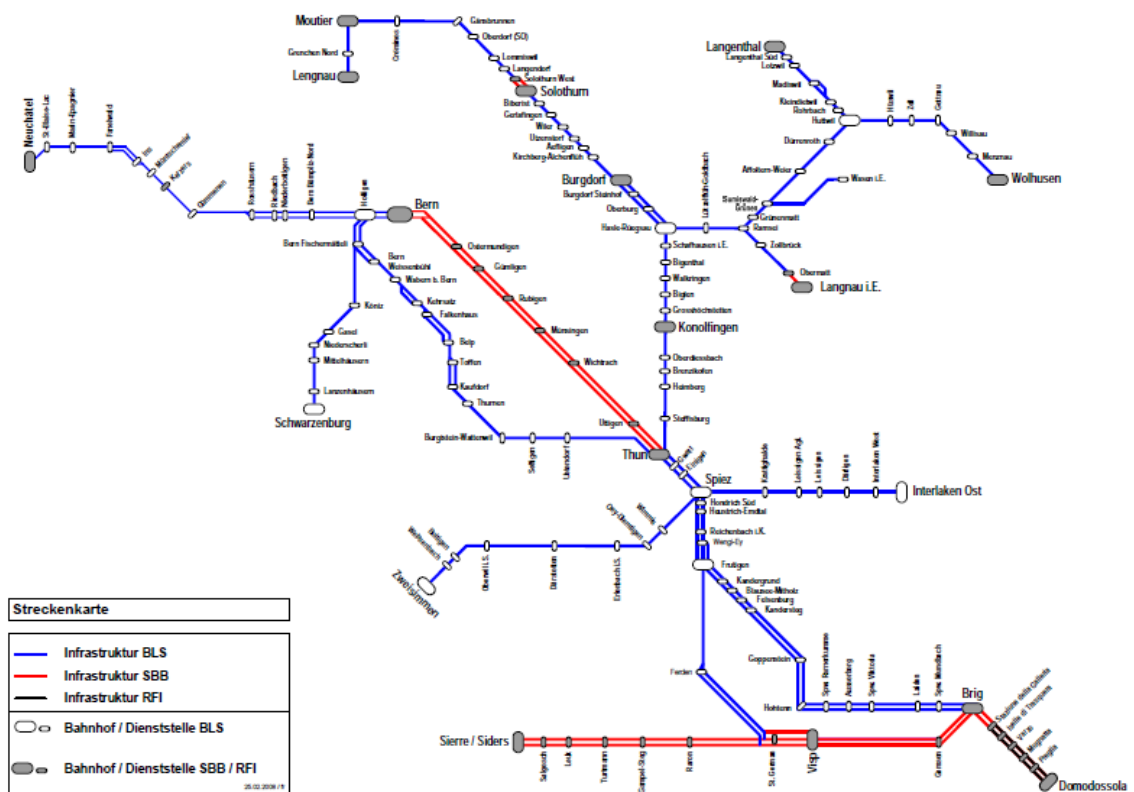
SBB-Streckennetz (SBB AG Kommunikation & Public Affairs, 2012):



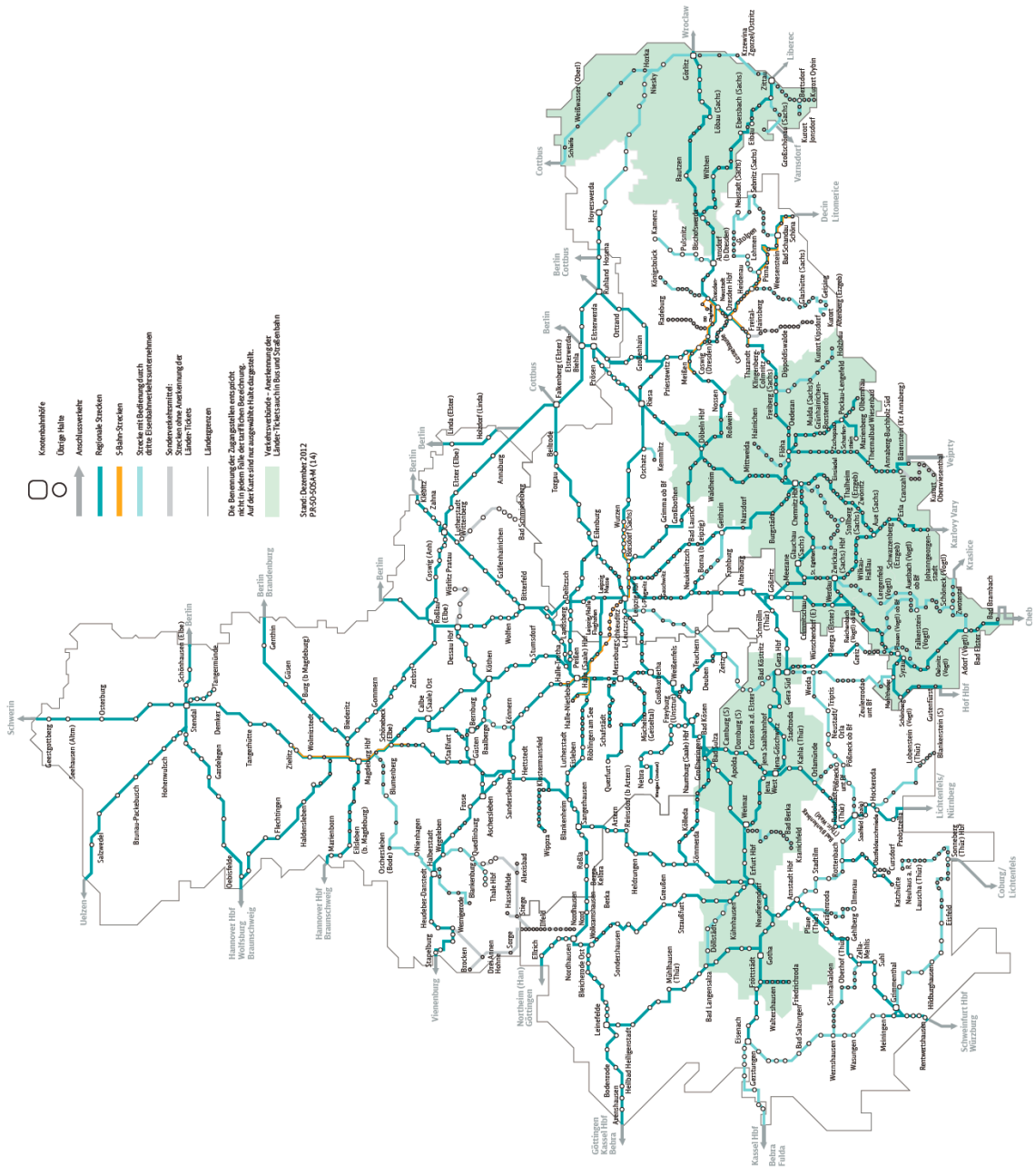
Zuständigkeitsbereiche der SBB-Betriebszentralen (BZ) und Sitz des Operation Centers Infrastruktur (OCI, Darstellung der SBB):



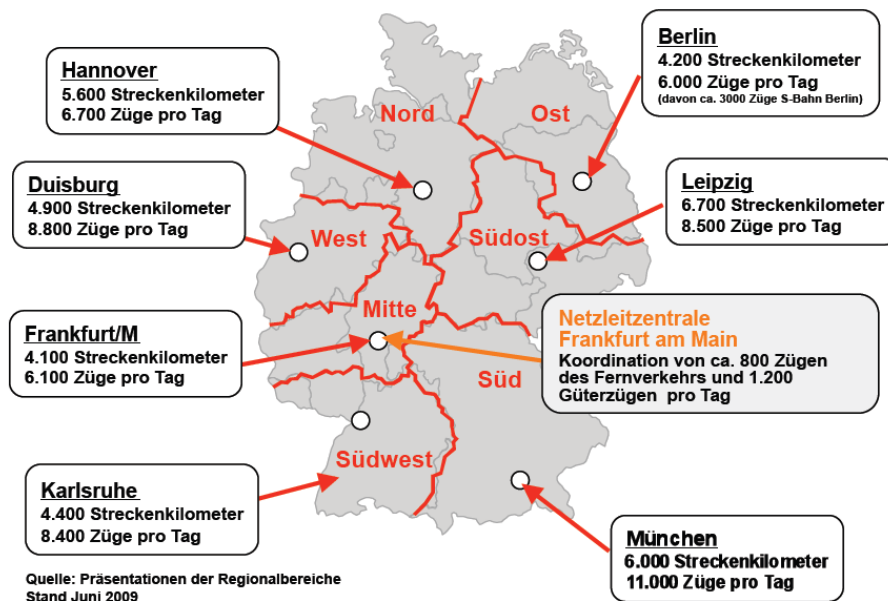
BLS-Streckennetz (BLS, 2010):



DB-Streckennetz der DB Netz Regionalbereich Südost (DB Mobility Logistics AG, 2012)



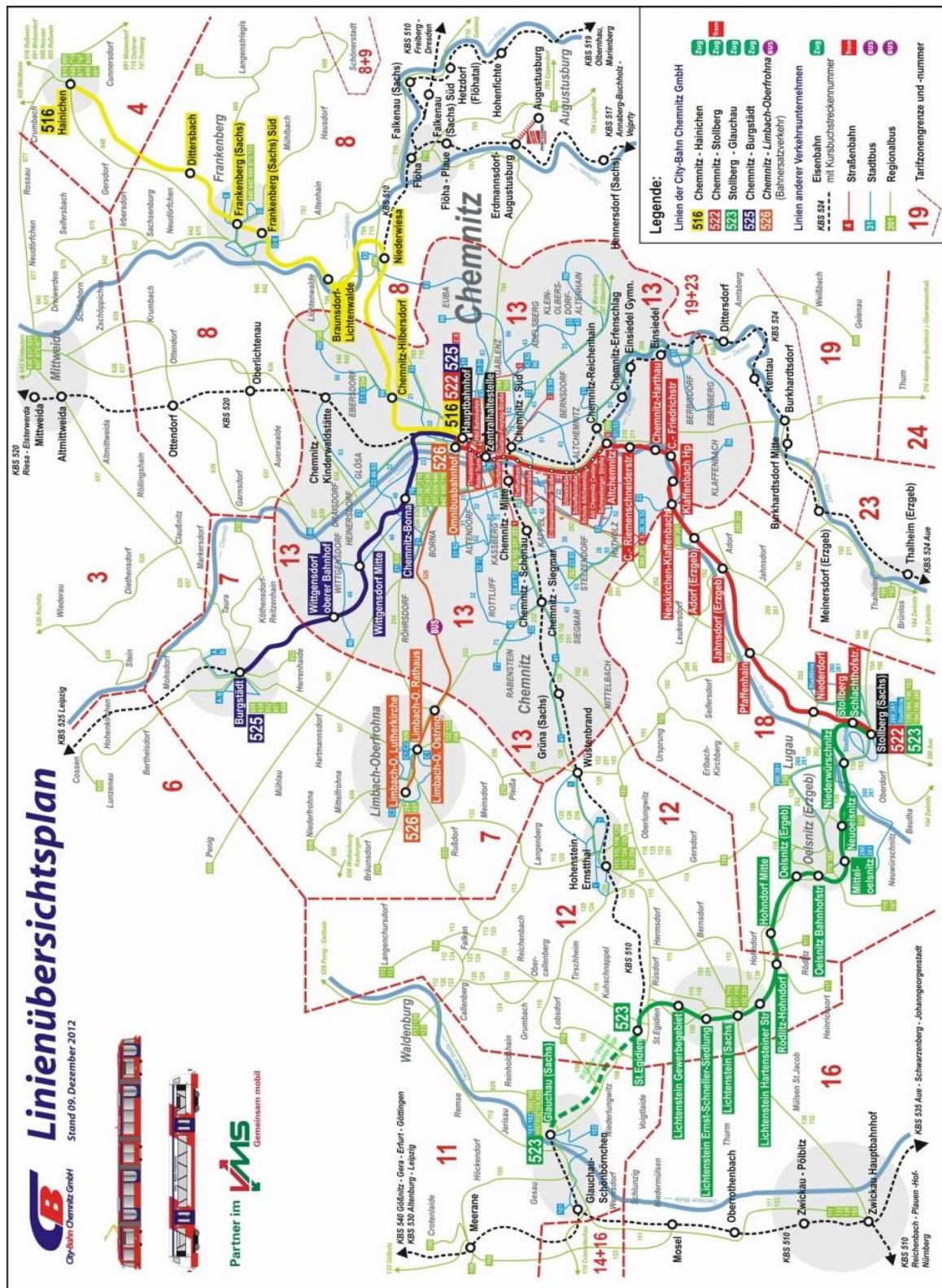
Zuständigkeitsbereiche der DB-Betriebszentralen (Barner, 2010)



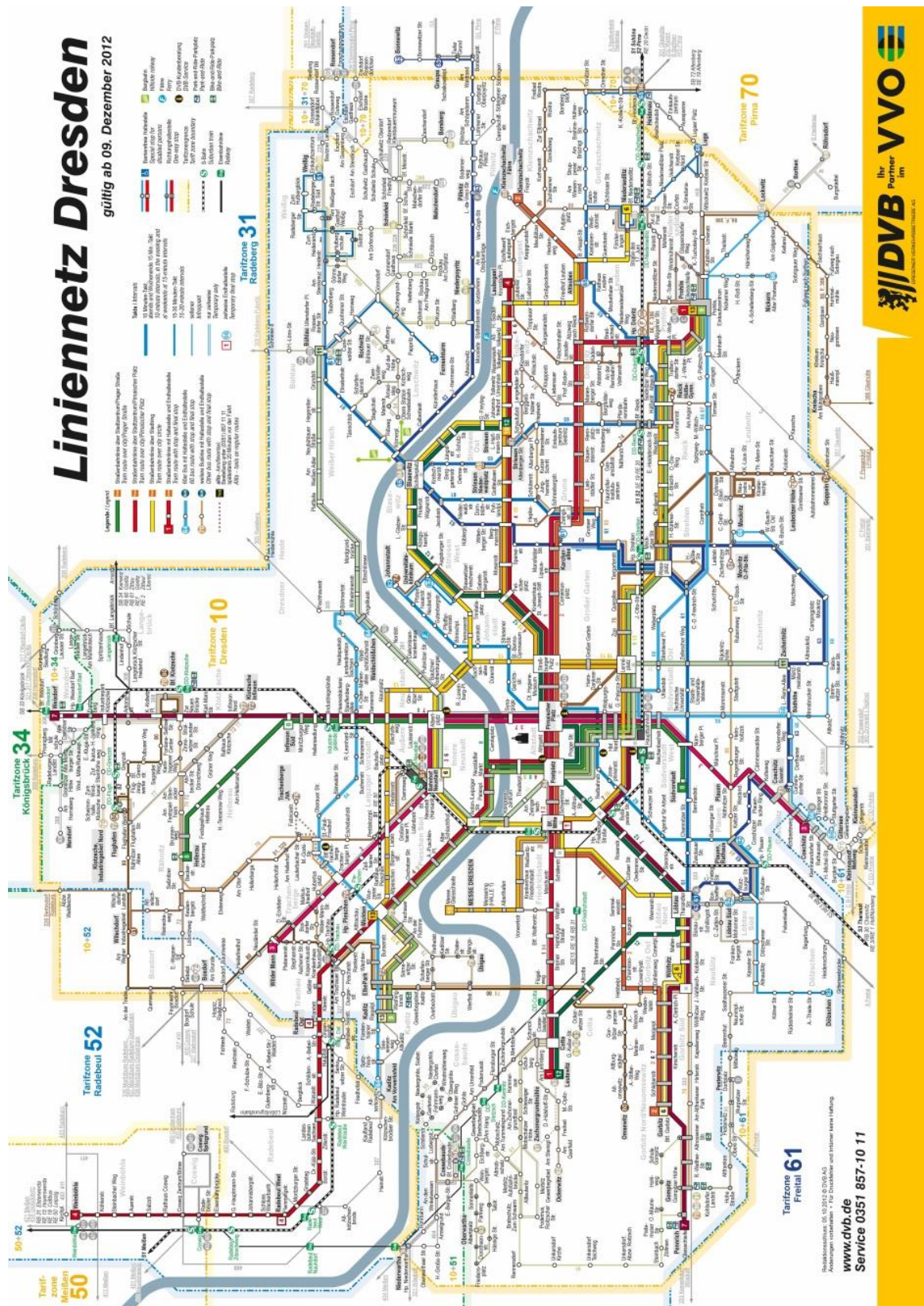
DB Netz AG – Betrieb – 22.01.2010

4

CBC-Streckennetz (Stand 09.12.2012, www.city-bahn.de, 17.04.2013)



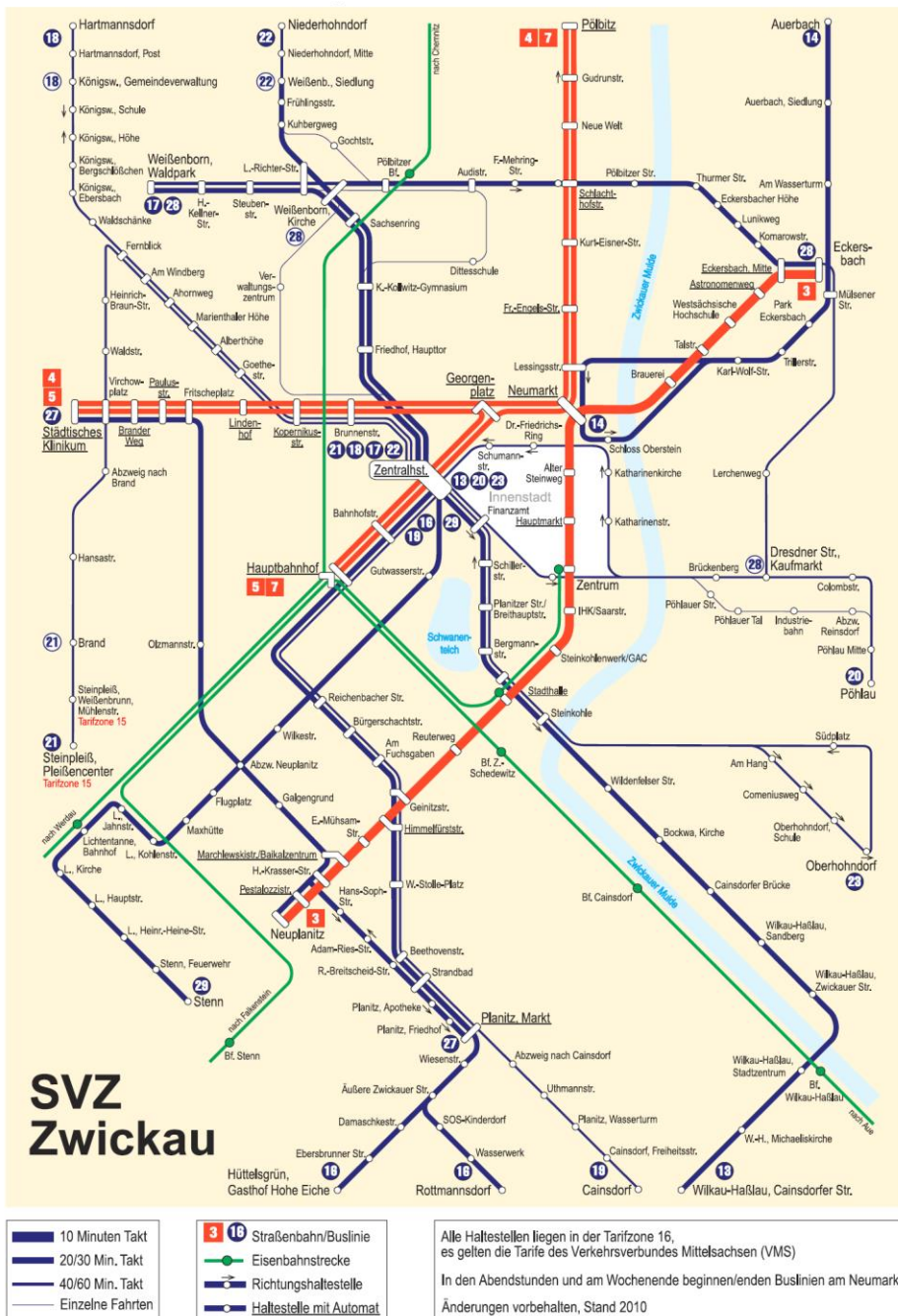
DVB-Liniennetzplan (Stand 09.12.2012, DVB):



DVB Ihr Partner im ÖPN
VVO

Reaktionszeiten: 09.12.2012 09:40
Anfragen kontaktieren: Für Druckfehler und Irrtümer keine Haftung
www.dvb.de
Service 0351 857-10 11

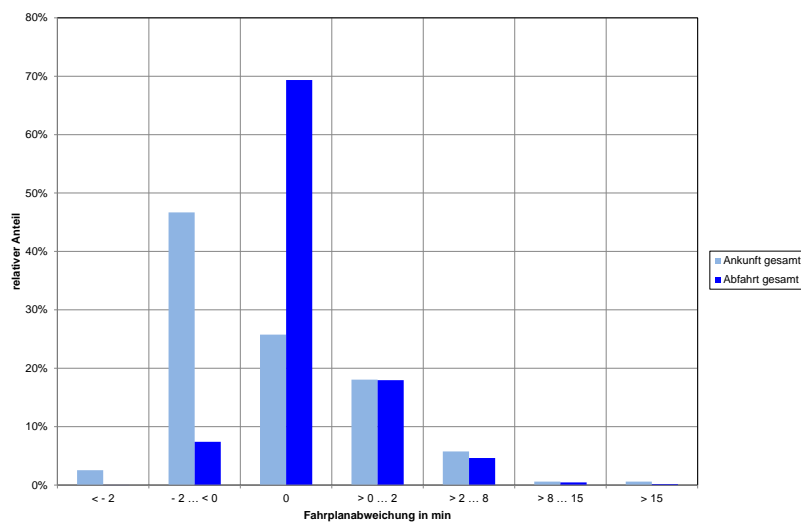
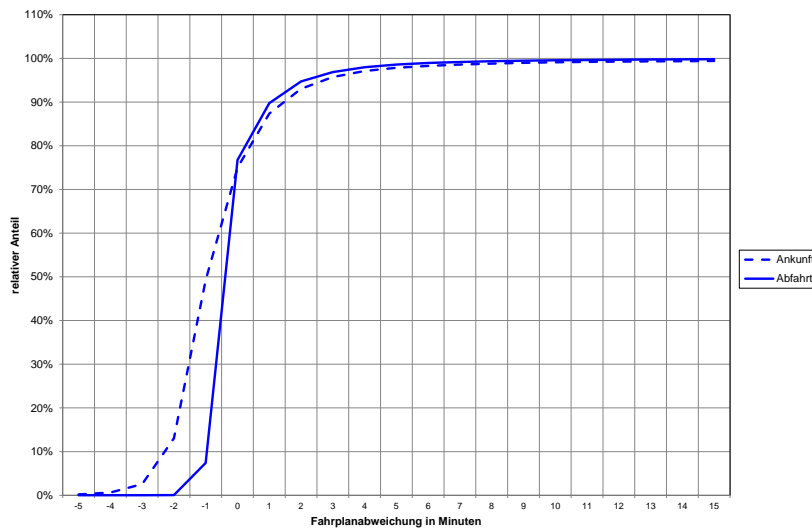
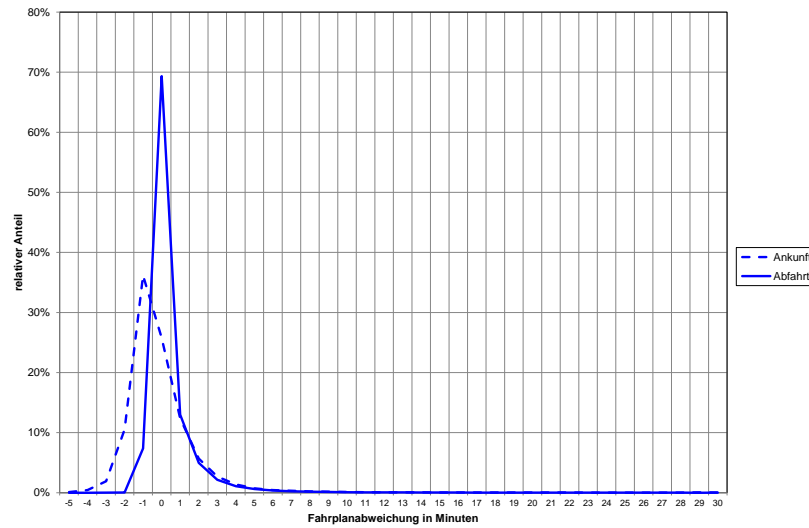
SVZ-Liniennetzplan (Stand: 2010, SVZ)



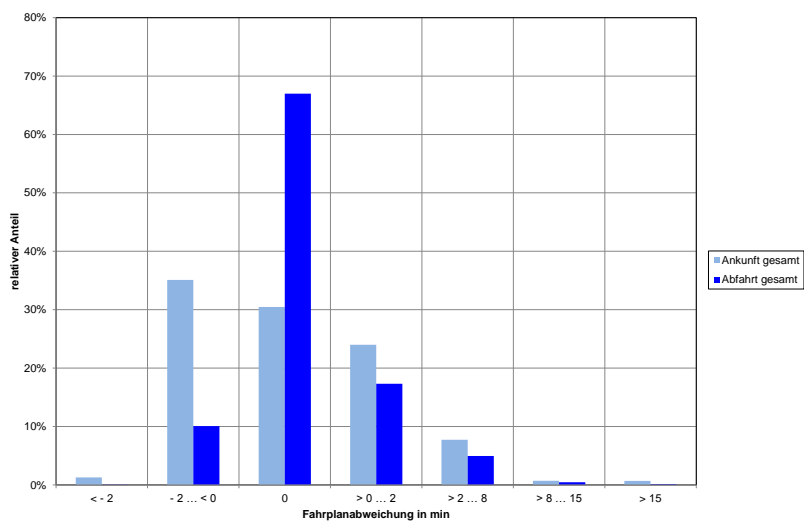
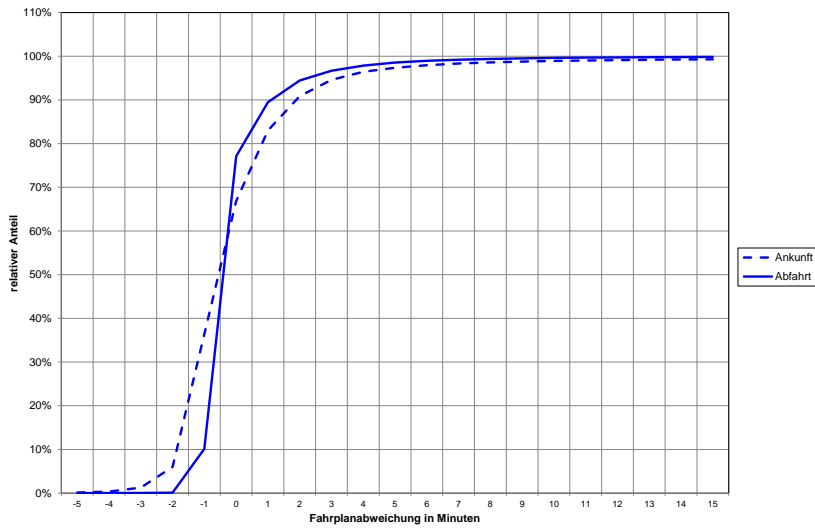
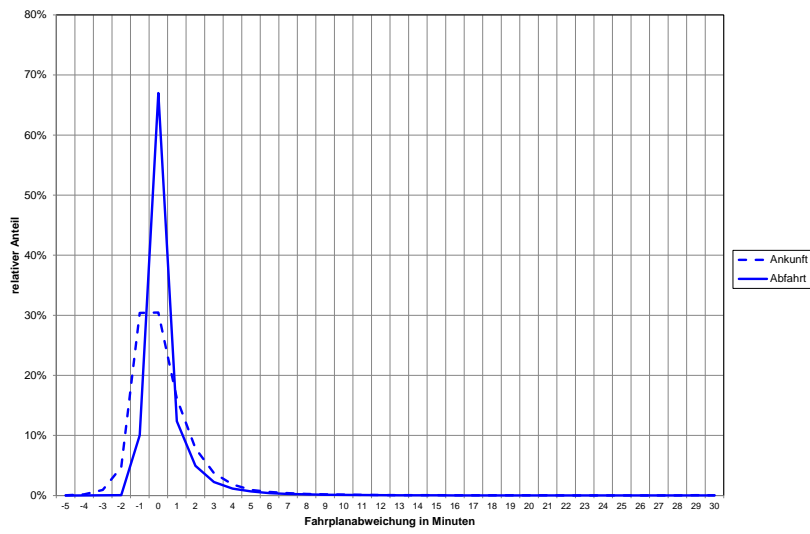
Anhang 5: Weitere Auswertungen der Fallstudien zur Knotenpünktlichkeit

Nähere Angaben zu allen Fallstudien der Knotenpünktlichkeit finden sich in Kapitel 3.2.3.

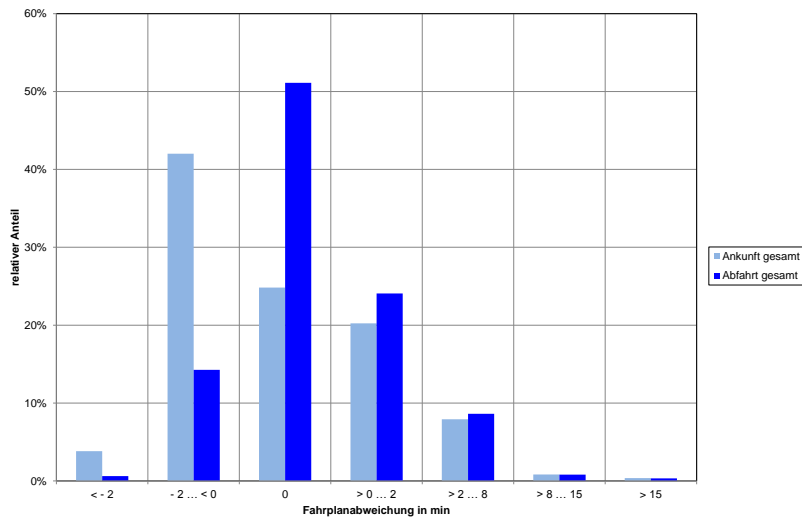
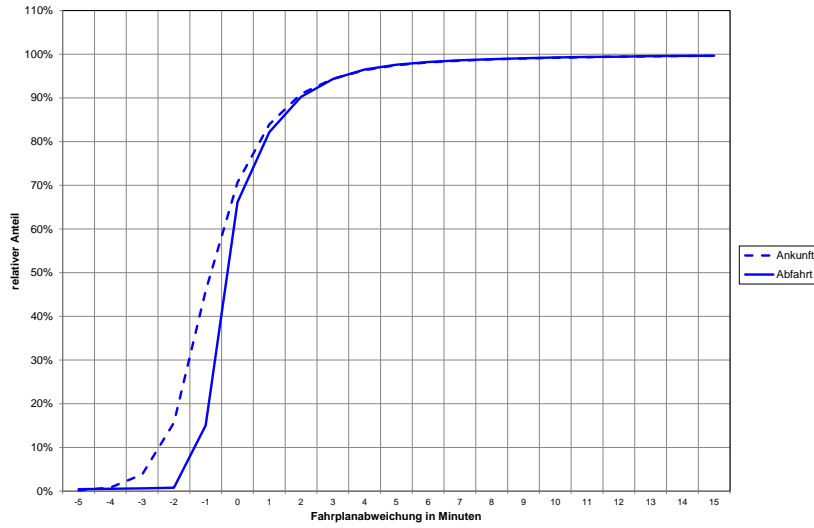
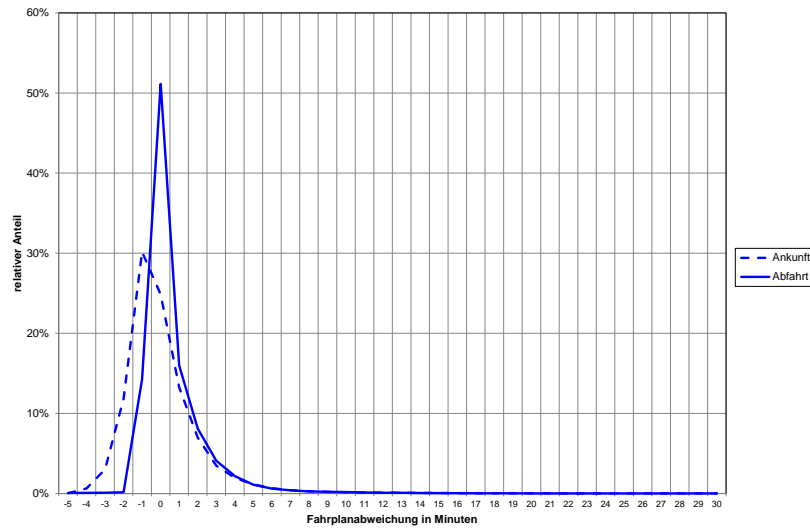
Zürich HB: Dichte- und Verteilfunktion sowie Top-Down-Klassen der SBB-Werte 2009



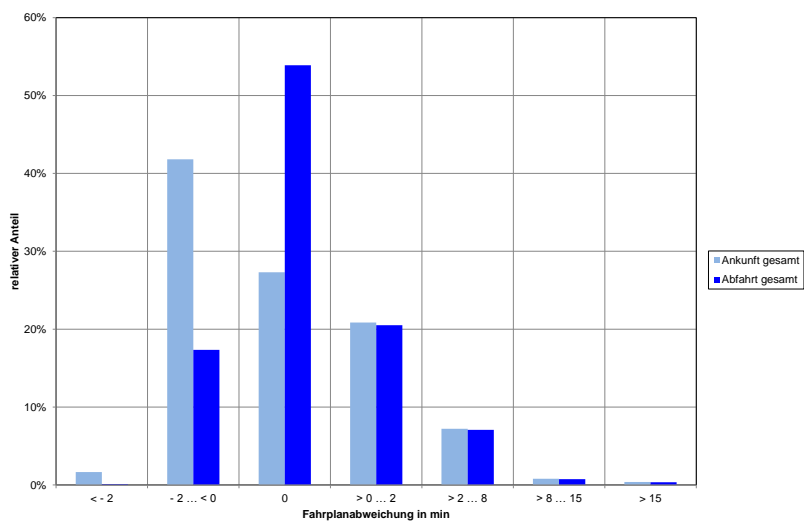
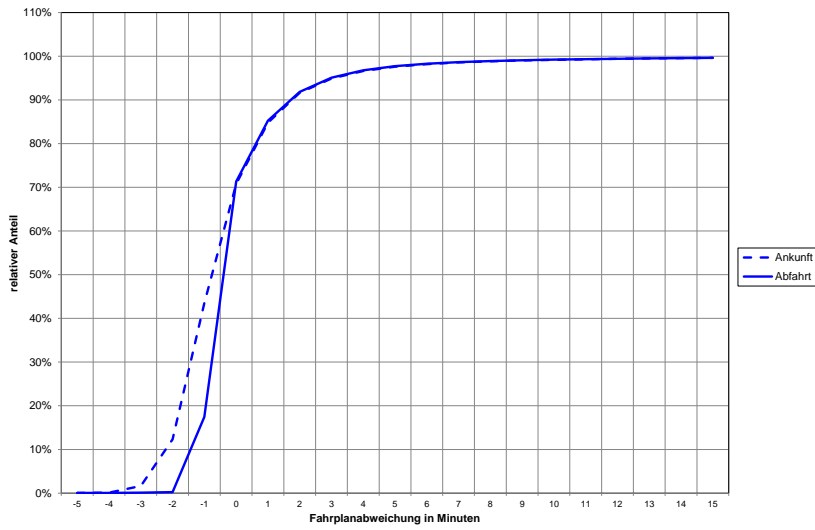
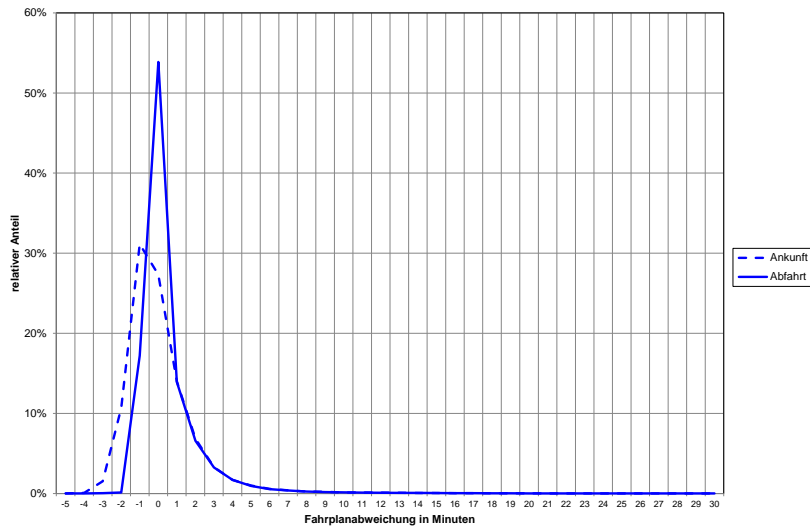
Zürich HB: Dichte- und Verteilfunktion sowie Top-Down-Klassen der SBB-Werte 2010



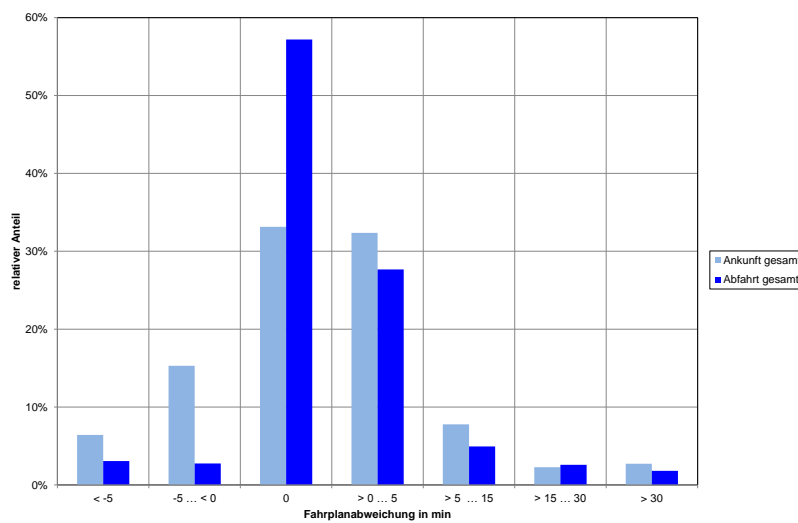
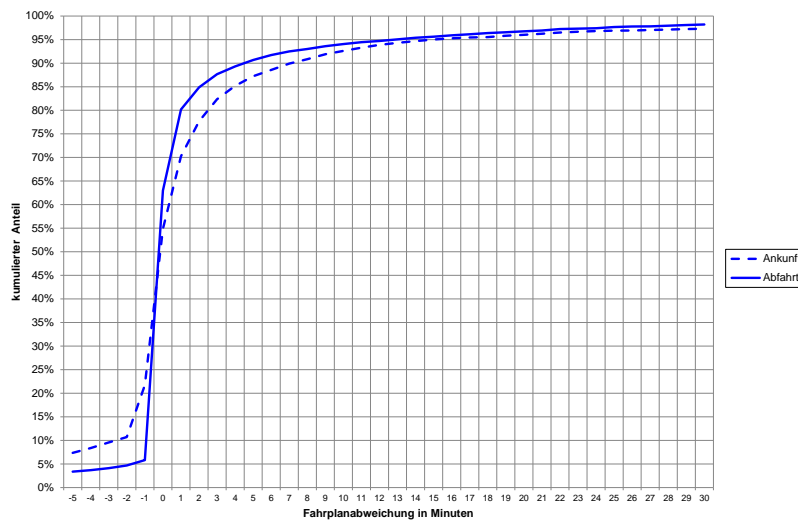
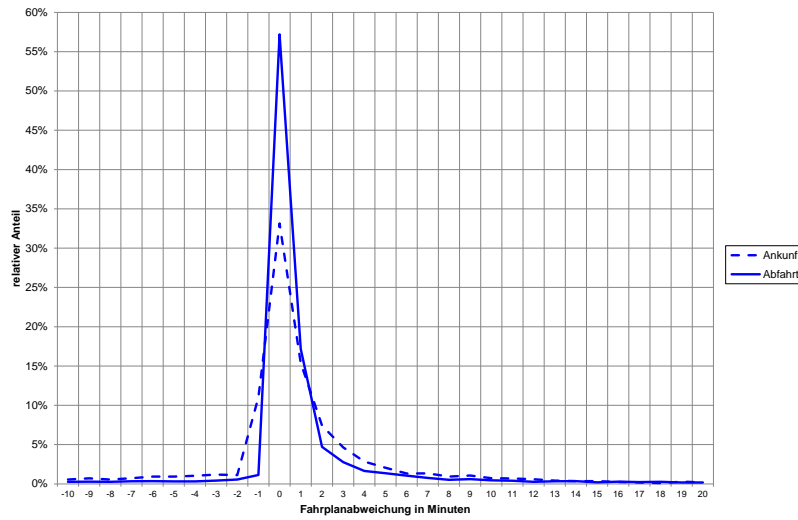
Olten: Dichte- und Verteilfunktion sowie Top-Down-Klassen der SBB-Werte 2009



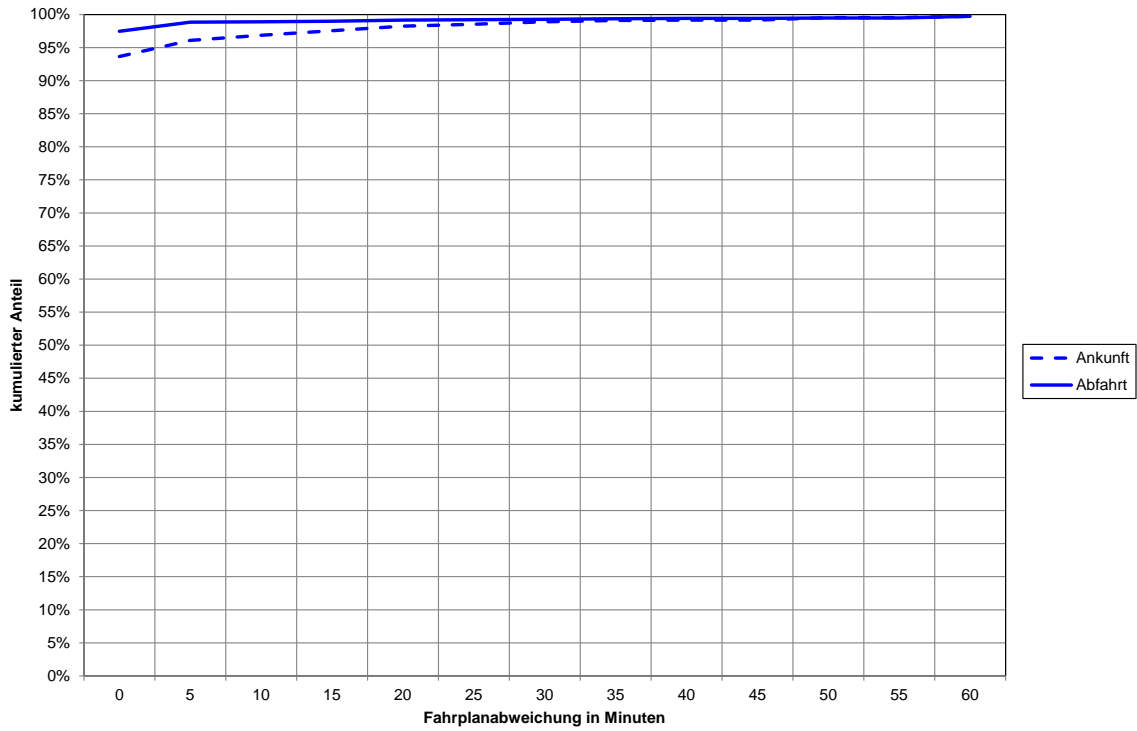
Olten: Dichte- und Verteilfunktion sowie Top-Down-Klassen der SBB-Werte 2010



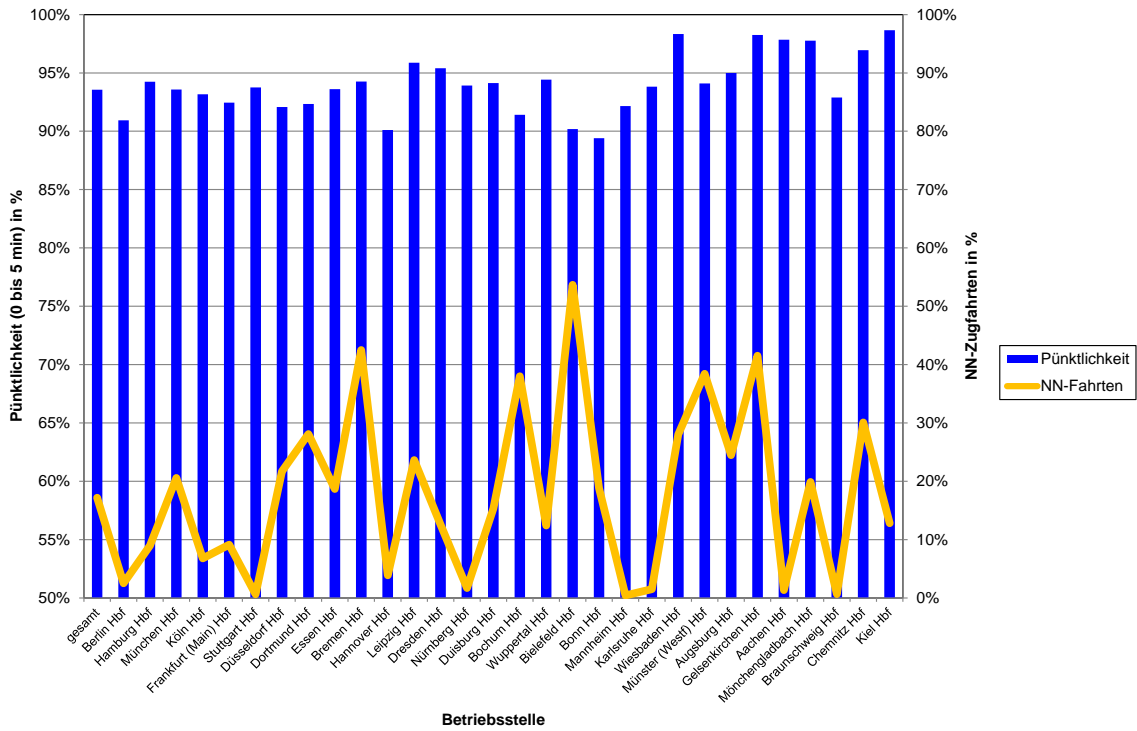
Dresden Hbf: Dichte- und Verteilfunktion sowie Top-Down-Klassen der DB-Werte 2010 (jeweils 15. des Monats)



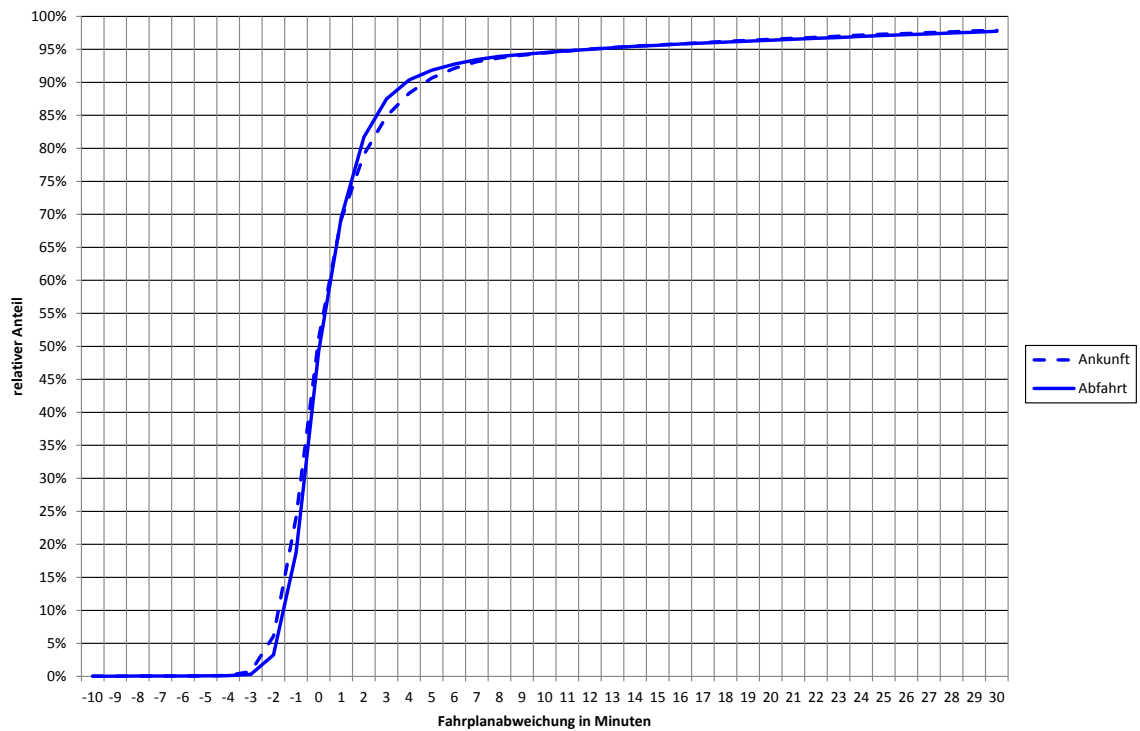
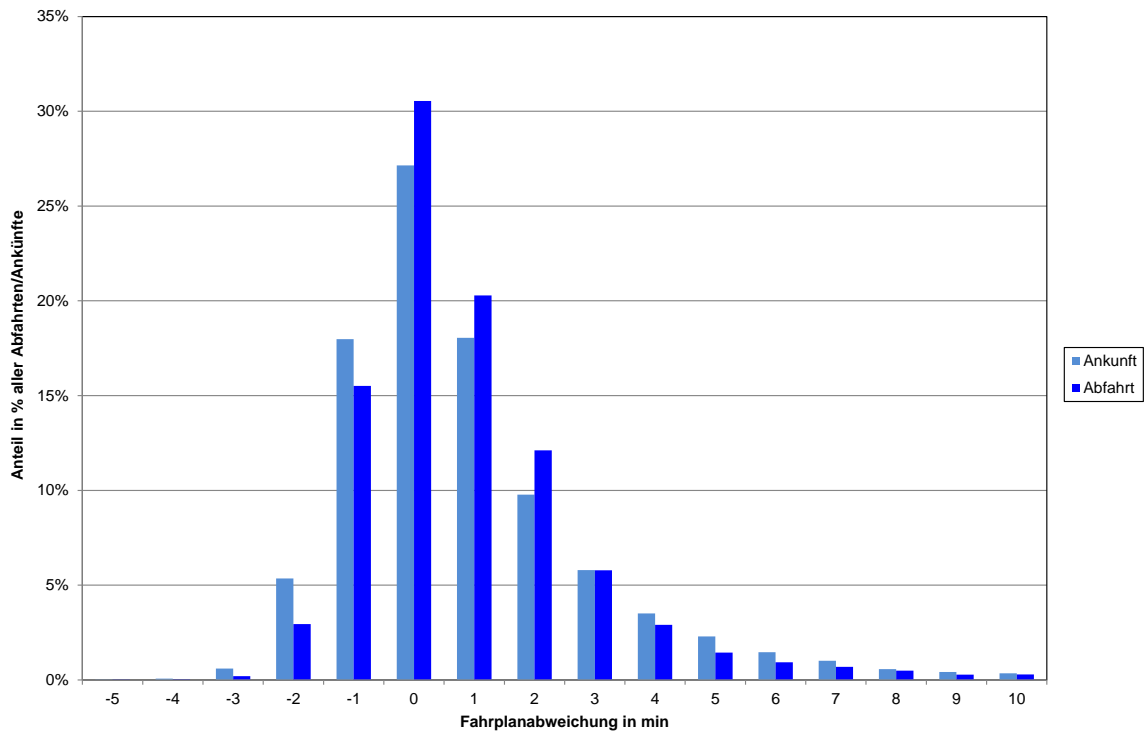
Dresden Hbf: Verteilfunktion der DB-Internetmessungen 05/2011 – 04/2012 (je 1x monatlich)



Hauptbahnhöfe der 30 größten deutschen Städte: Pünktlichkeit der DB-Internetmessungen 05/2011 – 04/2012 (je einmal monatlich, NN-Fahrten ohne Angabe [z. B. dritte EVUs])



Dresden Postplatz: Dichte- und Verteilfunktion der RBL-Werte 2010 (jeweils 15. des Monats)



Anhang 6: Codierlisten der Praxispartner

Nähere Angaben zu allen Fallstudien mit den Forschungspartnern finden sich im Kapitel 0.

SBB: ErZu-Codierliste mit Ressourcenzuordnung und absteigender Distance (2011er Daten)

ErZu-Code	ErZu-Beschreibung	Ressource	Anzahl von ErZu	Summe von Totalverspätung	Summe von Primärverspätung	Mittelwert von Totalverspätung	Standardabweichung von Totalverspätung
45	Versp durch übergebende EVU	Betrieb	30864	1749522	1392227	56.7	98.2
12	Triebfahrzeugstörung	Fahrzeug	12007	416942	130570	34.7	83.1
2	Einsatz Rollmaterial	Betrieb	6560	317746	255587	48.4	69.7
1	Lokpersonal	Personal	8592	301482	221118	35.1	55.1
41	Kunden der EVU	Betrieb	8284	245855	156188	29.7	54.8
4	Zugbildung	Fahrzeug	6515	230911	156300	35.4	47.6
13	Wagenstörung	Fahrzeug	7898	246031	108758	31.2	53.3
88	Geplante Baustellen	Information	9097	462202	1557	50.8	105.5
61	Sicherungsanlagen	Infrastruktur	6621	223202	37553	33.7	94.1
3	Traktionswechsel	Fahrzeug	3582	88068	64743	24.6	30.8
47	Anschl andern ISB oder TK	Betrieb	2923	32653	13399	11.2	25.5
40	Versp ab anderen ISB (Inland)	Betrieb	2275	64166	16109	28.2	98.3
5	Unreg. am Wagen / Ladegut	Fahrzeug	979	71938	46434	73.5	200.1
89	Übriges Externes/Verschiedenes	Betrieb	2128	118160	16899	55.5	220.2
49	Übrige Versp. Betrieb EVU	Betrieb	1696	35087	16151	20.7	34.0
34	Spezielle Kundenmassnahmen EVU	Betrieb	1223	43827	29971	35.8	56.6
59	Übriges BF	Betrieb	801	36571	28224	45.7	72.2
51	Disposition	Information	1372	27883	8373	20.3	34.4
46	Annahme and. ISB	Betrieb	803	85885	25633	107.0	377.3
42	Blaulichtorganisationen / Zoll	Betrieb	1148	23732	11897	20.7	30.4
9	Übriges Rollmaterial/Fahrzeug	Fahrzeug	866	22044	9208	25.5	50.7
23	Handicap	Betrieb	745	6712	2628	9.0	12.2
63	Fahrbahn	Infrastruktur	713	53739	1620	75.4	356.1
64	Strecken- und Gleisfreigabe	Infrastruktur	672	26236	2932	39.0	76.9
7	Probe- und Versuchzüge	Fahrzeug	459	18754	7224	40.9	82.8
31	Zugpersonal	Personal	533	7373	3501	13.8	18.4
35	Events / Doppelführungen	Betrieb	530	13683	1470	25.8	62.9
83	Witterungseinflüsse Rollmat	Fahrzeug	478	13973	2711	29.2	57.0
54	Gleis freilegen	Infrastruktur	396	9551	5788	24.1	26.7
14	Sicherheitsaspekte Rollmat.	Fahrzeug	147	11093	6093	75.5	82.1
90	Fehlmeldungen FL / Fahrbahn	Information	279	8359	695	30.0	37.2
91	Witterung Umwelt SA	Infrastruktur	216	20203	2549	93.5	246.9
6	Disposition Lokpersonal	Information	114	6735	4318	59.1	71.4
52	BLZ / TG-OP, Betrano	Information	196	7166	2123	36.6	122.3
82	Ereignisse mit Strassenfahrz.	Infrastruktur	194	15933	1144	82.1	310.5
81	Personenunfälle	Infrastruktur	160	77104	2732	481.9	706.9
71	Kommunikationseinrichtungen	Information	170	5027	1140	29.6	137.9
62	Fahrleitung	Infrastruktur	168	38580	619	229.6	844.4
76	Planung Jahresfahrplan > 48h	Information	154	3214	1361	20.9	25.1
44	Störung an IT-Systemen EVU	Infrastruktur	103	3918	2762	38.0	47.2
84	Naturereignisse	Infrastruktur	80	18581	309	232.3	623.7
69	Übriges IH / Fahrweg	Infrastruktur	78	968	375	12.4	13.4
24	Veloselbstverlad	Betrieb	77	663	298	8.6	8.3
66	Zugbeeinflussung	Infrastruktur	77	1717	271	22.3	39.1
85	Entgleisung / Kollision	Infrastruktur	66	38442	738	582.5	1401.9
92	Witterung Umwelt FL	Infrastruktur	70	11314	262	161.6	478.7
99	Unbekannt	Betrieb	56	1193	357	21.3	23.2
21	Logistik am Zug	Betrieb	55	594	218	10.8	15.7
8	Unterhalt Rollmaterial	Fahrzeug	27	4663	931	172.7	594.5
73	Stromversorgung SA / TC	Infrastruktur	46	8888	342	193.2	664.1
72	IT-Produktionssysteme Infra	Infrastruktur	42	937	232	22.3	29.3
33	Disposition Zugpersonal	Information	35	914	448	26.1	33.6
55	Rangiertechnik	Fahrzeug	22	6136	259	278.9	703.4
93	Witterung Umwelt FB	Infrastruktur	22	951	107	43.2	55.3
22	Bahnatering	Betrieb	21	323	161	15.4	14.1
67	Energie	Infrastruktur	15	3497	42	233.1	279.6
65	Störungen an ZKE	Infrastruktur	10	188	93	18.8	20.5
94	Witt. Umwelt Str.+Gleisfreigabe	Infrastruktur	1	15	4	15.0	-

DB: VU-Codeliste mit Ressourcenzuordnung (2011er Daten)

Ressource	Code	Beschreibung
Information	10	Fahrplannerstellung (Vertrieb)
Information	12	Fehldisposition
Betrieb	13	Vorbereitung (Betrieb)
Betrieb	14	Anfangsverspätung bei Zügen des Netzes
Personal	18	Betriebliches Personal Netz
Betrieb	19	Sonstiges Betrieb Netz
Infrastruktur	20	Oberleitungsanlagen
Infrastruktur	21	Telekommunikationsanlagen
Infrastruktur	22	Bauwerke
Infrastruktur	23	Fahrbahn
Infrastruktur	24	Bahnübergangssicherungsanlagen
Infrastruktur	25	Anlagen Leit- und Sicherungstechnik
Fahrzeug	27	Netzfahrzeuge
Personal	28	Technisches Personal Netz
Infrastruktur	29	Sonstiges Technik Netz
Infrastruktur	30	Mängellangsamfahrstelle
Infrastruktur	31	Bauarbeiten
Infrastruktur	32	Unregelmäßigkeiten bei Bauarbeiten
Infrastruktur	40	Nächster EIU
Infrastruktur	46	Anlagen DB Energie
Infrastruktur	47	Anlagen S&S
Personal	48	Personal S&S und DB Energie
Betrieb	49	Sonstiges S&S und DB Energie
Betrieb	50	Haltezeitüberschreitung
Betrieb	51	Antrag EVU
Betrieb	52	Ladearbeiten
Fahrzeug	53	Unregelmäßigkeiten an der Ladung
Betrieb	54	Verkehrliche Zugvorbereitung
Betrieb	57	Keine Meldung durch EVU
Personal	58	Verkehrliches Personal EVU
Betrieb	59	Sonstige verkehrliche Gründe EVU
Information	60	Umlauf-Einsatzplanung
Betrieb	61	Zugbildung durch EVU
Fahrzeug	62	Reisezugwagen
Fahrzeug	63	Güterwagen
Fahrzeug	64	Triebfahrzeuge
Personal	68	Technisches Personal EVU
Fahrzeug	69	Sonstiges Fahrzeuge EVU
Betrieb	70	Nächstes EVU
Betrieb	71	Vorheriges EVU
Betrieb	80	Externe Einflüsse nächstes EIU
Personal	81	Anordnung NLZ - Streik
Betrieb	82	Witterung
Infrastruktur	83	Schmierfilm
Betrieb	84	Behörden
Betrieb	85	Fremdeinwirkung
Betrieb	90	Gefährliche Ereignisse
Infrastruktur	91	Zugfolge (betroffener Zug war plan)
Infrastruktur	92	Zugfolge (betroffener Zug war verspätet)
Betrieb	93	Wende
Betrieb	94	Anschluss
Fahrzeug	95	Flügel

DB: VU-Codierliste mit absteigender Distance ohne Zugfolge ($\epsilon = 0.01$, 2011er Daten)

Cod	Ressource	Beschreibung	Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt		Summe von gesamt			
			Züge	Verspätung	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug	PV	Zug
54	Betrieb	Verkehrliche Zugvorbereitung	59514	4704733	4.88%	10.96%	11.91%	15.35%	26.96%	31.03%	9.50%	25.01%	26.76%							
31	Infrastruktur	Bauarbeiten	97367	1222624	18.90%	17.18%	25.54%	11.31%	5.03%	12.37%	15.55%	6.50%	16.85%							
61	Betrieb	Zugbildung durch EVU	33869	2851387	1.01%	1.69%	1.97%	10.97%	17.02%	20.25%	5.41%	15.16%	16.10%							
57	Betrieb	Keine Meldung durch EVU	61645	1151508	6.44%	3.63%	7.39%	14.16%	6.47%	15.56%	9.84%	6.12%	11.59%							
50	Betrieb	Haltezeitüberschreitung	50431	1458297	8.90%	3.89%	9.72%	6.98%	8.29%	10.83%	8.05%	7.75%	11.18%							
93	Betrieb	Wende	49776	1055442	12.25%	13.55%	18.27%	2.51%	4.52%	5.17%	7.95%	5.61%	9.73%							
51	Betrieb	Antrag EVU	22837	1281904	2.68%	3.20%	4.18%	4.87%	7.31%	8.79%	3.65%	6.82%	7.73%							
94	Betrieb	Anschluss	46541	2111707	13.24%	9.19%	16.12%	0.08%	0.01%	0.08%	7.43%	1.13%	7.52%							
60	Information	Umlauf-Einsatzplanung	11258	1064445	0.66%	1.05%	1.23%	3.24%	6.30%	7.08%	1.80%	5.66%	5.94%							
25	Infrastruktur	Anlagen Leit- und Sicherungstechnik	19477	202107	3.86%	4.16%	5.67%	2.17%	0.65%	2.26%	3.11%	1.07%	3.29%							
59	Betrieb	Sonstige verkehrliche Gründe EVU	19040	142298	1.28%	0.58%	1.40%	5.27%	0.78%	5.33%	3.04%	0.76%	3.13%							
64	Fahrzeug	Triebabzeuge	15811	323351	3.25%	5.41%	6.32%	1.60%	1.21%	2.01%	2.52%	1.72%	3.05%							
30	Infrastruktur	Mängelangsamfahrstelle	16058	70641	0.71%	0.29%	0.77%	4.91%	0.39%	4.92%	2.56%	0.38%	2.59%							
70	Betrieb	Nächstes EVU	3540	456553	0.18%	0.15%	0.23%	1.05%	2.74%	2.94%	0.57%	2.43%	2.49%							
10	Information	Fahrplanelstellung (Vertrieb)	14857	122825	3.09%	1.72%	3.54%	1.46%	0.51%	1.55%	2.37%	0.65%	2.46%							
71	Betrieb	Vorheriges EVU	4916	344752	0.62%	0.37%	0.72%	1.00%	2.03%	2.27%	0.79%	1.83%	1.99%							
85	Betrieb	Fremdeinwirkung	10537	157539	2.26%	3.54%	4.20%	0.96%	0.47%	1.06%	1.68%	0.84%	1.88%							
68	Personal	Technisches Personal EVU	4734	315999	0.27%	0.39%	0.48%	1.37%	1.86%	2.31%	0.76%	1.68%	1.84%							
23	Infrastruktur	Fahrbahn	9859	82245	1.54%	1.10%	1.89%	1.62%	0.35%	1.66%	1.57%	0.44%	1.63%							
90	Betrieb	Gefährliche Ereignisse	6120	229149	1.13%	3.40%	3.58%	0.79%	0.92%	1.21%	0.98%	1.22%	1.56%							
24	Infrastruktur	Bahnübergangssicherungsanlagen	9480	60465	1.97%	1.49%	2.47%	0.93%	0.16%	0.94%	1.51%	0.32%	1.54%							
82	Betrieb	Witterung	8596	124858	1.96%	2.48%	3.16%	0.63%	0.41%	0.75%	1.37%	0.66%	1.52%							
84	Betrieb	Behörden	8359	60037	1.48%	1.52%	2.12%	1.15%	0.15%	1.16%	1.33%	0.32%	1.37%							
52	Betrieb	Ladearbeiten	2019	201751	0.04%	0.03%	0.05%	0.68%	1.22%	1.40%	0.32%	1.07%	1.12%							
32	Infrastruktur	Unregelmäßigkeiten bei Bauarbeiten	6399	63690	1.21%	1.16%	1.68%	0.78%	0.22%	0.81%	1.02%	0.34%	1.08%							
40	Infrastruktur	Nächster EIU	2605	186375	0.29%	0.19%	0.35%	0.58%	1.10%	1.24%	0.42%	0.99%	1.07%							

DB: Codes der Internetmessungen mit Rechenquantilen (05/2011 – 04/2012 1x monatlich)

Gründe	n	Häufigkeit in %	Verspätung in min	Verspätungsanteil	Distance in %	Mittelwert in min	Quantil 90	Quantil 80	Quantil 66.7	Quantil 50
Anhängen von zusätzlichen Wagen	14	0.12%	70	0.03%	0.13%	5.0	16.5	13.0	10.5	8.5
ärztliche Versorgung eines Fahrgastes	72	0.63%	1075	0.46%	0.78%	14.9	39.4	29.0	21.4	15.3
Ausgebrochene Tiere im Gleis	1	0.01%	20	0.01%	0.01%	20.0	51.1	37.2	27.0	18.9
außerplanmäßige Geschwindigkeitsbeschränkung	68	0.59%	860	0.37%	0.70%	12.6	34.1	25.4	18.9	13.8
Bauarbeiten	841	7.36%	10755	4.60%	8.68%	12.8	34.4	25.6	19.1	13.9
Beeinträchtigung durch Vandalismus	702	6.14%	22335	9.55%	11.36%	31.8	78.3	56.2	40.0	27.1
Betätigen der Nöbremse	13	0.11%	145	0.06%	0.13%	11.2	30.7	23.0	17.3	12.7
Entschärfung einer Fliegerbombe	254	2.22%	6460	2.76%	3.55%	25.4	63.6	45.9	33.0	22.6
Feuerwehreinatz auf Bahngelände	29	0.25%	460	0.20%	0.32%	15.9	41.5	30.5	22.4	16.0
Feuerwehreinatz neben der Strecke	6	0.05%	135	0.06%	0.08%	22.5	56.8	41.2	29.7	20.6
Gegenstände im Gleis	50	0.44%	1255	0.54%	0.69%	25.1	62.8	45.4	32.6	22.4
keine	1159	10.14%	17221	7.37%	12.53%	14.9	39.2	28.9	21.3	15.3
Notarzteinsatz am Gleis	307	2.69%	12405	5.31%	5.95%	40.4	98.0	70.0	49.4	33.0
Oberleitungsstörung	95	0.83%	2215	0.95%	1.26%	23.3	58.7	42.5	30.6	21.2
Pass- und Zollkontrolle	1	0.01%	15	0.01%	0.01%	15.0	39.5	29.1	21.5	15.4
Personen im Gleis	305	2.67%	7550	3.23%	4.19%	15.0	39.5	29.1	21.5	15.4
Polizeiliche Ermittlung	52	0.45%	1000	0.43%	0.62%	19.2	49.3	36.0	26.1	18.3
Signalstörung	423	3.70%	7380	3.16%	4.86%	17.4	45.2	33.1	24.2	17.1
Stellwerksstörung /-ausfall	291	2.55%	7465	3.19%	4.08%	25.7	64.1	46.3	33.2	22.8
Störung an einem Bahnübergang	87	0.76%	1140	0.49%	0.90%	13.1	35.2	26.1	19.4	14.1
Streckensperrung	392	3.43%	10255	4.39%	5.57%	26.2	65.2	47.1	33.8	23.1
technische Störung am Zug	1329	11.63%	30925	13.23%	17.61%	23.3	58.6	42.5	30.6	21.1
technische Störung an der Strecke	562	4.92%	10685	4.57%	6.71%	19.0	48.8	35.6	25.9	18.2
Tiere im Gleis	6	0.05%	320	0.14%	0.15%	53.3	127.8	90.8	63.6	42.0
Überholung	62	0.54%	1230	0.53%	0.76%	19.8	50.7	36.9	26.8	18.8
umgestürzter Baum im Gleis	17	0.15%	395	0.17%	0.23%	23.2	58.5	42.4	30.5	21.1
Unfall an einem Bahnübergang	97	0.85%	5510	2.36%	2.51%	56.8	135.8	96.4	67.5	44.4
Unwetter	314	2.75%	21225	9.08%	9.49%	67.6	160.6	113.8	79.3	51.9
verspätete Bereitstellung	254	2.22%	4090	1.75%	2.83%	16.1	42.1	30.9	22.7	16.2
Verspätung aus vorheriger Fahrt	643	5.63%	8690	3.72%	6.74%	13.5	36.1	26.8	19.9	14.4
Verspätung eines vorausfahrenden Zuges	1319	11.54%	12270	5.25%	12.68%	9.3	26.4	20.0	15.2	11.4
Verspätung im Ausland	281	2.46%	4810	2.06%	3.21%	17.1	44.4	32.5	23.8	16.9
Verzögerung beim Ein-/Ausstieg	48	0.42%	500	0.21%	0.47%	10.4	29.0	21.8	16.5	12.2
Verzögerungen im Betriebsablauf	658	5.76%	9550	4.09%	7.06%	14.5	38.4	28.4	21.0	15.1
Warten auf einen entgegenkommenden Zug	67	0.59%	905	0.39%	0.70%	13.5	36.1	26.7	19.9	14.4
Warten auf Fahrgäste aus einem anderen Zug	252	2.20%	2565	1.10%	2.46%	10.2	28.4	21.4	16.2	12.1
Warten auf freie Einfahrt	62	0.54%	1105	0.47%	0.72%	17.8	46.0	33.7	24.6	17.4
Warten auf verspätete Zugteile	141	1.23%	3430	1.47%	1.92%	24.3	61.0	44.2	31.7	21.9
Witterungsbedingte Störung	156	1.36%	5345	2.29%	2.66%	34.3	83.9	60.1	42.7	28.7

BLS: ErZu-Codeliste mit absteigender Distance (2010er Daten)

ErZu-Code	Anzahl	Prim	Sek	Total	Häufigkeit	Ausmass	Distance
12 Triebfahrzeugstörung	1188	13730	26186	39916	14.79%	17.24%	22.72%
1 Lokpersonal	1162	21806	4547	26353	14.47%	11.38%	18.41%
3 Traktionswechsel Lok / Pendel	916	16541	5427	21968	11.41%	9.49%	14.84%
4 Zugbildung	585	16062	5863	21925	7.29%	9.47%	11.95%
61 Sicherungsanlagen	645	3445	15247	18692	8.03%	8.07%	11.39%
88 Geplante Baustellen	590	184	18184	18368	7.35%	7.93%	10.81%
13 Wagenstörung	546	10222	8162	18384	6.80%	7.94%	10.45%
41 Kunden der EVU	502	5192	4074	9266	6.25%	4.00%	7.42%
2 Einsatz Rollmaterial Lok / Pendel fehlt	418	8929	2605	11534	5.21%	4.98%	7.20%
5 Unregelmässigkeiten am Wagen / Ladegut	248	11508	1782	13290	3.09%	5.74%	6.52%
47 Anschluss von andern ISB oder aus Transportkette	340	1523	1480	3003	4.23%	1.30%	4.43%
89 Übriges Externes / Verschiedenes	145	483	2534	3017	1.81%	1.30%	2.23%
51 Disposition OBZ, FstZ, BZ/CE, RB, AVOR	90	535	1155	1690	1.12%	0.73%	1.34%
49 Übrige Verspätungen Betrieb	78	1108	890	1998	0.97%	0.86%	1.30%
62 Fahrleitung	27	313	2345	2658	0.34%	1.15%	1.20%
63 Fahrbahn	49	135	1964	2099	0.61%	0.91%	1.09%
64 Strecken- und Gleisfreigabe	34	103	1889	1992	0.42%	0.86%	0.96%
9 Übriges Rollmaterial / Fahrzeugtechnik	55	738	618	1356	0.68%	0.59%	0.90%
83 Witterungseinflüsse Rollmaterial	38	451	1317	1768	0.47%	0.76%	0.90%
81 Personenunfälle	12	288	1546	1834	0.15%	0.79%	0.81%
91 Abnormale Witterungs- und Umwelteinflüsse SA	20	98	1228	1326	0.25%	0.57%	0.62%
82 Ereignisse mit Strassenfahrzeugen	26	108	886	994	0.32%	0.43%	0.54%
35 Events / Doppelführungen	27	70	851	921	0.34%	0.40%	0.52%
90 Fehlmeldungen	19	26	867	893	0.24%	0.39%	0.45%
23 Handicap	31	112	251	363	0.39%	0.16%	0.42%
40 Verspätungen ab anderen ISB (Inland und Ausland)	24	138	291	429	0.30%	0.19%	0.35%
7 Probe- und Versuchszüge	17	249	374	623	0.21%	0.27%	0.34%
85 Entgleisung / Kollision	5	70	667	737	0.06%	0.32%	0.32%
31 Zugpersonal	21	87	247	334	0.26%	0.14%	0.30%
42 Blaulichtorganisationen / Zoll / Bapo	21	111	71	182	0.26%	0.08%	0.27%
34 Spezielle Kundenmassnahmen EVU	17	252	58	310	0.21%	0.13%	0.25%
65 Störungen an Detektionsanlagen	15	280	9	289	0.19%	0.12%	0.22%
45 Verspätungen durch übergebende EVU	16	44	157	201	0.20%	0.09%	0.22%
84 Naturereignisse	11	21	350	371	0.14%	0.16%	0.21%
54 Gleis freilegen	15	125	48	173	0.19%	0.07%	0.20%
92 Abnormale Witterungs- und Umwelteinflüsse FL	6	19	398	417	0.07%	0.18%	0.19%
6 Disposition Lokpersonal	9	155	157	312	0.11%	0.13%	0.18%
52 BLZ / TG-OP, Betrano	10	51	171	222	0.12%	0.10%	0.16%
66 Zugbeeinflussung	10	63	139	202	0.12%	0.09%	0.15%
46 Annahme anderer ISB (Inland und Ausland)	2	8	311	319	0.02%	0.14%	0.14%
44 Störung an IT-Systemen EVU	6	195	36	231	0.07%	0.10%	0.12%
59 Übriges BF	6	17	127	144	0.07%	0.06%	0.10%
76 Planung Jahresfahrplan >48 h	6	37	57	94	0.07%	0.04%	0.09%
93 Abnormale Witterungs- und Umwelteinflüsse FB	5	20	45	65	0.06%	0.03%	0.07%
71 Kommunikationseinrichtungen	3	0	83	83	0.04%	0.04%	0.05%
69 Übriges IH / Fahrweg	3	11	23	34	0.04%	0.01%	0.04%
99 Unbekannt	2	28	17	45	0.02%	0.02%	0.03%
8 Unterhalt Rollmaterial	1	32	0	32	0.01%	0.01%	0.02%
79 Planungsmängel Intervalle, Langsamfahrstellen	1	0	20	20	0.01%	0.01%	0.02%
33 Disposition Zugpersonal	1	16	0	16	0.01%	0.01%	0.01%
14 Sicherheitsaspekte Rollmaterial	1	3	10	13	0.01%	0.01%	0.01%
22 Bahncatering	1	5	8	13	0.01%	0.01%	0.01%
24 Veloselbstverlad	1	3	10	13	0.01%	0.01%	0.01%
48 Verspätung durch übernehmende EVU	1	3	3	6	0.01%	0.00%	0.01%
94 Witterungs- und Umwelteinflüsse Strecken- und Gleisfreigabe	1	4	0	4	0.01%	0.00%	0.01%
73 Stromversorgung SA / TC	1	3	0	3	0.01%	0.00%	0.01%
Summe:	8030	115760	115785	231545			

CBC: Codierung der Felddaten mit Ursachen und meistverbreiteten Massnahmen

Ursache	Fahrzeug	Infrastruktur	Betrieb	Personal	Information
Bremssystem		Ausfall LSA	Anschlussgewährung	verspäteter Dienstantritt	Befehlsübermittlung
Drehgestell		Autoreifen	Fahrausweiskontrolle		Fahrt auf Befehl
Entgleisung		Bauarbeiten	Fahrgast		falscher Tagtyp
Fahrscheinautomat		Blockade	Folgeverspätung		verspätete Fertigmeldung
Fahrzeug defekt/Fahrzeugstörung		Blockstörung	Wildunfall		
Fahrzeugüberhitzung		Entgleisung fremd			
Fahrzeugaustausch		ESTW			
Feuer		Fahrstrom			
hohes Fahrgastaufkommen		Folgeverspätung			
Kühlwasserprobleme		Kabelstörung			
Laufdrehgestell		Lokschaden fremd			
Licht		Person im Gleis			
Lokschaden		Personenunfall			
Motor		Schnee/Schneefall			
Schiebetrtritt		SEV			
Tanken		Störung Bahnhof			
Tür		Verkehrsstörung, Verkehrsunfall			
Umrichter		Verspätung (Innenstadt)			
Vandalismus		Weiche			
		Witterung			
		Zugfolge			
		Zusammenprall			
Massnahme	Fahrzeugaustausch	Umleitung	Verspätung	[Personaltausch]	Kurstauch
		Verlegung Zugkreuzung	Teilausfall/Kurzwende		
			Ausfall		
			Schienerersatzverkehr		
			Inselbetrieb		

CBC: Störungen mit Distance und Variationskoeffizient (2009er Daten)

URSACHE	Kriterium	Anzahl	Häufigkeit	Ausmass	Distance	Mittelwert Dauer	Standardabweichung Dauer	VX
Komponente	Anschlussgewährung	50	6.64%	4.20%	7.86%	00:06	00:05	0.84
	Ausfall LZA	1	0.13%	0.16%	0.21%	00:13	-	-
	Autoreifen	1	0.13%	0.16%	0.21%	00:13	-	-
	Bauarbeiten	4	0.53%	1.47%	1.56%	00:29	00:04	0.14
	Befehlsübermittlung, Befehlsfahrt	6	0.80%	0.28%	0.84%	00:03	00:00	0.22
	Blockade	17	2.26%	2.42%	3.31%	00:11	00:12	1.08
	Blockstörung	3	0.40%	0.19%	0.44%	00:05	00:03	0.60
	Bremssystem	3	0.40%	0.94%	1.02%	00:24	00:16	0.66
	Drehgestell	1	0.13%	0.03%	0.14%	00:02	-	-
	Entgleisung	16	2.12%	1.60%	2.66%	00:07	00:04	0.63
	Entgleisung fremd	1	0.13%	0.32%	0.34%	00:25	-	-
	ESTW	29	3.85%	6.75%	7.77%	00:18	00:14	0.79
	Fahrausweiskontrolle	4	0.53%	0.37%	0.65%	00:07	00:05	0.72
	Fahrgast	7	0.93%	0.99%	1.36%	00:11	00:07	0.66
	Fahrscheinautomat	2	0.27%	0.15%	0.31%	00:06	00:02	0.47
	Fahrstrom	13	1.73%	2.48%	3.02%	00:15	00:09	0.64
	Fahrzeugstörung	59	7.84%	12.80%	15.01%	00:17	00:16	0.98
	Fahrzeugaustausch	3	0.40%	0.23%	0.46%	00:06	00:02	0.44
	Fahrzeugüberhitzung	1	0.13%	0.06%	0.15%	00:05	-	-
	falscher Tagtyp	1	0.13%	0.10%	0.17%	00:08	-	-
	Feuer	5	0.66%	2.63%	2.72%	00:41	00:25	0.61
	Folgeverspätung	169	22.44%	13.13%	26.00%	00:06	00:04	0.76
	hohes Fahrgastaufkommen	4	0.53%	0.22%	0.57%	00:04	00:01	0.40
	Kabelstörung	5	0.66%	0.37%	0.76%	00:05	00:04	0.77
	Kühlwasserprobleme	2	0.27%	0.13%	0.29%	00:05	00:00	0.00
	Laufdrehgestell	1	0.13%	0.00%	0.13%	00:00	-	-
	Licht	6	0.80%	0.38%	0.88%	00:05	00:04	0.86
	Lokschaden	19	2.52%	2.74%	3.72%	00:11	00:07	0.67
	Motor	19	2.52%	1.85%	3.13%	00:07	00:03	0.51
	Person im Gleis	1	0.13%	0.13%	0.18%	00:10	-	-
	Personal	2	0.27%	3.04%	3.05%	02:00	00:00	0.00
	Personenunfall	11	1.46%	2.91%	3.26%	00:20	00:15	0.75
	Schiebetrtritt	1	0.13%	0.04%	0.14%	00:03	-	-
	Schnee, Schneefall	13	1.73%	1.96%	2.61%	00:11	00:06	0.51
	SEV	38	5.05%	6.72%	8.41%	00:13	00:05	0.41
	Störung Bahnhof	9	1.20%	1.30%	1.77%	00:11	00:10	0.91
	Tanken	1	0.13%	0.18%	0.22%	00:14	-	-
	Tür	16	2.12%	3.13%	3.78%	00:15	00:19	1.26
	Umrichter	2	0.27%	0.03%	0.27%	00:01	00:01	1.41
	Vandalismus	2	0.27%	0.37%	0.45%	00:14	00:16	1.12
	Verkehrsstörung, Verspätung	53	7.04%	8.94%	11.38%	00:13	00:12	0.94
	verspätete Fertigmeldung	1	0.13%	0.05%	0.14%	00:04	-	-
	Weiche	29	3.85%	6.33%	7.41%	00:17	00:18	1.10
	Wildunfall	3	0.40%	0.27%	0.48%	00:07	00:06	0.87
	Witterung	2	0.27%	0.15%	0.31%	00:06	00:01	0.24
	Zugfolge	64	8.50%	4.47%	9.60%	00:05	00:02	0.48
	Zusammenprall	8	1.06%	2.85%	3.04%	00:28	00:12	0.46

DVB: Codeliste mit Ressourcenzuordnung und absteigender Distance bezüglich Störungsdauer, ausserdem Distance der betrieblichen Ausfalldauer:

Ressource	Code	Ereignisart	Störungsanzahl und -dauer			Störungsanzahl und Ausfalldauer		
			Häufigkeit	Ausmaß	Distance	Häufigkeit	A-Dauer	Distance
Infrastruktur	26	Störungen durch fremde Fahrzeuge	1.12%	30.53%	30.55%	1.12%	0.55%	1.25%
Betrieb	1	Sprechwunsch	20.00%	0.01%	20.00%	20.00%	1.02%	20.03%
Betrieb	37	Überschreiten Restwendezeit	16.37%	0.00%	16.37%	16.37%	21.58%	27.08%
Fahrzeug	6	Zusammenstoß mit <= 13 TEURO Sachschaden	0.42%	16.03%	16.04%	0.42%	16.32%	16.32%
Infrastruktur	23	Signalstörung	0.33%	13.01%	13.02%	0.33%	0.05%	0.33%
Information	57	andauernde Verfrühung	12.47%	0.00%	12.47%	12.47%	0.00%	12.47%
Infrastruktur	14	Weichenschaden mechanisch	0.47%	9.61%	9.63%	0.47%	0.07%	0.48%
Betrieb	38	Überschreiten Abfahrtszeit, obwohl Anmeldung	9.27%	0.00%	9.27%	9.27%	0.72%	9.29%
Infrastruktur	33	Verlassen der Route	8.24%	0.00%	8.24%	8.24%	7.80%	11.35%
Information	58	Anschluss gefährdet	6.96%	0.00%	6.96%	6.96%	0.00%	6.96%
Fahrzeug	9	Wagenschaden ohne Ausfall	6.74%	1.59%	6.92%	6.74%	0.92%	6.80%
Fahrzeug	8	Wagenschaden mit Ausfall	0.64%	6.06%	6.09%	0.64%	0.00%	0.64%
Betrieb	4	Personenschaden mit < 5 Leichtverletzten	0.18%	5.53%	5.53%	0.18%	5.96%	5.97%
Betrieb	24	Störung des Verkehrsflusses durch Fremde	0.13%	3.90%	3.90%	0.13%	0.56%	0.58%
Infrastruktur	60	Lichtzeichenanlagen-Störung	3.26%	1.21%	3.48%	3.26%	0.00%	3.26%
Betrieb	27	Besondere Vorkommnisse	0.63%	2.52%	2.60%	0.63%	6.86%	6.89%
Information	59	Anschluss verlassen	1.92%	0.00%	1.92%	1.92%	0.00%	1.92%
Betrieb	22	Randale im Verkehrsmittel	0.23%	1.87%	1.89%	0.23%	2.79%	2.80%
Information	35	Anschlußvermittlung/ALITA	1.70%	0.00%	1.70%	1.70%	0.00%	1.70%
Infrastruktur	16	Straßenglätte	0.05%	1.41%	1.41%	0.05%	0.36%	0.36%
Betrieb	65	Besetztgrad	1.31%	0.00%	1.31%	1.31%	0.00%	1.31%
Betrieb	64	Fundsache	1.23%	0.00%	1.23%	1.23%	0.00%	1.23%
Betrieb	45	Randale mit Videoüberwachung	0.14%	1.09%	1.09%	0.14%	1.79%	1.80%
Information	48	keine Anmeldung bzgl. Sollfahrplan	1.07%	0.00%	1.07%	1.07%	0.48%	1.17%
Infrastruktur	19	Fahrleitungsschaden	0.15%	0.97%	0.98%	0.15%	0.14%	0.21%
Personal	43	Personalmangel	0.87%	0.18%	0.89%	0.87%	0.00%	0.87%
Infrastruktur	15	Weichenschaden elektrisch	0.78%	0.23%	0.82%	0.78%	0.00%	0.78%
Infrastruktur	10	Entgleisung	0.02%	0.75%	0.75%	0.02%	0.44%	0.44%
Infrastruktur	18	Stromstörung	0.02%	0.60%	0.60%	0.02%	0.07%	0.07%
Betrieb	63	Ersatzverkehr	0.55%	0.01%	0.55%	0.55%	0.00%	0.55%
Fahrzeug	51	Brand	0.03%	0.51%	0.51%	0.03%	0.00%	0.03%
Fahrzeug	7	Zusammenstoß mit > 13 TEURO Sachschaden	0.01%	0.51%	0.51%	0.01%	0.38%	0.38%
Infrastruktur	25	Störungen durch fremde Anlagen	0.06%	0.49%	0.49%	0.06%	0.00%	0.06%
Betrieb	2	Notruf	0.39%	0.14%	0.42%	0.39%	0.06%	0.40%
Infrastruktur	11	Stau	0.40%	0.06%	0.40%	0.40%	28.67%	28.68%
Personal	50	keine Ablösung	0.34%	0.04%	0.34%	0.34%	0.43%	0.55%
Infrastruktur	13	Gleisschaden	0.13%	0.27%	0.30%	0.13%	0.00%	0.13%
Betrieb	3	Überfallruf	0.30%	0.00%	0.30%	0.30%	0.00%	0.30%
Infrastruktur	28	nichtgenehmigte Bauarbeiten	0.02%	0.27%	0.27%	0.02%	0.00%	0.02%
Personal	66	Fahrerdisposition	0.25%	0.00%	0.25%	0.25%	0.12%	0.27%
Betrieb	5	Personenschaden mit > 5 Leichtverletzten	0.00%	0.18%	0.18%	0.00%	0.23%	0.23%
Information	34	keine Anschlußfahrt (Umlauf)	0.16%	0.00%	0.16%	0.16%	0.00%	0.16%
Fahrzeug	44	Fahrzeugmangel	0.05%	0.14%	0.15%	0.05%	1.51%	1.51%
Infrastruktur	29	Schäden an Haltestellen	0.10%	0.10%	0.14%	0.10%	0.00%	0.10%
Betrieb	47	?	0.10%	0.08%	0.13%	0.10%	0.00%	0.10%
Infrastruktur	32	Schäden an Endpunktojekten	0.11%	0.00%	0.11%	0.11%	0.00%	0.11%
Information	49	Anmeldung Dienstfahrt/OP-Zug	0.05%	0.06%	0.08%	0.05%	0.06%	0.08%
Information	31	Schäden an Fahrgastunterständen	0.07%	0.00%	0.07%	0.07%	0.00%	0.07%
Infrastruktur	12	Wasseransammlung/Hochwasser	0.01%	0.04%	0.05%	0.01%	0.00%	0.01%
Information	41	RBL-Systemstörung	0.04%	0.00%	0.04%	0.04%	0.00%	0.04%
Information	30	Schäden an stationären Fahrkartenautomaten	0.03%	0.00%	0.03%	0.03%	0.00%	0.03%
Infrastruktur	40	DFI-Ausfall (Knotenrechner, Anzeiger) oder OK	0.03%	0.00%	0.03%	0.03%	0.00%	0.03%
Betrieb	69	?	0.03%	0.00%	0.03%	0.03%	0.00%	0.03%
Information	39	falscher Tagesfahrplan	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.04%	0.05%
Betrieb	62	unbenutzt	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%
Infrastruktur	17	Ölspur/Ölhavarien	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%
Information	36	Anmeldung L/K unklar	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Betrieb	42	?	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Infrastruktur	56	Störung CargoTram	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Information	61	Anschlußantrag durch IVP	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Betrieb	68	?	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Betrieb	73	?	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

SVZ: Codeliste mit Ressourcenzuordnung und absteigender Distance („Winter“ auf Ausmass 0 gesetzt – sonst dominant; Daten 2009 – 2011)

Komponente	Mittelwert	Standardabweichung	Häufigkeit	Ausmaß	Distance
Defekt allgemein	38	19	24.15%	21.99%	32.66%
VKU Strab	54	37	15.17%	19.58%	24.77%
Blockade	43	29	15.60%	16.02%	22.36%
VKU fremd	47	27	6.41%	7.20%	9.64%
FSB	41	23	6.84%	6.66%	9.55%
Weiche	31	22	5.77%	4.25%	7.16%
Tür	37	22	4.27%	3.75%	5.68%
Fahrgast	36	24	3.63%	3.16%	4.82%
Motor	38	16	2.99%	2.69%	4.02%
Vandalismus	37	16	2.78%	2.43%	3.69%
Stromausfall	48	29	1.28%	1.46%	1.94%
Pantograf	59	41	1.07%	1.50%	1.85%
Sperrung	104	22	0.64%	1.60%	1.73%
Sand	28	8	1.28%	0.87%	1.55%
Bremse	36	11	0.85%	0.74%	1.13%
Drehgestell	34	21	0.85%	0.70%	1.11%
Winter	10944	6326	1.07%	0.00%	1.07%
Schnittstelle	50	13	0.64%	0.77%	1.00%

Anhang 7: Detaillierte Übersicht zur Prognosegenauigkeit

Vollbahn betrieblich: Kennwerte und Prognose der Störungsklassen über 5 % Distance

Art	Resource	Code	Codbeschreibung	Anzahl		Distance	Messwerte			Stichprobe	Messquantile			Rechenquantile			Fehler bei Berechnung (UC)															
				Min	Max		Spw.	StdAbw	Mittel		VX	ser.	Std	Q	0.50	0.67	0.80	0.90	0.50	0.67	0.80	0.90										
Vollbahn, E/Zu 2009, SBB	Einbaub.	45	Verspannung & Vordahn	27871	23,71%	0	990	106	52,2	35,7	1,46	0,0295	3	0,74	16	31	55	91	25,8	39,6	47,5	55,7	76,3	9,8	8,6	0,3	-14,7					
	Fahrzeug	12	Fahrleitung	1110	12,45%	0	106	100	106	52,2	35,7	1,46	0,0295	3	0,74	16	31	55	91	25,8	39,6	47,5	55,7	76,3	9,8	8,6	0,3	-14,7				
	Fahrzeug	12	Trieblfahrzeugelekt	13494	12,28%	0	381	381	17,9	12,1	5,7	2,05	0,4727	3	0,68	6	9	17	32	43	43	62	82	47	3,3	3,3	-10,8					
	Personal	13	Wegendiekt	8929	8,42%	0	534	534	22,1	10,2	11,1	1,83	0,0381	3	0,71	1183	31	6	8	12	20	10,5	11,3	12,2	14,8	18,7	2,0	3,3	2,8	-3,1		
	Infrastruktur	69	Lokpersonal	9792	9,35%	-30	592	612	31,8	16,6	1,92	0,1515	3	0,69	1410	6	10	15	10,5	15,1	15,1	15,1	20,4	27,0	5,1	7,1	5,4	6,0				
	Infrastruktur	69	Übriges FV	165	7,64%	0	294	294	24,0	7,9	3,04	0,2303	3	0,61	3546	4	5	7	6,6	6,8	6,8	6,8	11,8	15	2,8	2,7	1,8	-1,3				
	Information	88	Sicherungsanlagen	6167	7,20%	-10	129	139	6,8	5,6	1,1	0,1617	3	0,77	586	4	6	8	5,3	7,0	8,3	8,7	10,5	13	0,7	0,7	0,7	0,3				
	Information	88	Baustellen	1794	6,98%	0	37	37	1,1	0,1	1,00	0,0841	3	0,50	4843	4	6	8	5,3	7,0	8,3	8,7	10,5	13	0,7	0,7	0,7	0,3				
Vollbahn, E/Zu 2010, SBB	Einbaub.	45	Versp durch Übergabe	1047	6,17%	0	47	47	2,6	2,6	0,4	0,0171	3	0,73	144	4	6	8	5,3	7,0	8,3	8,7	10,5	13	0,7	0,7	0,7	0,3				
	Fahrzeug	12	Kunden der EVU	7820	6,78%	0	342	342	22,2	12,5	1,78	0,1937	3	0,71	1212	5	8	16	31	63	123	13,8	17,0	21,6	3,3	4,4	1,6	-8,4				
	Personal	89	Übriges Externe / Verschiedenes	2208	6,24%	0	320	320	10,8	2,30	0,1392	3	0,66	2026	5	8	16	10,5	15,1	15,1	15,1	20,4	27,0	5,1	7,1	5,4	6,0					
	Infrastruktur	83	Entlassung / Kallision	54	5,96%	0	94	94	17,5	6,6	2,65	0,7500	3	0,63	2701	4	6	10	26	51	77	10,5	12,2	14,1	1,7	0,1	-13,6					
	Fahrzeug	45	Witeneinflüsse Zugführung	417	5,35%	0	134	134	14,4	7,9	2,62	0,1489	3	0,68	1576	4	6	10	22	41	6,4	8,5	2,5	3,3	4,1	1,5	2,5	4,4	-5,9			
	Fahrzeug	45	Versp durch Übergabe EVU	30864	55,59%	0	9215	9215	88,5	45,1	1,96	0,0167	3	0,68	1479	19	37	63	110	33,7	52,1	54,5	74,1	103,9	14,7	15,1	1,1	-3,1				
	Personal	12	Trieblfahrzeugleitung	12007	10,78%	0	469	469	18,8	10,9	1,72	0,1147	3	0,71	1143	6	9	13	22	8,3	11,8	12,9	15,6	19,8	2,3	2,8	2,2	0,2				
	Personal	2	Einsatz Rollmaterial	6560	10,55%	0	700	700	59,0	38,0	1,51	0,0137	3	0,73	879	11	22	35	58	29,0	44,7	52,8	67,2	87,8	9,0	12,7	12,2	1,8				
Vollbahn, E/Zu 2010, BLS	Einbaub.	45	Umschlag	8992	10,51%	-2	651	653	44,6	25,7	1,01	0,0611	3	0,71	1157	11	22	35	58	29,0	44,7	52,8	67,2	87,8	9,0	12,7	12,2	1,8				
	Fahrzeug	41	Kunden der EVU	6284	9,72%	0	722	722	33,6	16,9	1,78	0,0333	3	0,71	1214	17	14	27	46	14,9	22,1	24,1	28,9	35,5	4,9	8,1	3,5	-8,9				
	Information	13	Zugführung	7888	7,48%	0	452	452	20,5	13,8	1,83	0,0468	3	0,70	1383	6	9	16	31	11,3	16,5	17,6	22,3	29,5	5,4	7,5	6,3	-1,3				
	Information	88	Cedante Baustellen	9097	7,37%	0	78	78	2,0	0,2	1,00	0,0820	3	0,50	38416	4	6	7	0	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	2,6	2,3	3,0	3,0	2,6	2,3	3,0	3,0
	Information	88	Sicherungsanlagen	6621	5,53%	0	346	346	7,7	5,7	1,35	0,1371	3	0,75	701	4	6	7	0	5,6	7,3	8,5	9,2	11,2	1,6	1,1	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
	Fahrzeug	12	Trieblfahrzeugleitung	1188	22,72%	0	240	240	19,5	11,6	1,68	0,3123	3	0,72	1086	6	9	15	24	5,4	8,1	9,0	10,8	13,3	4,8	5,9	4,4	-10,7				
	Fahrzeug	3	Lokpersonal	1162	18,41%	0	456	456	32,3	18,8	1,72	0,0811	3	0,71	1134	6	9	15	28	13,9	20,6	22,8	28,2	37,3	4,9	6,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	
	Fahrzeug	4	Traktionswechsel Lok / Pendel	916	14,84%	0	201	201	14,8	18,1	0,82	0,0262	3	0,83	257	15	21	28	33	14,6	21,7	32,7	29,9	40,5	-0,4	0,7	3,1	7,5				
Vollbahn, YU 2010, DB aggregiert	Einbaub.	45	Zugbildung	585	11,95%	0	215	215	25,2	27,5	0,92	0,0513	3	0,82	323	23	29	38	59	19,4	29,5	42,8	41,0	54,9	3,6	0,6	3,0	4,1				
	Fahrzeug	61	Sicherungsanlagen	645	11,39%	0	49	49	5,1	5,3	0,96	0,4957	3	0,81	356	4	5	7	10	3,4	4,4	5,5	5,4	6,3	0,8	0,8	-1,6	-3,7				
	Information	88	Cedante Baustellen	590	10,81%	0	27	27	1,7	0,3	5,07	0,9308	3	0,53	12336	0	0	0	0	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
	Information	13	Wegendiekt	430	7,45%	0	140	140	15,3	10,3	1,73	0,1019	3	0,74	1146	5	7	10	15	10,4	12,2	13,5	15,3	18,9	3,6	4,4	3,6	-7,9				
	Fahrzeug	2	Umschlag	609	7,29%	0	430	430	15,3	10,3	1,73	0,1019	3	0,74	1146	5	7	10	15	10,4	12,2	13,5	15,3	18,9	3,6	4,4	3,6	-7,9				
	Fahrzeug	2	Einsatz Rollmaterial Lok / Pendel/Leih	418	7,20%	0	296	296	28,5	24,4	1,33	0,0253	3	0,76	681	14	20	29	41	16,9	25,4	31,5	35,3	48,1	3,4	5,4	6,3	7,1				
	Fahrzeug	5	Umschlag	2984	6,52%	0	174	174	6,2	5,7	1,09	0,0865	2	0,79	2455	4	5	7	9	5,9	8,2	10,7	10,0	14,8	7,4	10,7	12,1	8,2	8,2	8,2	8,2	
	Information	88	Umschlag	2984	6,52%	0	174	174	6,2	5,7	1,09	0,0865	2	0,79	2455	4	5	7	9	5,9	8,2	10,7	10,0	14,8	7,4	10,7	12,1	8,2	8,2	8,2	8,2	
Vollbahn, YU 2011, DB (heut. Distance PV, zzzf. Relevante)	Einbaub.	45	Umschlag	14358	50,89%	0	2037	2037	141,7	96,1	1,09	0,0043	2	0,73	950	45	74	124	235	60,2	95,5	115,5	136,7	189,9	15,2	14,9	12,7	9,3				
	Information	21	Umschlag	2903	21,92%	0	470	470	31,2	18,7	1,80	0,0180	2	0,70	1240	8	13	21	35	13,6	20,2	25,5	29,0	39,8	5,4	7,7	8,0	8,0				
	Fahrzeug	45	Umschlag	6965	12,35%	0	890	890	42,1	19,2	1,01	0,0188	2	0,67	1847	7	12	21	34	14,6	22,2	22,1	31,2	42,9	7,6	10,2	12,2	8,9				
	Information	25	Umschlag	4324	8,53%	0	2037	2037	10,5	7,2	1,46	0,0171	2	0,74	817	4	6	8	11	6,7	9,6	11,3	13,0	17,4	2,7	3,6	5,3	6,4				
	Information	14	Eingeschränkte Fahrwegverfügbarkeit	2902	8,25%	0	250	250	78,5	34,5	2,28	0,0672	2	0,66	1989	9	19	46	145	21,6	33,9	33,0	47,5	63,7	12,6	14,5	11,5	-3,3				
	Information	26	Weichenstörung	3305	7,01%	0	1690	1690	32,3	16,3	1,98	0,0154	2	0,69	1508	11	12	20	38	12,8	18,3	20,1	27,0	37,2	5,1	7,3	7,0	-3,8				
	Information	46	Abweichung von Fahrplänen	3245	6,14%	0	157	157	18,0	17,1	2,54	0,0168	2	0,64	1269	5	7	10	15	10,5	13,8	15,6	16,9	20,0	4,8	5,6	6,4	7,2				
	Information	46	Abweichung von Fahrplänen	3245	6,14%	0	157	157	18,0	17,1	2,54	0,0168	2	0,64	1269	5	7	10	15	10,5	13,8	15,6	16,9	20,0	4,8	5,6	6,4	7,2				
Vollbahn, Internet 2011/2012, DB	Einbaub.	45	Umschlag	2984	5,75%	0	174	174	6,2	5,7	1,09	0,0865	2	0,79	2455	4	5	7	9	5,9	8,2	10,7	10,0	14,8	7,4	10,7	12,1	8,2	8,2	8,2	8,2	
	Information	54	Umschlag	6033	34,13%	0	1709	1709	139,6	77,9	1,59	0,0041	2	0,70	1234	24	42	118	206	55,4	87,4	95,8	125,8	176,2	15,2	14,9	12,7	9,3				
	Information	31	Umschlag	131832	19,53%	0	1052	1052	23,8	9,2	2,78	0,0365	2	0,64	2559	3	6	10	18	7,7	11,3	10,5	15,3	20,4	4,7	5,3	5,3	4,4				
	Information	57	Umschlag	73160	13,72%	0	1421	1421	64,1	15,7	4,08	0,0177	2	0,56	6410	2	3	4	15	12,3	18,6	14,4	25,9	35,6	10,3	11,1	11,1	10,5				
	Information	50	Umschlag	54089	13,59%	0	1465	1465	85,9	26,8	3,20	0,0176	2	0,60	3938	3	5	20	61	19,7	30,0	25,5	42,9	59,4	11,2	13,2	13,2	11,8				
	Information	93	Umschlag	49727	11,60%	0	1257	1257	67,6	21,2	3,20	0,0111	2	0,60	3927	3	5	15	37	16,2	24,7	20,9	34,9	48,5	11,2	13,2	13,2	11,5				
	Information	94	Umschlag	46814	8,58%	0	395	395	4,3	4,5	0,94	0,0020	2	0,81	343	3	5	6	8	5,1	7,0	9,5	9,2	12,3	2,1	2,1	3,2	3,3				
	Information	60	Umschlag	11763	7,60%	0	1481	1481	160,1	90,1	1,78	0,0662	2	0,71	1213	35	66	118	223	54,8	87,7	96,4	124,6	169,2	15,3	15,1	12,7	9,3				
Vollbahn, Internet 2011/2012, DB	Einbaub.	45	Umschlag	24882	3,80%	0	885	885	49,1	8,2	2,83	0,0160	2	0,66	2094	4	6	9	16	7,4	10,7	10,3	14,5	19,6	2,4	2,4	2,4	2,4				
	Information	25	Umschlag	113	17,61%	0	113	113	18,9	23,3	0,81	0,05	5	0,93	354	20	30	40	50	18,9	27,6	40,5	37,3	49,3	1,1	1,1	1,1	1,1				
	Information	54																														

Vollbahn technisch/Stadtbahn: Kennwerte und Prognose der Störungsklassen über 5 % Distance

Art	Resource	Code	Codebeschreibung	Anzahl	Distance	Messwerte	StdAbw	Mittel	VX	S _{rel}	L _{rel}	Q	Stichprobe	n > n _{min}	Messquantile	Rechenquantile	Fehler bei Berechnung (UC)																
				Min	Max	Min	Max	Spw.				0,50	0,67	0,80	0,50	0,67	0,80	0,50	0,67	0,80													
Vollbahn SIP 2011, SBB (behr. Distance, techn. Dauer)	Infrastruktur	-	Lampendiagnostik	11621	23,22%	17	1741	1724	229,4	119,8	1,91	0,03	1	0,63	1408	66	32	120	181	77,1	123,4	171,0	177,1	245,5	1,1	3,4	57,1						
			Stellwerk	5909	12,82%	10	3054	3044	236,4	147,1	1,61	0,03	1	0,72	992	95	128	174	240	94,4	151,2	171,1	217,1	301,0	0,8	2,3	43,1						
			Weiche	3418	7,75%	23	1669	1646	160,4	119,8	1,34	0,03	1	0,76	689	83	108	141	199	77,1	123,4	156,1	177,1	245,4	0,9	1,4	36,1						
			Achszähler	5935	11,81%	4	2988	2964	263,0	161,4	1,63	0,03	1	0,72	1020	105	143	188	255	103,5	165,9	190,8	238,3	330,4	1,3	2,8	50,3						
			Betriebsbedingte	4432	8,85%	80	80	0	0,0	80,0	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			Gleisstromkreis	3358	8,26%	12	13018	13006	688,9	172,0	4,01	0,03	1	0,57	6165	93	119	152	197	110,2	176,7	133,6	253,7	351,8	17,3	57,7	153,7						
			KS Permanent	145	2,85%	36	7231	7195	153,6	92,8	1,63	0,03	1	0,70	1289	274	366	486	635	400,8	644,4	699,4	926,6	1255,9	13,8	42,3	104,3						
			KS Weiche	339	0,75%	39	37864	37645	7369,6	2499,7	2,85	0,03	1	0,61	3354	176	281	322	585	1592,3	2545,7	2186,2	3861,6	5982,6	24,1	72,2	133,2						
			KS Weiche	1124	6,22%	0	373	373	7,0	0,5	13,79	0,988	3	0,51	73014	0	0	0	0	2,8	2,9	2,8	2,9	3,0	2,4	2,8	3,4	3,8					
			Lampendiagnostik	5909	15,92%	0	2396	2396	71,0	13,0	5,46	0,897	3	0,53	11453	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Weiche	3418	9,73%	0	3926	3926	88,0	13,0	6,75	0,760	3	0,52	17487	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Vollbahn SIP 2011, SBB (behr. Distance, behr. Dauer)	Infrastruktur	-	Achszähler	5935	12,48%	0	798	798	23,4	4,6	5,13	0,6285	3	0,54	10102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			Gleisstromkreis	3358	8,38%	0	385	385	12,3	1,2	10,11	0,801	3	0,50	39250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			KS Permanent	145	9,27%	0	6919	6919	906,3	343,2	2,64	0,491	3	0,63	4565	17	88	210	451	31,9	102,1	85,8	167,5	228,0	1,6	4,1	8,3	13,9					
			Diverses	2203	5,71%	0	10266	10266	221,1	80,7	27,47	0,8992	3	0,50	289976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			KS Permanent	1124	5,73%	0	7771	7771	284,2	22,0	12,00	0,8911	3	0,50	55287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Art	Resource	Code	Codebeschreibung	Anzahl	Distance	Messwerte	StdAbw	Mittel	VX	S _{rel}	L _{rel}	Q	Stichprobe	n > n _{min}	Messquantile	Rechenquantile	Fehler bei Berechnung (UC)															
				Min	Max	Min	Max	Spw.				0,50	0,67	0,80	0,50	0,67	0,80	0,50	0,67	0,80												
Tram, Leitstellenjournal 2009-2011, SVZ (betriebstechnologische Dauer)	Fahrzeug	-	S 1	113	32,65%	2	96	94	19,5	38,0	0,51	0,05	5	0,85	101	36	48	58	64	38,0	46,6	63,0	74,0	54,4	8,0	1,4	3,6					
			S 2	71	24,77%	7	220	213	37,1	53,9	0,69	0,05	5	0,88	182	45	54	78	83	53,9	70,2	83,0	85,1	101,4	8,0	1,4	7,1					
			S 3	73	22,38%	3	200	197	28,5	42,9	0,67	0,05	5	0,86	170	38	45	55	75	42,9	55,4	75,9	66,9	79,5	9,0	1,4	11,9					
			S 4	30	9,64%	10	100	90	26,7	46,9	0,57	0,05	5	0,88	125	37	55	73	85	46,9	58,7	87,4	69,4	81,2	9,0	1,4	3,1					
			S 1	32	9,85%	3	125	122	23,4	40,7	0,58	0,05	5	0,87	128	40	48	55	61	40,7	51,0	75,9	60,4	70,7	9,0	1,4	15,4					
			S 1	27	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
			S 1	21	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
			S 1	21	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
			S 1	21	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
			S 1	21	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
			S 1	21	5,68%	8	25	25	21,8	30,7	0,60	0,05	5	0,87	137	27	34	44	56	21,8	30,7	44,0	56,0	80,6	7,4	1,4	10,0					
Tram, RBL 2010, DVB	Betrieb	-	1	1460	30,55%	0	1416	1416	325,7	279,2	1,17	0,03	1	0,74	523	192	312	480	769	179,3	285,3	387,0	411,3	570,5	13,7	4,2	10,0					
			26	2816	20,00%	0	192	192	1,2	0,0	163,23	0,03	1	0,50	10234945	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			37	21370	16,37%	0	0	0	0,0	0,0	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			6	547	16,04%	0	1416	1416	395,4	391,4	1,01	0,03	1	0,80	392	288	480	768	1032	249,5	400,9	579,2	576,3	789,6	43,1	7,1	25,7					
			23	425	13,02%	0	1416	1416	355,6	408,8	0,87	0,03	1	0,82	291	312	480	720	1008	260,5	418,6	646,1	601,8	835,0	21,3	4,1	11,0					
			57	16285	12,47%	0	0	0	0,0	0,0	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			14	615	9,63%	0	1416	1416	342,9	208,7	1,64	0,03	1	0,72	1037	0	192	432	768	133,5	214,3	245,4	307,8	426,9	90,3	2,2	10,0					
			38	12089	9,27%	0	0	0	0,0	0,0	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			33	10759	8,24%	0	0	0	0,0	0,0	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			58	9694	6,86%	0	1248	1248	34,1	3,1	9,00	0,00	0,03	1	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			8	840	6,08%	0	1416	1416	226,1	96,3	2,35	0,03	1	0,65	2120	0	144	408	621	993,3	95,3	142,5	197,2	261,8	351,0	1,9	1,4	4,1				
4	236	5,53%	0	1416	1416	388,1	312,7	1,08	0,03	1	0,79	449	240	384	552	840	189,5	320,5	448,8	460,6	639,0	21,1	4,1	11,0								

Nähere Ausführungen zur Prognosegenauigkeit finden sich in Kapitel 7.2.3.

Anhang 8: Formelsammlung dieser Dissertation

Abfahrts- / Ankunftsverspätung als Prognose

Bezug auf real vorausfahrenden Zug an Betriebsstelle

$$t_{v,Zug2} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ t_{v,Zug1} - t_{Zf,Fpl} + t_{Zf,Str} \end{array} \right.$$

bzw.
$$t_{v,Zug2} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ t_{v,Zug1} - t_{Abf,Zug2} + t_{Abf,Zug1} + t_{Zf,Str} \end{array} \right.$$

mit	$t_{Abf,Zug1}$	Abfahrtszeit Vorzug	in min
	$t_{Abf,Zug2}$	Abfahrtszeit Folgezug	in min
	$t_{v,Zug1}$	Verspätung des direkten Vorzuges	in min
	$t_{v,Zug2}$	Verspätung aktueller Zug	in min
	$t_{Zf,Fpl}$	Zugfolgezeit laut Fahrplan	in min
	$t_{Zf,Str}$	Streckenzugfolgezeit (Bindeglied)	in min

Beobachtungsumfang je Störungsklasse

Anzahl Störereignisse je Störungsklasse für statistisch signifikante Analysen

$$n = \max \left\{ \begin{array}{l} n_{Jahr} \\ n_{min} \end{array} \right.$$

mit	n	Beobachtungsumfang der Störungsklasse	-
	n_{Jahr}	Anzahl Störereignisse einer Störungsklasse in Jahresperiode	-
	n_{min}	minimale Ereignisanzahl der Störungsklasse	-

Distance bei klassifizierten Störungsdaten

$$d = \sqrt{\left(\frac{n}{N}\right)^2 + \left(\frac{v}{\sum v}\right)^2} \geq \varepsilon$$

mit	d	Distance (Disjunktion aus Störungshäufigkeit und –ausmass)	in %
	n	klassifizierte Störungswerte	-
	N	Grundgesamtheit der Störungswerte	-
	v	Verspätungsminuten der Störungswerte	in min
	V	Grundgesamtheit der Verspätungsminuten	in min
	ε	Betrachtungsgrenze des Störungsausmasses	in %

Fahrzeitveränderung bei Umleitungen

Gleichförmige Fahrzeitänderung

$$\Delta t = \left(\frac{s_{neu}}{v_{neu}} - \frac{s_{alt}}{v_{alt}} \right) \cdot 60$$

Bei unveränderter Geschwindigkeit resultiert daraus:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \cdot 60$$

mit	s	Streckenlänge alt/neu	in km
	Δt	Fahrzeitunterschied	in min
	v	Fahrgeschwindigkeit alt/neu	in km/h

Granularität der Verspätungskommunikation

$$t_{V,komm} = \begin{cases} 0 \text{ (... } p) \\ p \dots 5 \\ \lfloor \frac{t_V}{5} \rfloor \cdot 5 \text{ bis } \lfloor \frac{t_V}{4.9} \rfloor \cdot 5 \\ \lfloor \frac{t_V}{10} \rfloor \cdot 10 \text{ bis } \lfloor \frac{t_V}{9.9} \rfloor \cdot 10 \\ 120 \text{ bis } > 120 \end{cases} \quad \text{für} \quad \begin{cases} t_V \leq p \\ p < t_V < 5 \\ 5 < / \leq t_V < 30 \\ 30 \leq t_V < 120 \\ \geq 120 \end{cases}$$

mit	p	Pünktlichkeitsgrenze	in min
	t_V	prognostizierte Zugverspätung	in min
	$t_{V,komm}$	kommunizierte Zugverspätung	in min

Kurzwende

Streckenwende mit einem Tf

$$t_{Wende} = t_{Rüst} + \frac{l_{Zug}}{60}$$

mit	l_{Zug}	Zuglänge	in m
	$t_{Rüst}$	Auf- und Abrüstzeit Führerstand (NV: ca. 2 min, FV: ca. 4 min)	in min
	t_{Wende}	Zugwendezeit	in min

Streckenwende mit zwei Tf

$$t_{Wende} = t_{Rüst}$$

Prognosefähigkeitszahl

Ermittlung der normierten Prognosechancen

$$PFZ = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2}}{\sqrt{3}}$$

mit	K	Mass für Klassifizierung	in 0 ... 1
	P	Mass für Priorisierung	in 0 ... 1
	PFZ	Mass für Prognosefähigkeit	in 0 ... 1
	S	Mass für Standardisierung	in 0 ... 1

Prognosekennzahl

$$PKZ_t = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2 + I^2}}{\sqrt{4}}$$

$$PKZ_b = \frac{\sqrt{K^2 + P^2 + S^2 + R^2}}{\sqrt{4}}$$

mit	I	Mass für Interventionsart	in 0 ... 1
	K	Mass für Klassifizierung*	in 0 ... 1
	P	Mass für Priorisierung*	in 0 ... 1
	PKZ	Mass für Prognosesicherheit	in 0 ... 1
	R	Mass für verfügbare Ressourcen	in 0 ... 1
	S	Mass für Standardisierung*	in 0 ... 1

* gegenüber PFZ invertierte Quantifizierung beachten

Index b für betrieblich, Index t für technisch

➔ Rückschluss auf Störungsquantil Q

- Abschneiden beim Median im Interesse höherer Prognosesicherheit

$$Q_t = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ PKZ_t \end{array} \right. \quad Q_b = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ PKZ_b \end{array} \right.$$

$$Q_t = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ \frac{\sqrt{K^2+P^2+S^2+I^2}}{\sqrt{4}} \end{array} \right. \quad Q_b = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} 0.50 \\ \frac{\sqrt{K^2+P^2+S^2+R^2}}{\sqrt{4}} \end{array} \right.$$

Prognosesicherheit

$$S_{\text{grenz}} = 1 - e^{-\left(\frac{t_{\text{grenz}} - t_{\text{Erf}}}{EX_{\text{Erf}}}\right)} + S_{\text{Erf}}$$

$$z_{\text{grenz}} = \frac{t_{\text{grenz}} - EX_{\text{Erf}}}{\sigma_{\text{Erf}}} \quad \text{für technische Störungsdauer mit } VX \ll 1$$

mit	$S_{\text{grenz}} = \Phi(z_{\text{grenz}})$	
mit	EX_{Erf}	Erwartungswert (erfasster Mittelwert) der Störungsdauer in min
	S_{Erf}	Anteil erfasster Werte unter Störungserfassungsgrenze in 0 ... 1
	S_{grenz}	maximale Wahrscheinlichkeit für Erreichen der Zeitgrenze in 0 ... 1
	t_{Erf}	Störungserfassungsgrenze in min
	t_{grenz}	Zeitgrenze für abweichende Störungsbetrachtung in min
	z	Standardisierung der Normalverteilung -

Stetige Quantilberechnung

Ermittlung des relevanten Quantils (Zuordnung des Quantils zum Variationskoeffizienten)

$$Q = 0,5 \cdot e^{-0,5 \cdot VX} + 0,5$$

mit	Q	relevantes Quantil in 0 ... 1
	VX	Variationskoeffizient der Störungsklasse in 0 ... 1

Stichprobenumfang je Störungsklasse

Ermittlung des minimalen Stichprobenumfangs

$$n_{\text{min}} \geq \frac{t^2}{e_r^2} \cdot VX^2$$

mit	e_r	Abweichung von ermittelter Störungsdauer in 0 ... 1
	n_{min}	minimale Ereignisanzahl der Störungsklasse -
	t	Parameter der Studentverteilung für Irrtumswahrscheinlichkeit -
	VX	Variationskoeffizient der Störungsklasse in 0 ... 1

Störungsquantil

Unterschrittene Störungsdauer der quasi-exponentialverteilten klassifizierten Störungen

$$b_{\text{trans}} = -\ln(1 - s + S_{\text{Erf}}) \cdot EX_{\text{Erf}} + t_{\text{Erf}}$$

$$b_{\text{trans}} = z \cdot \sigma_{\text{Erf}} + EX_{\text{Erf}} \quad \text{für technische Störungsdauer mit } VX \ll 1$$

mit	$s = \Phi(z)$
-----	---------------

mit	b_{trans}	zeitliches Störungsquantil	in min
	EX_{Erf}	Erwartungswert (erfasster Mittelwert) der Störungsdauer	in min
	s	Unterschreitungssicherheit	in 0 ... 1
	s_{Erf}	Anteil erfasster Werte unter Störungserfassungsgrenze	in 0 ... 1
	t_{Erf}	Störungserfassungsgrenze	in min
	VX	Variationskoeffizient der Störungsklasse	in 0 ... 1
	z	Standardisierung der Normalverteilung	-
	σ_{Erf}	Standardabweichung (Messwert) der Störungsdauer	in min
	$\Phi(z)$	Kumulierte Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung	-

Synchronisationszeit

$$t_{\text{Warten,max}} = \min \begin{cases} 0.2 t_{\text{Takt}} \\ 10 \text{ min} \end{cases}$$

mit	t_{Takt}	Taktzeit (Streckentakt)	in min
	$t_{\text{Warten,max}}$	maximale Wartezeit	in min

Zeigersprung

Datenlage in Minuten-Auflösung

$$\Delta t = \begin{cases} t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} + 60 \\ t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} - 60 \\ t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} \end{cases} \quad \text{für} \quad \begin{cases} t_{\text{Soll}} - t_{\text{Ist}} \leq -31 \\ t_{\text{Soll}} - t_{\text{Ist}} \geq +31 \\ \text{sonst} \end{cases}$$

Randbedingungen

- Verspätungen als „plus“
- Verfrühungen als „minus“
- keine Verspätungen/Verfrühungen über ± 30 Minuten

Datenlage in Sekunden-Auflösung

$$\Delta t = \begin{cases} \left\lceil \frac{t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}}}{60} \right\rceil \\ \left\lfloor \frac{t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}}}{60} \right\rfloor \end{cases} \quad \text{für} \quad \begin{cases} t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} < 0 \\ t_{\text{Ist}} - t_{\text{Soll}} \geq 0 \end{cases}$$

mit	t_{Ist}	Istzeit	in s bzw. min
	t_{Soll}	Fahrplanzeit	in s bzw. min
	Δt	Fahrplanabweichung	in s bzw. min

Zusätzlicher Zwischenhalt

Gleichförmige Zugfahrt vs. Zugfahrt mit Zwischenhalt

$$\Delta t = t_{\text{ZwHalt}} - t_{\text{Fahrt}}$$

Wobei $t_{\text{ZwHalt}} = \frac{v_{\text{Strecke}}}{108 \cdot a_{\text{Zug}}} + t_{\text{Halt}}$

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{Zug}}}$$

Für identische positive und negative Beschleunigung gilt:

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{216 \cdot a_{\text{Zug}}} + t_{\text{Halt}}$$

Für abweichende positive und negative Beschleunigung gilt:

$$\Delta t = \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{beschl.}}} + \frac{v_{\text{Strecke}}}{432 \cdot a_{\text{brems}}} + t_{\text{Halt}}$$

mit	a_{Zug}	mittlere Zugbeschleunigung	in m/s ²
	$a_{\text{beschl.}}$	mittlere Zugbeschleunigung bei positiver Beschleunigung	in m/s ²
	a_{brems}	mittlere Zugbeschleunigung bei negativer Beschleunigung	in m/s ²
	t_{Fahrt}	Fahrzeit bei Direktfahrt	in min
	t_{Halt}	Haltzeit an Station	in min
	t_{ZwHalt}	Zeit für Abbremsen, Halten und Wiederbeschleunigen	in min
	v_{Strecke}	Streckengeschwindigkeit	in km/h
	Δt	Zeitunterschied für zusätzlichen Zwischenhalt	in min

Biografische Angaben

Persönliche Angaben

Geburtsdatum	30.12.1984
Geburtsort	Werdau
Nationalität	deutsch

Ausbildung und Berufstätigkeit

2010 – 2013	Doktorat an ETH Zürich, IVT, Bahnbetriebsforschung
2009 – 2013	Wissenschaftlicher Assistent an ETH Zürich, IVT / Verkehrssysteme
2006 – 2009	Hauptstudium in Vertiefung „Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme“ und Abschluss als Diplom-Verkehringenieur an TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
2004 – 2006	Grundstudium und Vordiplom des Verkehringenieurwesens an TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
2003 – 2004	Zivildienst in Sozialtherapeutischer Wohnstätte für chronisch psychisch Kranke in Zwickau (Volkssolidarität)
2001 – 2003	Sekundarstufe II und Abitur am Käthe-Kollwitz-Gymnasium Zwickau
1995 – 2001	Sekundarstufe I am Johann-Heinrich-Pestalozzi-Gymnasium Zwickau
1992 – 1995	Primarstufe in der Dittesgrundschule Zwickau
1991 – 1992	Polytechnische Oberschule Johann-Heinrich-Pestalozzi Zwickau

Praktische Erfahrung

2009	Diplomand bei Stadler Rail AG im Systemengineering
2008 – 2009	Studienarbeit bei Dresdner Verkehrsbetriebe AG im Center Infrastruktur
2008	Hauptseminararbeit bei Städtischen Verkehrsbetrieben Zwickau GmbH
2008 – 2009	EU-Projektmitarbeiter der Professur Verkehrsökologie an der TU Dresden
2007	Praktikum bei Stadler Rail AG im Systemengineering
2007	Praktikant und Studentischer Mitarbeiter bei Institut für Bahntechnik GmbH Niederlassung Dresden
2006	Praktikum bei City-Bahn Chemnitz GmbH
2005	Praktikum bei Usedomer Bäderbahn GmbH
2005 – 2006	Studentische Hilfskraft der Professur für Bahnverkehr, öffentlichen Stadt- und Regionalverkehr an der TU Dresden
2004 ff.	Mitgliedschaft und Mitarbeit in Deutscher Verkehrswissenschaftlicher Gesellschaft e. V., Bezirksvereinigung Sachsen
2004	Praktikum bei Städtischen Verkehrsbetrieben Zwickau GmbH
2002 – 2003	Besondere Lernleistung in Abiturstufe bei Städtischen Verkehrsbetrieben Zwickau GmbH

Bibliografie

- Ammoser, Hendrik. 2008.** Wissensspeicher Verkehrsgeschichte. Dresden/Köln : Eigenverlag, 2008.
- Anderhub, Gabriel, Dorbritz, Robert und Weidmann, Ulrich. 2008.** Leistungsfähigkeitsbestimmung öffentlicher Verkehrssysteme. Zürich : IVT-Schriftenreihe 139, 2008.
- Autorenkollektiv. 1981.** Lexikon Eisenbahn. 6. Auflage. Berlin : transpress Verlag, 1981.
- Barner, Detlef. 2010.** Betriebsmanagement bei der DB Netz AG - Pünktlichkeitssicherung in hochvertakteten Mischverkehrssystemen. Zürich : IT.Rail Zürich (Tagungsbeitrag), 2010.
- Birolini, Alessandro. 2007.** Reliability Engineering. Berlin : Springer, 5. Auflage, 2007.
- BLS AG. 2012.** Profil: Ein Kurzporträt der BLS. Bern : BLS Unternehmenskommunikation, 2012.
- CENELEC. 2010.** Maintenance - Maintenance terminology (EN 13306). Brussels : CENELEC, 2010.
- . 2012.** Railway applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) (prEN 50126-1:2012). Brussels : CENELEC, 2012.
- Chaumet, R., et al. 2007.** Verfahren zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in Evaluationen. Bern : Forschungsauftrag SVI 2002/002, 2007.
- Chu, Friederike, Wolters, Achim und Böhme, Aline. 2013.** Störfallprogramme betrieblich umsetzen. Deine Bahn. 2013, 06.
- Danowski, Kamen und Lüttjohann, Klaus. 2009.** Integrierte Mobilitäts- und Notfalleinsatzplanung in der Praxis. VAMOS-Tagung. Dresden : s.n., 2009.
- DB Mobility Logistics AG. 2012.** Mit den Länder-Tickets für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen günstig durch die Region. Frankfurt a. M. : s.n., 2012.
- DB Mobility Logistics. 2013.** Daten & Fakten 2012. Berlin : Deutsche Bahn AG, DB Mobility Logistics AG, 2013.
- DBAG-I-NPB. 2010.** KoRil 420 Kodierung der Zusatzverspätungen. Berlin : DB AG, 2010.
- Deutsches Institut für Normung. 1981.** Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen (DIN 25424-1:1981-09). Berlin : Deutsches Institut für Normung, 1981.

- Dorbritz, Robert. 2012.** Methodology for assessing the structural and operational robustness of railway networks. Zürich : ETH Zürich (Dissertation), IVT-Schriftenreihe 155, 2012.
- Engel, Rainer. 2009.** Stau auf dem Bahnsteig. Fahrgast-Magazin. 04 2009, S. 31-36.
- Engelhardt, Markus. 2009.** Lösungen zur integrierten rechnergestützten Betriebsführung von elektrotechnischen Anlagen der Bahntechnik. Dresden : HTW Dresden (Diplomarbeit), 2009.
- Europäisches Parlament, Rat. 2007.** Verordnung (EG) Nr. 1371/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Rechte und Pflichten der Fahrgäste im Eisenbahnverkehr. Luxemburg : Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2007.
- Faganini, Hans Peter. 2012.** Der öffentliche Verkehr im Spannungsfeld von gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Interessen. Bern : Litra, Gelbe Serie Nr. 30, 2012.
- Fink, Olga und Weidmann, Ulrich. 2013.** Predicting Potential Railway Operation Disruptions Caused by Critical Component Failure Using Echo State Neural Networks and Automatically Collected Diagnostic Data. Washington : TRB Washington D. C., 2013.
- Fischäder, Holm. 2007.** Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- Flier, Holger-Frederik Robert. 2011.** Optimization of Railway Operations. Zurich : ETH Zurich (Dissertation), 2011.
- Günter, Oliver. 2009.** Neue Kodierliste ab 13. Dezember 2009. BahnPraxis aktuell. 12 2009, S. 8-9.
- Haas, Rafael. 2011.** Dispositionskonzepte bei Bahnbetriebsstörungen. Zürich : ETH Zürich (Masterarbeit), 2011.
- Hermann, Udo. 1996.** Untersuchung zur Verspätungsentwicklung von Fernreisezügen auf der Datengrundlage der Rechnergestützten Zugüberwachung. Darmstadt : TU Darmstadt (Dissertation), 1996.
- Hess, Stephane, Erath, Alexander und W., Axhausen Kay. 2008.** Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit. Bern : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2008. Forschungsauftrag Nr. 2005/007.

- Hoops, Marcus, Kates, Ronald und Keller, Hartmut. 2000.** Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation. Bonn : Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), 2000.
- Hopf, Michaela. 2009.** Meldewege im Notfallmanagement. BahnPraxis aktuell. 11 2009, S. 5-7.
- Klimmt, Andreas und Hendrich, Hans-Jürgen. 2011.** Dispositionswürdigkeit von Strecken. Deine Bahn. 2011, 03.
- Knieps, Günter. 1996.** Wettbewerb in Netzen: Reformpotentiale in den Sektoren Eisenbahn und Luftverkehr. Freiburg (Breisgau) : J. C. B. Mohr (Paul Siebeck) Tübingen, 1996.
- König, Arnd, Axhausen, Kay. W. und Abay, Georg. 2004.** Zeitkostenansätze im Personenverkehr. Bern : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen, 2004. Forschungsauftrag Nr. 2001/534.
- König, Rainer. 2004/2005.** Grundlagen des Bahn- und ÖPN-Verkehrs. Dresden : TU Dresden (Vorlesung), 2004/2005.
- . 2008.** Innovative Verfahren der Betriebssteuerung. Dresden : TU Dresden (Vorlesung), 2008.
- Lübke, Dietmar und Autorenkollektiv. 2008.** Handbuch: Das System Bahn. Hamburg : DVV Media, 2008.
- Maibach, Markus, et al. 2007.** Ökonomische Auswirkungen von SBB-Betriebsstörungen. Zürich/Bern : Studie im Auftrag der SBB-Division Infrastruktur, 2007.
- Maschek, Ulrich. 2012.** Sicherung des Schienenverkehrs. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012.
- Meyer, Martin. 2007.** Logistisches Störungsmanagement in kundenverbrauchsorientierten Wertschöpfungsketten. Aachen : Shaker Verlag GmbH, 2007.
- Monecke, Lars. 2010.** Verfahren zur Behebung der betrieblichen Auswirkungen von Störungen bei Stadtbahnen. TU Braunschweig (Dissertation) : Eurail Press, 2010.
- Nachtigall, Karl. 2005.** Verkehrssystemtheorie. Dresden : TU Dresden (Vorlesung), 2005.
- Nägeli, Lorenzo. 2010.** Anwendungsvoraussetzungen für Tram-Train-Systeme und mögliche Anwendungsfälle in der Schweiz. Zürich : ETH Zürich (Masterarbeit), 2010.
- Neumann, Christian und Haas, Daniel. 2012.** Verknüpfung von Disposition und Kundeninformation. Eisenbahningenieur. 2012, 07.

- Nyström, Birre. 2008.** Aspects of Improving Punctuality. Luleå : Luleå University of Technology (Dissertation), 2008.
- Oetting, Andreas. 2013.** Entwicklung eines Konfliktassistenzsystems für die Disposition bei der DB Netz AG. Zürich : IT.Rail (Konferenzbeitrag), 2013.
- Pachl, Jörn. 2011.** Systemtechnik des Schienenverkehrs. 6. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2011.
- . **2000.** Systemtechnik des Schienenverkehrs. 1. Auflage. Leipzig : Teubner, 2000.
- Patig, Susanne. 2001.** Flexible Produktionsfeinplanung mit Hilfe von Planungsschritten. Frankfurt am Main : Peter Lang GmbH, 2001.
- Potthof, Gerhart. 1980.** Verkehrsströmungslehre, Band 1 - Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen. Berlin : transpress, 3. Auflage, 1980.
- Potthoff, Gerhart. 1979.** Die Eisenbahn. Berlin : transpress, 1979.
- REFA. 1985.** Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 4. München : Carl Hanser Verlag, 1985.
- SBB AG Kommunikation & Public Affairs. 2012.** Die SBB in Zahlen und Fakten 2011. Bern : SBB AG , 2012.
- SBB Infrastruktur - Betriebsführung Bahnproduktion BPE. 2012.** Z/C 505.2 Vorbehaltene Entschlüsse. Bern : SBB I-B-OCI-BPN, 2012.
- SBB Infrastruktur. 2010.** Codeliste ErZu. Bern : SBB I-BF-VS, 2010.
- SBB-I-B. 2012.** Schienenverkehr lenken, Prozessbeschreibung. Bern : René Fraefel, 2012.
- SBB-I-B-ROT. 2010.** Projekt Prognose Schlussbericht. Zürich : s.n., 2010.
- Schlag, Bernhard. 2005/2006.** Arbeits- und Verkehrspsychologie. Dresden : TU Dresden (Vorlesung), 2005/2006.
- Schleicher, Gert. 2011.** Informationen zu Meldekettens im Bereich Vollbahn und Stadtbahn (Interview: Schranil, Steffen). Chemnitz, 11. 07 2011.
- Schöbel, Anita. 2007.** Anschlusssicherung aus Fahrgastsicht für die Deutsche Bahn. Göttingen : Georg-August Universität Göttingen (Dissertation), 2007.
- Schranil, Steffen. 2012.** Disposition in Context of Disturbance Forecast. Zurich (IVT Seminar together with University of Birmingham) : s.n., 2012.
- . **2010.** Forschungsplan Prognose der Dauer von Störungen des Bahnbetriebs, Disposition und Ereigniskommunikation. Zürich : ETH Zürich (Forschungsplan), 2010.
- . **2003.** Leistungsfähigkeit der Zwickauer Straßenbahn. Zwickau : Käthe-Kollwitz-Gymnasium Zwickau (Besondere Lernleistung), 2003.

- **2008.** Stadt- und Regionalbahn Zwickau. Dresden : TU Dresden (Hauptseminararbeit), 2008.
- Schranil, Steffen und Weidmann, Ulrich. 2013.** Analyse und Anwendung der Prognosefähigkeit von Bahnsystemen im Störfall. ETR Eisenbahntechnische Rundschau. Swiss, 2013, 10.
- **2011.** Anforderungen an das Abweichungsmanagement. Zürich : ETH Zürich, 2011.
- **2012.** Betrieblicher Umgang mit Störereignissen in der Bahnproduktion. Eisenbahningenieur. 07 2012.
- **2012.** Elektromobilität - Verpasst der ÖV den Anschluss? Dresden : Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, 2012.
- **2013.** Forecasting the Duration of Rail Operation Disturbances. Washington : TRB Washington D. C., 2013.
- **2011.** Monitoring des Störgeschehens in Bahnsystemen. Dresden : Qsys-Tagung (Paper), 2011.
- **2012.** Monitoring des Störgeschehens in Bahnsystemen. V+T Verkehr und Technik. 2012, 03.
- **2013.** Störungsprognosen in der Bahnproduktion. Zürich : IT.13 Rail (Konferenzbeitrag), 2013.
- **2013.** Störungsprognosen in der Bahnproduktion. V+T Verkehr und Technik. 2013, 06.
- Schrötter, Torsten. 2010.** Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen Wetter und Störgeschehen im Bahnsystem. Dresden : TU Dresden (Diplomarbeit), 2010.
- Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute. 2006.** Öffentlicher Verkehr und Schienengüterverkehr: Grundnorm und Glossar (SN 671 001). Zürich : s.n., 2006.
- Strässle, Stefan. 2011.** Disposition im Kontext der Störungsprognose (Interview: Schranil, Steffen). BZ Ost, 26. 08 2011.
- **2011.** SBB-Pünktlichkeitsgrenzen (Interview: Schranil, Steffen). 09. 06 2011.
- UIC 450-2. 2009.** Bewertung der Qualität auf dem Netz, in Bezug auf den Eisenbahnbetrieb, zur Durchführung von Qualitätsanalysen - Codierung von Verspätungen und Verfahren für die Zuordnung von Verspätungsursachen. Paris : UIC, 2009.
- Ullius, Markus. 2005.** Verwendung von Eisenbahnbetriebsdaten für die Schwachstellen- und Risikoanalyse zur Verbesserung der Angebots- und Betriebsqualität. Zürich : Dissertation ETH Zürich, 2005.
- VDV. 2009.** Was sind Störungen? Köln : VDV, 2009.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). 2012.** VDV Statistik 2011. Köln : VDV, 2012.

-
- Weidmann, Ulrich. 2011.** Skript 2.1 Systemdimensionierung und Kapazität. Zürich : ETH Zürich (Vorlesungsskript), 2011.
- **2012.** Skript 3.1 Bahninfrastrukturen. Zürich : ETH Zürich (Vorlesungsskript), 2012.
- **2011.** Skript 4.3 Sicherheit und Zuverlässigkeit im Eisenbahnbetrieb. Zürich : ETH Zürich (Vorlesungsskript), 2011.
- Weidmann, Ulrich, et al. 2011.** Machbarkeit und Implementierbarkeit eines generischen LCC-Management Prozesses für Schienenfahrzeuge und dessen IT-Unterstützung. Zürich : ETH Zürich (Projektbericht), 2011.
- Weigelt, Horst. 2010.** Eisenbahngeschichte von den Anfängen bis zur Deutschen Reichsbahn. [Hrsg.] Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB). Jahrbuch des Bahnwesens Nah- und Fernverkehr. Hamburg : DVV Media Group, Eurailpress, 2010.
- Welter, Martin. 2008.** Bahn-Katastrophen. München : GeraMond-Verlag, 2008.
- Wende, Dietrich. 2003.** Fahrdynamik des Schienenverkehrs. Stuttgart - Leipzig - Wiesbaden : Teubner-Verlag, 2003.
- Wichser, Jost, Schneebeili, Hannes und Bollinger, Stefan. 2005.** Fachbegriffe des öffentlichen Verkehrs. Zürich : IVT Schriftenreihe Nr. 130, 2005.
- Wyss, Theresa. 2012.** Bahnsuizide im Bereich der SBB (Interview: Schranil, Steffen). Bern, 29. 08 2012.
- Zhu, Peng Lin. 2000.** Betriebliche Leistung von Bahnsystemen unter Störungsbedingungen. Braunschweig : TU Braunschweig (Dissertation), 2000.