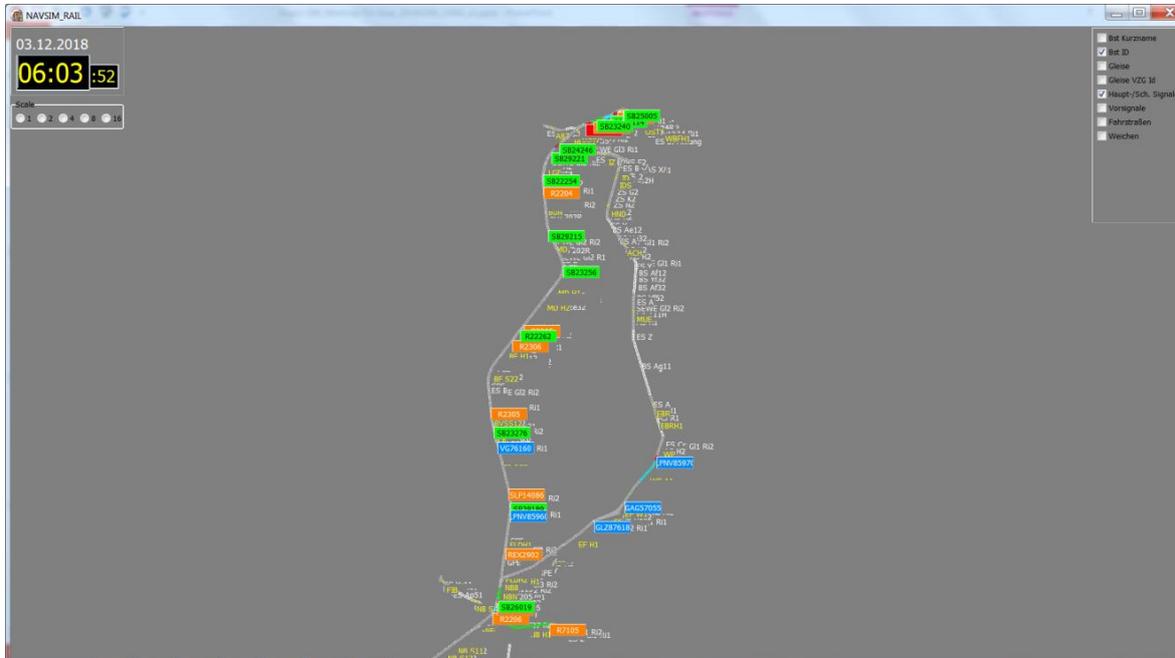


Optimierte Dispositionsplanung und Simulation zur Vorbereitung automatisierter Zugfahrten (Dispo-SIM)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016
(VIF 2016)

12 2020

[in diesem Bereich sollen aussagekräftige projektspezifische Grafiken (z. B. Fotos, Skizzen etc.) eingefügt werden]



Beispiel für eine Verifizierung durch Simulation mit NAVSIM-RAIL – Regelfahrplan;
Darstellung der Situation zw. Wien Hauptbahnhof (Wbf) und Wr. Neustadt (Nb)

Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien



Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:
Paris Lodron Universität Salzburg (PLUS)
Fachbereich Computerwissenschaften
Jakob-Haringersstr.
5020 Salzburg
Technische Universität Graz (TUG)
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
Rechbauerstraße 12/II
8010 Graz



Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien



[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



Optimierte Dispositionsplanung und Simulation zur Vorbereitung automatisierter Zugfahrten (DispoSIM)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2016)

AutorInnen:

Carl-Herbert Rokitansky (PLUS)

Fritz Zobl (PLUS)

Kurt Eschbacher (PLUS)

Peter Veit (TUG)

Matthias Landgraf (TUG)

Martin Smoliner (TUG)

Martina Zeiner (TUG)

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Paris Lodron Universität Salzburg

Technische Universität Graz

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	10
1 Kurzfassung	11
2 Dispo-SIM Projektziele	12
2.1 Allgemeine Ziele	12
2.2 Wissenschaftliche Fragestellungen:	15
2.3 Arbeiten und Untersuchungsmethoden	15
2.4 Umsetzung der Dispo-SIM Projektziele	15
3 Rahmenbedingungen und Potentiale von dem Dispo-SIM Ansatz	17
3.1 Automatisierung im Eisenbahnbetrieb.....	17
3.2 Betriebsabläufe	21
3.2.1 Einleitung.....	21
3.2.2 Betriebsabläufe.....	22
3.2.2.1 Verspätungsursachen.....	22
3.2.2.2 Aufgaben der Disposition.....	24
3.2.2.3 Darstellung.....	25
3.2.2.4 Grundbausteine der Konfliktlösung	27
3.2.2.5 Aktuelle Dispositionssoftware.....	29
3.3 Potentiale	32
3.3.1 Kapazität.....	33
3.3.2 Knoten.....	35
3.3.3 Fahrplanstabilität	36
3.3.4 Energieeinsparung.....	38
3.3.5 Energiebeeinflussung durch Fahrphasen	38
3.3.5.1 Standardfahrzyklus.....	39
3.3.5.2 Energiesparende Fahrweise ESF	40
3.3.5.3 Rückspeisung.....	43
3.4 Wahl der Versuchsstrecke und netzweiter Migrationsprozess	44
3.4.1 Kapazität.....	44
3.4.2 Kantenzzeit.....	46
3.4.3 Zugmix	46
3.4.4 Infrastruktur.....	47
4 Entwicklung der Dispositionsalgorithmen.....	51
4.1 Einleitung	51
4.2 Datensätze zur Simulationsimplementierung	51
4.3 Analyse und Umsetzung Streckengleis (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)	52
4.4 Analyse und Umsetzung der Signale (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL	55

4.5	Analyse und Umsetzung der Weichen in NAVSIM-RAIL.....	56
4.6	Tool zur Energieberechnung	63
4.6.1	Methodik	63
4.6.2	Ablauf der Energiebedarfsrechnung	63
4.6.3	Widerstände	64
4.6.4	Umrechnung der Widerstände auf den Energiebedarf	68
4.6.5	Abgleich mit den Messdaten der ÖBB.....	69
4.6.6	Anwendungen auf einer Beispielstrecke.....	71
4.6.7	Auswertungen.....	72
5	Verifizierung durch Simulation.....	74
5.1	Einleitung	74
5.2	Simulationsimplementation	74
6	Validierung durch Anwendungsbeispiel Wien Hauptbahnhof – Wr. Neustadt	79
6.1	Entwicklungen und Validierungen an der Beispielstrecke (NAVSIM-RAIL)	79
7	Zusammenfassung und Ausblick hinsichtlich eines netzweiten Migrationsprozesses.....	82
8	Umsetzungsmöglichkeiten aus Dispo-SIM.....	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der Potentialausschöpfung durch DispoSIM.....	13
Abbildung 2: Langfristig Ziel: Dispo-SIM als Unterstützung zur Echtzeit-Konfliktlösung	14
Abbildung 3: Projektworkflow Dispo-SIM mit Arbeitspakete – Übersicht und Interaktionen...	16
Abbildung 4: Automatisierungsgrade (Grades of Automation) angelehnt an (International Association of Public Transport (UITP),.....	21
Abbildung 5: Vergleich der Pünktlichkeit nach Zuggattungen in Österreich 2010-2017 (Personennahverkehrszüge, insbes. insbesondere die Wiener S-Bahn Pünktlichkeit von über 95%, Personenfernverkehr knapp über 85% und Güterverkehr zwischen 65% und 77%)	23
Abbildung 6: Verspätungsursachen nach Zuggattungen 2017.....	23
Abbildung 7: Schema ZWL Diagramm.....	26
Abbildung 8: Darstellung eines Trassenkonfliktes im Zeit-Weg-Linien Diagramm.....	27
Abbildung 9: Strecke Wien-Mürzzuschlag im ZWL Diagramm von ARAMIS.....	31
Abbildung 10: Verknüpfung der Optimierungsziele	33
Abbildung 11: Sperrzeitentreppe (links) und Aufschlüsselung der Komponenten (rechts)	34
Abbildung 12: Dispositionsmöglichkeiten in Knoten.....	35
Abbildung 13: Anschlussoptimierung bei Mehrfachanschlüssen.....	36
Abbildung 14: Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Kapazität	37
Abbildung 15: Wechselwirkung von Stabilität, Zugmix, Geschwindigkeit und Kapazität.....	38
Abbildung 16: Standardfahrzyklus	39
Abbildung 17: Zeit-optimierte und Energie-optimierte Fahrweise.....	40
Abbildung 18: Geschwindigkeitsverläufe der fünf definierten Planfälle	43
Abbildung 19: Zielnetz 2025+ mit Stand Infrastruktur 2009 (links) und 2025 (rechts).....	45
Abbildung 20: Strecke Wien-Wiener Neustadt im Knoten-Kanten-Modell	46
Abbildung 21: Zuggattungen im betreffenden Streckenabschnitt.....	47
Abbildung 22: Lage der Versuchstrecke (gelb) im Netz der ÖBB-Infrastruktur AG.....	48
Abbildung 23: Streckenspiegel aus ARAMIS für den Bereich Wiener Neustadt (NBN) bis Hetzendorf (HET)	50
Abbildung 24: Wien Hauptbahnhof bis Mödling: Beispiel eines Streckengleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (DS)	53
Abbildung 25: Wr. Neustadt und Umgebung: Beispiel eines Streckengleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (DS)	53

Abbildung 26: Wien Hauptbahnhof (Wbf): Beispiel eines Bahnhofsgleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Darstellung der eingestellten und der bereits zurückgelegten Fahrstraße sowie die aktuelle Belegung durch die Zugfahrt; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)54

Abbildung 27: Vergleich mit fotorealistischer Darstellung von Gleisen; Bildquelle: Google Earth54

Abbildung 28: Beispielhafte Umsetzung von Signalen; Bildquelle NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM), USBG55

Abbildung 29: Beispielhafte Umsetzung von Weichen und Kreuzungsweichen; Bildquelle: NAVSIM-RAIL (DS), USBG57

Abbildung 30: Umsetzungskonzept ergänzter Weichen (Geo-Koordinaten).....58

Abbildung 31: Umsetzungskonzept ergänzter Kreuzungsweichen (Geo-Koordinaten)58

Abbildung 32: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)59

Abbildung 33: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)60

Abbildung 34: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)60

Abbildung 35: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14: Implementierung in NAVSIM-RAIL Dispo-SIM (oben) und Bezug der Weichen und Signale in ARAMIS61

Abbildung 36: Implementierung von Fahrstraßen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)62

Abbildung 37: Eingangsparameter der Energieberechnung.....65

Abbildung 38: Aufteilung der Widerstände.....68

Abbildung 39: ÖBB Railpowerbox70

Abbildung 40: Fahrkurven von Railjets zwischen Wien und Wiener Neustadt.....71

Abbildung 41: Vergleichsanalyse des Energieberechnungs-Modells mit realen Energiemessdaten72

Abbildung 42: Energiebedarf unterschiedlicher Fahrweisen abhängig von Fahrwiderständen und Nebenverbrauch auf der Strecke Wien – Wiener Neustadt.....73

Abbildung 43: Beispiel für eine Verifizierung durch Simulation – Regelfahrplan; Darstellung der Situation zw. Wien Hauptbahnhof (Wbf) und Wr. Neustadt (Nb) (Bild:NAVSIM-RAIL)75

Abbildung 44: : Beispiel für eine Verifizierung durch Simulation – Vergleich zwischen

Regelfahrplan und aktuellen Zuglaufmeldungen (ZLM) bzgl. Railjet RJ551 von Wien Hbf. (Wbf) nach Graz (G); (Bild: NAVSIM-RAIL).....	76
Abbildung 45: Beispiel aus NAVSIM-RAIL, Fahrstraßenkette von Ausfahrtsignal MAT_E4 in Wien Hauptbahnhof bis Ausfahrtsignal NB_K2 in Wr. Neustadt unter Berücksichtigung von Weichenstörungen in Wbf, Lg, BVS, Lb und Nb	81
Abbildung 46: Realisierungsschritte Dispo-SIM und weiterer Ausblick.....	82
Abbildung 47: Adaptionbedarf im Rahmen der Digitalisierungsschritte	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übliche Konfliktsituationen und Lösungsvorschläge im Eisenbahnbetrieb.....	28
Tabelle 2: Eingangparameter Energieberechnung.....	66
Tabelle 3: Statistik der in Dispo-SIM/ NAVSIM-RAIL verarbeiteten Daten aus DS, VZG, FPL, ZLM.....	77

1 Kurzfassung

Eine automatisierte Disposition soll es bereits kurz- bis mittelfristig ermöglichen, zusätzliche Potentiale in der Betriebsführung zu realisieren. Während voll automatisiertes Fahren mit großem infrastrukturellem und finanziellem Aufwand verbunden ist, kann eine Optimierung der Disposition verhältnismäßig rasch und kostengünstig umgesetzt werden. Es handelt sich dabei um eine rechnerunterstützte, anstatt einer rechnergestützten Disposition, bei der das disponierende Personal optimierte Lösungsvorschläge für Konflikte erhält.

Im Projekt Dispo-SIM wurden basierend auf einer ausführlichen Grundlagenanalyse Dispositionsalgorithmen zur automatisierten Optimierung des Bahnverkehrs entwickelt. Die Optimierung ist dabei insbesondere auf Abweichungsfälle vom Normalfahrplan ausgelegt. Diese Optimierung basiert in einem cross-industry Ansatz zu Teilen auf Simulationentwicklungen aus der Luftfahrt. Die Entwicklungen in der Simulationsumgebung NAVSIM-RAIL – in enger Kooperation mit TU Graz - wurden so umgesetzt, dass sie grundsätzlich ortsunabhängig gültig und auch georeferenziert verfügbar und anwendbar sind. Die umfangreichen Entwicklungen wurden am Beispiel der Teststrecke Wien Hauptbahnhof – Wiener Neustadt getestet. Es konnten Potentiale der rechnerunterstützten Disposition von Störungsfällen aufgezeigt werden.

2 Dispo-SIM Projektziele

2.1 Allgemeine Ziele

Eine automatisierte Disposition soll es bereits kurz- bis mittelfristig ermöglichen, zusätzliche Potentiale in der Betriebsführung zu realisieren. Während voll automatisiertes Fahren mit großem infrastrukturellem und finanziellem Aufwand verbunden ist, kann eine Optimierung der Disposition verhältnismäßig rasch und kostengünstig umgesetzt werden. Es handelt sich dabei um eine rechnerunterstützte, anstatt einer rechnergestützten Disposition, bei der das disponierende Personal optimierte Lösungsvorschläge für Konflikte erhält.

Ziel ist es, durch die zunehmende Automatisierung die Aufgaben des/der Triebfahrzeugführers/in nach und nach zu ersetzen und somit folgende Eigenschaften zu verbessern^{1,2}:

- I Kapazität
- I Servicequalität
- I Sicherheit
- I Energieeffizienz
- I Kosten

Durch die Anwendung von ATO können optimale Geschwindigkeitsprofile realisiert werden, wodurch der betriebliche Verkehrsfluss verbessert und Energie eingespart werden kann³. Automatisierung bringt neben verbesserter Pünktlichkeit und Kapazitätsverbesserungen mehr Flexibilität durch die Anpassung des Angebots an die Nachfrage. Darüber hinaus wird ein besseres Verkehrsmanagement in belasteten Knotenpunkten und mehr Sicherheit durch den Wegfall des menschlichen Faktors bei fahrerlosem Betrieb ermöglicht.⁴

Mit den ersten zwei Stufen wird ein stabiles Konzept angestrebt, welches für mehr Pünktlichkeit,

¹ Goverde, Rob (2017): Challenges in ATO for mainline railways. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 27.11.2017.

² Kessell, Clive (2017): Main Line ATO evaluated. Hg. v. Railenergy. Online verfügbar unter <https://www.railengineer.uk/2017/04/13/main-line-ato-evaluated/>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2017.

³ Barnard, Bob; Bienfait, Benoît; Zoetardt, Patrick (2012a): Automatic Train Operation. The mandatory improvement For ETCS application. Irse Aspect Conference. Institution of Railway Signal Engineers (IRSE). London, 2012.

⁴ Communauté européenne du rail (CER) (2016): Operators' requirements for ATO development. Position Paper. Brüssel.

Fahrplanstabilität, Kapazität und weniger Energiebedarf sorgt. Durch GoA3 und 4 könnten in weiterer Folge insbesondere eine höhere Flexibilität und eine Kostenreduktion erzielt werden.

Das FFG-Forschungsprojekt Dispo-SIM soll es dabei ermöglichen, die Potentiale einer automatisierten Disposition von Zugfahrten hinsichtlich Energie, Kapazität, Knotenoptimierung, Netzwirkung und Fahrplanstabilität darzustellen. Dies soll anhand einer Simulation von realen Zugfahrten in einem auszuwählenden Testabschnitt der Österreichischen Bundesbahnen durchgeführt werden. Eine automatisierte Disposition von Zugfahrten stellt einen essentiellen Schritt in Richtung automatisierter Zugfahrten (ATO-Automated Train Operation) dar. Dieser letzte Entwicklungsschritt würde die vollständige Ausschöpfung der Potentiale erlauben (Abbildung 1), doch bereits eine automatisierte Disposition soll es ermöglichen, einen wesentlichen Anteil der Potentiale auszunützen.

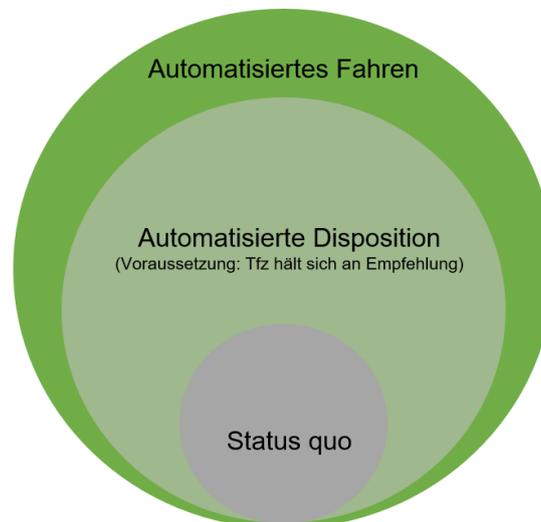


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der Potentialausschöpfung durch DispoSIM

Hinsichtlich der Grades of Automation (Abbildung 4) stellt eine automatisierte Disposition von Zugfahrten eine hochentwickelte Ausführung von GoA1 dar, welche es dadurch ermöglichen soll, einen wesentlichen Anteil der Potentiale von GoA2 auszuschöpfen. Die Tätigkeiten Anfahren, Halten, Türen öffnen/schließen und der Notfallbetrieb werden dementsprechend nach wie vor von dem/der Triebfahrzeugführer/in übernommen. Die Anwendung von Dispo-SIM soll es nun ermöglichen, Fahrempfehlungen an den/die Triebfahrzeugführer/in zu übermitteln, welche eine die Netzauswirkungen berücksichtigende Optimierung hinsichtlich Energie, Kapazität, Fahrplanstabilität und Knotenoptimierung darstellt. Unter der Annahme, dass diese Fahrempfehlung umgesetzt wird, kann dementsprechend annähernd eine Fahrweise ausgeführt werden, welche dem

halbautomatischen Zugbetrieb (GoA2) entspricht. Diese Weiterentwicklung stellt einen notwendigen Entwicklungsschritt zum automatischen Zugbetrieb dar und besitzt insbesondere den Vorteil, dass ein Teil der durch ATO erhofften Potentiale bereits mittelfristig ausgeschöpft werden kann.

Da Fahrpläne heutzutage schon einem sehr hohen Optimierungsgrad in diesem Sinne entsprechen, soll Dispo-SIM insbesondere dann eine wesentliche Hilfe darstellen, wenn ein Trassenkonflikt auftritt, welcher immer eine außerplanmäßige Abweichung vom Regelfahrplan darstellt (Abbildung 2). Diese kann beispielsweise durch Verspätungen, Liegenbleiber, Baustellen, Störungsbeseitigungen und vielen weiteren Gründen verursacht werden. In einem derartigen Fall reagiert der/ die Disponent/in in dem verwendeten System ARAMIS durch eine Anpassung der betroffenen Zugfahrten. Diese Anpassung basiert dabei auf der vorhandenen Streckenkenntnis und Erfahrung des/der Disponenten/in. Eine Berücksichtigung sämtlicher Auswirkungen dieser Maßnahmen hinsichtlich einer netzweiten Energie- und Kapazitätsoptimierung kann in der vorhandenen Reaktionszeit natürlich nicht gewährleistet werden. Dieser optimierte Lösungsvorschlag soll zukünftig von der zu erstellenden Simulation übernommen werden.

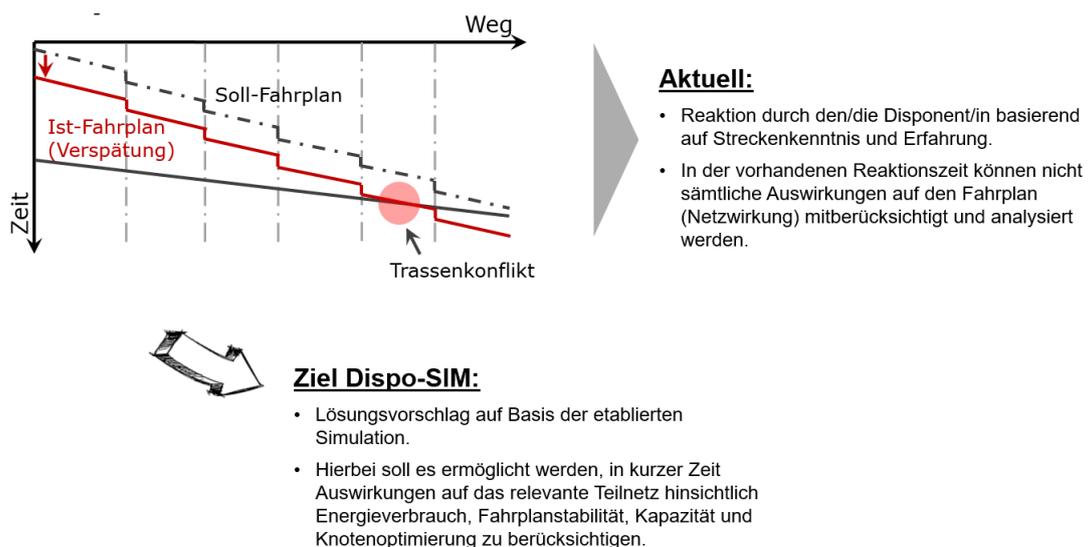


Abbildung 2: Langfristig Ziel: Dispo-SIM als Unterstützung zur Echtzeit-Konfliktlösung

Das Forschungsprojekt Dispo-SIM soll dabei dazu beitragen, den Nachweis zu liefern, dass der Algorithmus bzw. die Simulation in der Lage sind, zukünftig derartige Vorschläge liefern zu können. Dies soll anhand einer realen Teststrecke (Wien HBF – Wr. Neustadt) dargestellt werden. Das langfristige Ziel besteht darin, diesen Lösungsvorschlag dem/der Disponenten/in in Echtzeit und im derzeit verwendeten System anzuzeigen.

2.2 Wissenschaftliche Fragestellungen:

Mit diesen allgemeinen Zielsetzungen ergeben sich folgende wissenschaftliche Fragestellungen:

- (1) Welche Voraussetzungen sind für die Umsetzung des automatisierten Fahrens im Eisenbahnwesen notwendig?
- (2) Welche Optimierungspotentiale können in welcher Form ausgeschöpft werden?
- (3) Welche Anforderungen sind an eine Versuchsstrecke von Dispo-SIM zu stellen bzw. welche Strecke eignet sich zur Simulation mit realen Daten?
- (4) Wie kann ein netzweiter Migrationsprozess des erstellten Algorithmus aussehen?
- (5) Welche Umsetzungspotentiale sind mit der eingesetzten Simulationstechnologie erreichbar?
- (6) Welche Daten und Datenverarbeitungsmethoden müssen eingesetzt werden, um die gesetzten Ziele zu erreichen?
- (7) Welche Dispositionsalgorithmen können adaptiert werden und welche müssen neu entwickelt werden?
- (8) Wie können die Umsetzungen mit Hilfe von Key Performance Indicators (KPIs) beurteilt werden?

2.3 Arbeiten und Untersuchungsmethoden

Um diese Ziele zu erreichen, waren im Förderantrag folgende Arbeiten und Untersuchungsmethoden geplant:

- i. Ermittlung der Rahmenbedingungen und Potentiale
- ii. Entwicklung von spezifischen Dispositionsalgorithmen
- iii. Konzept-Verifizierung durch Simulation
- iv. Validierung der Entwicklungen durch einen Feldtest (Strecke Wien HBhf – Wr. Neustadt)

2.4 Umsetzung der Dispo-SIM Projektziele

Um die gesetzten Ziele zu erreichen, wurde in Dispo-SIM ein Workflow für das Projekt sowie für den Entwicklungsablauf bzw. die Analyse der Umsetzungen entwickelt (Abbildung 3). In Abbildung 3 ist auch der finale Bearbeitungsstand der einzelnen Projektbausteine und Arbeitspakete eingetragen.

3 Rahmenbedingungen und Potentiale von dem Dispo-SIM Ansatz

3.1 Automatisierung im Eisenbahnbetrieb

Der Term Industrie 4.0 ist in aller Munde. Es handelt sich um eine weitere „Industrielle Revolution“, hervorgerufen durch sukzessive Automatisierung. Die erste industrielle Revolution ist im 18. Jahrhundert durch die Entwicklung der Dampfmaschine zu verzeichnen. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Herstellung vieler Dinge durch Massenproduktion, Erdöl und Elektrizität beschleunigt. Eine weitere Revolution lässt sich durch die Computertechnik und Informationstechnologie ab den 70er Jahren wahrnehmen, welche sich bis heute stark weiterentwickelt hat. Industrie 4.0 beschreibt die allgegenwärtige Verarbeitung und Vernetzung von „Big data“ und „Internet of Things“ sowie die künstliche Intelligenz und die Entwicklung autonomer Systeme, wie beispielsweise autonome Fahrzeuge⁵.

Die neue Revolution beeinflusst das Verhalten der Gesellschaft stark, sei es im Privat- oder Berufsleben, im Mobilitätsverhalten oder in der Wirtschaft, wo am globalen Markt Konkurrenzfähigkeit gefordert wird. Vorrangig davon betroffen sind Bereiche wie Transport und Logistik. Digitalisierung ermöglicht die Kommunikation der Verkehrssysteme untereinander sowie die Entwicklung integrierter, intermodaler Verkehrslösungen. Besonders im Hinblick auf das Bevölkerungswachstum und den damit verbundenen Folgen wie Urbanisierung, steigender Verkehrsnachfrage und dadurch entstehenden Kapazitätsengpässen bietet die Digitalisierung durch „smarte“ Lösungen große Chancen⁵.

Die mit dem Bevölkerungswachstum in Zusammenhang stehenden Probleme betreffen nicht nur den Verkehr selbst, sondern beeinflussen auch die Umwelt, da mehr Energie und Ressourcen verbraucht werden. Der globale Verbrauch an Ressourcen wird 2050 um ca. ein Drittel zunehmen⁵. Im Weißbuch Verkehr 2011 verfolgt die Europäische Kommission daher zehn Ziele zur Gestaltung eines wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystems – unter anderem die Reduktion von Treibhausgasemissionen ohne Einschränkungen im Mobilitätsangebot⁶. Dies knüpft an eine der sieben Leitinitiativen der Strategie Europa 2020, welche für die Mitgliedsstaaten der EU bindend sein sollen. Konkret handelt es sich um die Leitinitiative: „Ressourcenschonendes Europa“⁶.

⁵ Marteaux, Oliver; Sobun, Noodhir (2017): Embracing the pace of automation: perspectives from other transport modes and countries. Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB)

⁶ Europäische Kommission (2011): Weißbuch zum Verkehr. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum, hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Luxemburg: Amt für Veröff. der Europ. Union.

„Ziel ist die Unterstützung des Übergangs zu einer emissionsarmen Wirtschaft, die ihre Ressourcen wirkungsvoll einsetzt. Es geht darum, unser Wirtschaftswachstum von den Ressourcen und vom Energiebedarf abzukoppeln, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, die Wettbewerbsfähigkeit zu fördern und eine größere Energieversorgungssicherheit zu unterstützen.“⁶

Trinckauf⁷ weist darauf hin, dass im Bahnsektor mit einer Zunahme des Personenverkehrs zu rechnen ist; der Güterverkehr hingegen wird einen deutlichen Rückgang erfahren. Der derzeit stagnierende Schienengüterverkehr (16-17% des gesamten Güterverkehrsaufkommens) begründet sich auf den längeren Transportzeiten des Einzelwagenverkehrs im Vergleich zum Straßengütertransport⁸. Die im Weißbuch zum Verkehr formulierten Ziele für die Bahn betreffen unter anderem eine 30%-ige Umlagerung des Straßengüterverkehrs bei Strecken über 300 km auf Verkehrsträger wie die Bahn bis 2030⁶. Daraus folgt, dass es für die Eisenbahn wichtig ist, dem Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern standzuhalten, die Kapazität zu steigern, multimodale Verkehrslösungen zu entwickeln und die Kosten zu reduzieren⁷. Dies geht auch mit der Vision der ERA (europäischen Eisenbahnagentur, vormals European Railway Agency) einher, welche eine Kapazitätserhöhung sowie Kostenreduktion vorsieht, was auch im Sinne der Eisenbahnunternehmen liegt⁹.

Durch die Digitalisierung im Schienenverkehr (Schiene 4.0) können einerseits die Klimabilanz verbessert (digitale Steuerung) und umweltschonendere Logistiklösungen sowie mehr Kundenkomfort (digitale Vernetzung) ermöglicht werden. Zudem kann durch intelligente Leit- und Sicherungstechnik für mehr Sicherheit und Pünktlichkeit gesorgt werden¹⁰. Wenn die Möglichkeiten der Automatisierung und Digitalisierung genutzt werden, kann der Schienenverkehr seine Wettbewerbsfähigkeit stärken. Damit soll eine Verlagerung von anderen Verkehrsträgern auf die Schiene erzielt werden¹¹. Zum Erreichen dieser Ziele ist der Einsatz von „game-changing technologies“ wie ATO (Automatic Train Operation) angedacht. Das vorliegende Forschungsprojekt beschäftigt sich daher eingehend mit einem essentiellen Teilaspekt am Weg zur Automatisierung

⁷ Trinckauf, Jochen (2017): Der Bahnbetrieb auf dem Weg zur Digitalisierung und Automatisierung. In: *Deine Bahn* (09), S. 7–9.

⁸ Nießen, Nils; Schindler, Christian; Vallée, Dirk (2017): Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb – Potentiale für den Schienenverkehr. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (04), S. 32–37.

⁹ Koch, Richard (2017): Certification of mainline ATO (Automatic Train Operation). Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.

¹⁰ Schenk, Volker (2017): Wie behauptet die Bahn im digitalen Zeitalter ihre Stellung im Markt? - Aus der Sicht der Bahnindustrie in Deutschland*. In: *ZEVrail* (1-2), S. 14–17.

¹¹ Communauté européenne du rail (CER) (2016): Operators' requirements for ATO development. Position Paper. Brüssel.

im Eisenbahnwesen, nämlich der automatisierten Disposition von Zugfahrten.¹²

Um im späteren Verlauf näher auf die Projektziele eingehen zu können, ist es an dieser Stelle notwendig, den Begriff ATO zu erklären und zu definieren. Nicht zu verwechseln ist dieser mit der im Straßenverkehr gebräuchlichen Begrifflichkeit des autonomen Fahrens. Hier bewegt sich das Verkehrsmittel komplett selbständig. Anweisungen erteilen eine im Fahrzeug installierte Sensorik sowie künstliche Intelligenz im Verkehrsraum. Eine Reaktion auf Änderungen in der Umgebung, auch Unvorhersehbares, ist möglich. Das System entscheidet für sich, ohne jeglichen Einfluss vom Menschen. In der Kraftfahrzeugbranche wird damit die letzte Stufe des fahrerlosen Fahrens bezeichnet.¹³

Beim autonomen Fahren bewegt sich das Fahrzeug komplett selbstständig basierend auf eigens getroffenen Entscheidungen einer künstlichen Intelligenz. Automatisches oder automatisiertes Fahren beschreibt folgendes: „Das Verkehrsmittel bewegt sich wie ein Automat.“¹⁴ Die Steuerung des Fahrzeuges erfolgt durch eine Leitstelle. Wird die Verbindung zwischen Fahrzeug und Leitebene unterbrochen, muss ein sicherer Zustand einkehren. Aufgrund der langen Bremswege im Schienenverkehr wäre ein „Fahren auf Sicht“, speziell bei hohen Geschwindigkeiten, nicht möglich, wodurch heutzutage Schienenfahrzeuge nicht ohne externe Leittechnik betrieben werden. Für die Bahn, als spurgeführtes und von außen gesteuertem System, kann demnach bei der Steuerung der Fahrzeugbewegung nur von einem automatisierten oder automatischen und nicht autonomen Fahren gesprochen werden^{14, 15}

Die Begrifflichkeiten des automatischen/automatisierten Fahrens werden in der Literatur unterschiedlich gebraucht. Im Rahmen dieses Projektes werden die von dem UITP (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen) entwickelten „Grades of Automation“ (GoA) für den schienengebundenen Nahverkehr verwendet. Für die deutsche Übersetzung der Begriffe wurde die Definition von Pachtl¹⁴ und Nießen¹⁵ in Übereinstimmung mit Emery¹⁶ herangezogen, weshalb in weiterer Folge keine Unterscheidung zwischen automatisch und automatisiert getroffen wird.

¹² Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE): UNIFE Position Paper on Digitalisation of Railways.

¹³ Puri, Vaibhav (2017): Autonomous systems - facing up to the regulatory challenges. Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB).

¹⁴ Pachtl, Jörn (2017): Betriebliche Randbedingungen für autonomes Fahren auf der Schiene. In: *Deine Bahn* (09), S. 11–19.

¹⁵ Nießen, Nils; Schindler, Christian; Vallée, Dirk (2017): Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb – Potentiale für den Schienenverkehr. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (04), S. 32–37.

¹⁶ Emery, Daniel (2017): Towards automatic train operation in long distance service: State-of-the-art and challenges. Monte Verità/Ascona (17th Swiss Transport Research Conference).

Unterteilt wird bei Bahnen in vier Automatisierungsstufen (Abbildung 4), wobei auch eine Stufe 0 definiert ist. Diese entspricht einer Steuerung bei „Fahren auf Sicht“, wie beispielsweise bei Straßenbahnen. In der ersten Stufe wird der/die Lokführer/in bei der Führung des Zuges durch ein automatisches Zugsicherungssystem, welches im Notfall hält oder durch DAS (Driver Advisory Systems, zu Deutsch Fahrerassistenzsysteme) unterstützt. Erst ab GoA2 trifft die Definition von ATO zu, wobei hier nur von halbautomatischem Zugbetrieb die Rede sein kann, aufgrund des Vorhandenseins eines/er Triebfahrzeugführers/in in der Führerstandskabine. Diese/r übernimmt überwachende Aufgaben und ist für das Öffnen und Schließen der Türen zuständig, während die Antriebs-, Fahr-, und Bremssteuerung automatisch erfolgt. Die ersten zwei Stufen sind der Definition nach daher teilweise automatisiert.^{16,17}

Automatisches Fahren ist das „automatische Fahren eines Zuges ohne Triebfahrzeugführer“¹⁷. Dies entspricht GoA3, wo es keinen/e Triebfahrzeugführer/in mehr in der Führerstandskabine gibt und der Betrieb vom ATO System übernommen wird. Personal an Bord kann jedoch im Notfall eingreifen und den Zug steuern. GoA3 kann als hochautomatisiert eingestuft werden¹⁵.

Automatischer Zugbetrieb ohne Zugbegleiter/in entspricht der Stufe 4; in der Literatur wird hier von vollautomatischem Betrieb gesprochen¹⁷. Im Nahverkehr entspricht GoA4 der Automatic Train Control (ATC), auch oft bekannt als Communication Based Train Control (CBTC), worin ATO nur eine von mehreren Komponenten und daher auch nicht dem fahrerlosen Betrieb gleichzustellen ist¹⁸.

¹⁷ Pachtl, Jörn (2017): Betriebliche Randbedingungen für autonomes Fahren auf der Schiene. In: Deine Bahn (09), S. 11–19.

¹⁸ Dong, Hairong; Ning, Bin; Cai, Baigen; Hou, Zhongsheng (2010): Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways. In: IEEE Circuits Syst. Mag. 10 (2), S. 6–18. DOI: 10.1109/MCAS.2010.936782.

	GoA	Betriebsart	Anfahren	Halten	Türen öffnen und schließen	Betrieb im Notfall
Teilweise automatisiert	GoA1	Automatische Zugsicherung/ Zugbeeinflussung/ DAS mit Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in
	GoA2	Halbautomatischer Zugbetrieb	Automatisch	Automatisch	Lokführer/in	Lokführer/in
Hoch automatisiert	GoA3	Automatischer Zugbetrieb mit Zugbegleiter – fahrerloser Betrieb	Automatisch	Automatisch	Zugbegleiter/in	Zugbegleiter/in
Vollautomatisch	GoA4	Automatischer Zugbetrieb ohne Zugbegleiter – personalloser Betrieb	Automatisch	Automatisch	Automatisch	Automatisch

Abbildung 4: Automatisierungsgrade (Grades of Automation) angelehnt an (International Association of Public Transport (UITP)19,20

ATO ist ein Teilsystem, welches je nach Automatisierungsgrad unterschiedliche Rollen übernimmt. Diese reichen vom Anfahren über exaktes Anhalten, Türöffnung- und -schließung, bis hin zur Einhaltung eines gewissen Performancelevels. ATO alleinstehend ist nicht sicher, weshalb es immer in Zusammenhang mit einem Zugsicherungs/-beeinflussungssystem anzuwenden ist, um den hohen Sicherheitsanforderungen im Eisenbahnwesen gerecht zu werden.

3.2 Betriebsabläufe

3.2.1 Einleitung

Disposition im Eisenbahnbetrieb ist notwendig, da das Verhalten des Personals bzw. die Zuverlässigkeit der Infrastruktur nicht immer vollständig dem Soll-Fahrplan entsprechen. Durch diese Abweichungen entstehen gegebenenfalls Konflikte, die vom disponierenden Personal gelöst werden müssen. Ziel der Disposition ist es, einen adaptierten, konfliktfreien Fahrplan zu erstellen, der aktuelle Umstände wie Baustellen, Streckensperren, Zugverspätungen, kurzfristig

¹⁹ Nießen, Nils; Schindler, Christian; Vallée, Dirk (2017): Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb – Potentiale für den Schienenverkehr. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) (04), S. 32–37.

²⁰ Pacht, Jörn (2017): Betriebliche Randbedingungen für autonomes Fahren auf der Schiene. In: Deine Bahn (09), S. 11–19.

eingeschobene ad-hoc-Züge und dergleichen berücksichtigt.

3.2.2 Betriebsabläufe

Sobald die Abwicklung des Bahnverkehrs nicht dem Regelfahrplan entspricht, ist es Aufgabe der Disposition, den Soll-Fahrplan wiederherzustellen. Es gibt unterschiedliche Ursachen für Zugverspätungen und ebenso verschiedene Lösungsmöglichkeiten für die daraus entstehenden Konflikte.

3.2.2.1 Verspätungsursachen

Die Pünktlichkeit im Bahnverkehr in Österreich wird jährlich durch die Schienen Control abgebildet. Als pünktlich wird dabei im Personenverkehr ein Zug definiert, der weniger als 5 Minuten und 30 Sekunden Verspätung aufweist. Im Güterverkehr gilt ein Zug mit mehr als 15 Minuten Verspätung als unpünktlich.²¹ Die Auswertungen für die Jahre 2010-2017 zeigen, dass die einzelnen Zuggattungen deutlich unterschiedliche Verspätungshäufigkeiten aufweisen (Abbildung 5). Während Personennahverkehrszüge – und insbesondere die Wiener S-Bahn – in den letzten Jahren stets zu über 95% pünktlich waren, erreichte der Personenfernverkehr nur Werte knapp über 85%. Im Güterverkehr lag die Pünktlichkeit in den letzten Jahren zwischen 65% und 77%.²²

²¹ Schienen Control: Jahresbericht 2017. Ihr Recht am Zug, http://www.schienecontrol.gv.at/files/1-Homepage-Schiene-Control/1g-Presse/Pressemappen/Pressemappen2018/SC-Jahresbericht-2017_Web.pdf [zuletzt aktualisiert am 17.07.2018]

²² Schienen Control: Jahresbericht 2017. Ihr Recht am Zug, http://www.schienecontrol.gv.at/files/1-Homepage-Schiene-Control/1g-Presse/Pressemappen/Pressemappen2018/SC-Jahresbericht-2017_Web.pdf [zuletzt aktualisiert am 17.07.2018]

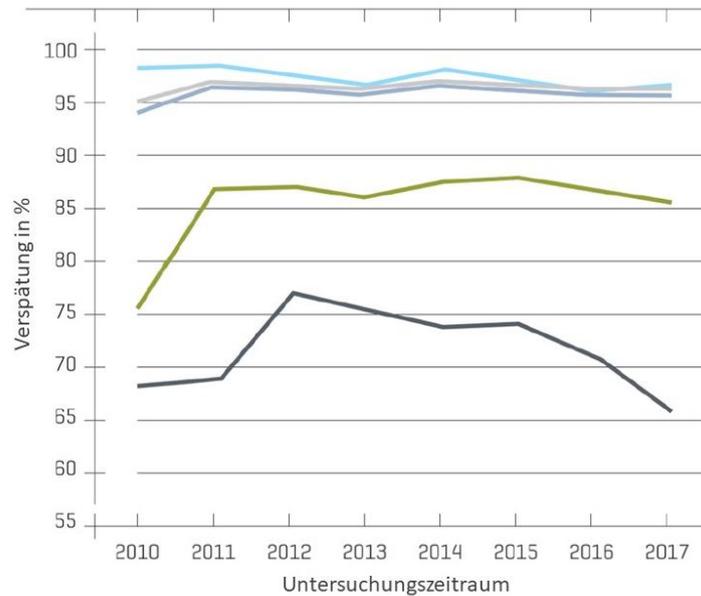


Abbildung 5: Vergleich der Pünktlichkeit nach Zuggattungen in Österreich 2010-2017 (Personennahverkehrszüge, insbes. insbesondere die Wiener S-Bahn Pünktlichkeit von über 95%, Personenfernverkehr knapp über 85% und Güterverkehr zwischen 65% und 77%)

Grundsätzlich führen geplante oder ungeplante Ereignisse zu Verspätungen. Geplante Ereignisse sind beispielsweise Baustellen oder Streckensperren. Zu ungeplanten Ereignissen zählen Unfälle oder Selbstmorde, aber auch verspätete Übergaben aus dem Ausland.

Im Personenverkehr entsteht ein Großteil der Verspätungen im Zuge der Betriebsabwicklung der Eisenbahnverkehrsunternehmen, etwa durch längere Fahrgastwechsel in der Station, Abwarten eines Anschlusses oder technische Störungen bei Fahrzeugen (Abbildung 6). Knapp ein Viertel der Verspätungen im Personenverkehr entsteht durch verzögerte Übergaben aus dem Ausland.

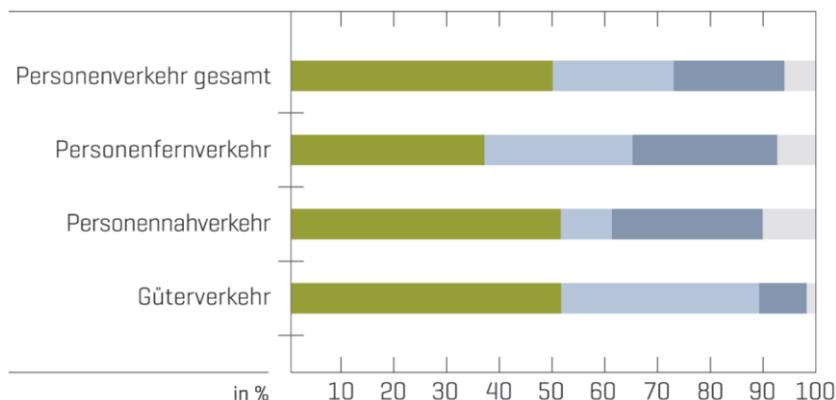


Abbildung 6: Verspätungsursachen nach Zuggattungen 2017

Im großteils international verkehrenden Güterverkehr liegt der Anteil der verspäteten Züge aus dem Ausland bei über einem Drittel. Prinzipiell überwiegen auch hier Verspätungen, die aus der Betriebsabwicklung der EVUs resultieren. Auf Mängel an der Infrastruktur sowie externe Ursachen, wie fremde Personen im Gleisbereich oder Unwetter, entfällt nur ein kleiner Teil der Verspätungen.

Bei jenen Verspätungen, die aus Störungen der Infrastruktur resultieren, waren Weichenstörungen, Stellwerkprobleme oder Dispositionsfehler die häufigsten Verspätungsgründe. Zusätzlich führten Anlagenstörungen, Wartungs- und Inspektions- oder Erneuerungsarbeiten zu Verzögerungen. Aufgrund infrastruktureller Störungen war 2017 jeder Zug im Durchschnitt mit 52 Sekunden verspätet. Aufgrund der Fahrzeitreserve ergaben sich daraus aber keine wesentlichen Auswirkungen auf die Pünktlichkeitsstatistik.²³

Die Auswertung der Verspätungsgründe zeigt, dass unterschiedlichste Ereignisse zu Abweichungen vom Regelfahrplan führen können. Vielfach liegen diese Gründe außerhalb des Einflussbereichs von Infrastruktur oder EVU. Auffällig ist jedoch, dass Dispositionsfehler explizit als Grund für Verspätungen angegeben werden.

3.2.2.2 Aufgaben der Disposition

Grundsätzlich deckt die Disposition im Eisenbahnwesen zwei unterschiedliche Aufgabengebiete ab, die in ihrer zeitlichen Abfolge bzw. Umsetzung in zwei Gruppen eingeteilt werden können²⁴:

- a) **Vorausschauende Zuweisung von Trassen wie ad-hoc Bestellungen:** Dazu zählen z.B. kurzfristige Bestellungen oder Abweichungen im Güterkehr sowie Adaptionen von Baustellenfahrplänen. Diese werden mehrere Tage im Voraus in das Schema des Jahresfahrplanes eingetaktet, wobei dieser im Idealfall nicht oder nur minimal verändert wird und sich zeitlich vor allem für den Personenverkehr keine Änderungen ergeben.
- b) **Kurzfristige Verschiebungen:** Durch Störungen, Unfälle usw. ist eine zeitnahe Anpassung der Zugtrassen erforderlich. Dies führt in der Regel zu Konfliktsituationen, welche durch Änderungen von Fahrstraßen oder Anpassung der zeitlichen Zugabfolge gelöst werden können. Ist dies nicht möglich, kommt es zu Zugausfällen.

²³ Jacobs, Jürgen (2008): Rescheduling, in: Hanson, Ingo Arne, Pachl, Jörn: Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation, Eurailpress, Hamburg, S. 184.

²⁴ Jacobs, Jürgen (2008): Rescheduling, in: Hanson, Ingo Arne, Pachl, Jörn: Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation, Eurailpress, Hamburg, S. 184.

In weiterer Folge wird auf den zweiten Fall der kurzfristigen Verschiebungen bzw. der Abweichungen vom Regelfahrplan eingegangen.

Zur Abwicklung dieser Aufgaben wurde die Disposition in den letzten Jahren in Betriebsführungszentralen gebündelt. Disponenten überwachen von zentraler Stelle aus umfangreiche Bereiche des Streckennetzes. Zur Unterstützung sind Disponenten für Netzbereiche bzw. Fahrdienstleiter in den größeren Bahnhöfen vor Ort zugeteilt. Örtlich besetzte Betriebsstellen sind kaum mehr vorhanden. Um diese Systeme effizient und zugleich mit der notwendigen Sicherheit steuern zu können, sind Anlagen zur automatischen Zuglaufverfolgung und -lenkung ebenso unerlässlich, wie Systeme zur Unterstützung der Disponenten bei Konflikterkennung und -lösung.²⁵

In der Regel können aktuelle Dispositionssysteme Konflikte erkennen, die Disposition selbst wird aber nach wie vor manuell durchgeführt. Einzelne rechnergestützte Dispositionssysteme sind bereits in der Lage, durch Simulation Lösungsvorschläge zu Konflikten auszugeben. Der/ die Disponent/in kann dann manuell Fahrbefehle erteilen bzw. automatisiert die Züge auf andere Routen lenken und so zur Optimierung des Verkehrsablaufes beitragen.²⁶

3.2.2.3 Darstellung

Die Darstellung des Fahrplanes erfolgt in der Disposition üblicherweise durch einen Bildfahrplan. Dieses Zeit-Weg-Linien Diagramm (ZWL-Diagramm) erlaubt eine vorausschauende Betrachtung des Zugbetriebes und die frühzeitige Erkennung von potenziellen Konflikten (Abbildung 7).

²⁵ Pachl, Jörn (2016): Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, S. 227f.

²⁶ Weidmann, Ulrich et al (2014).: Dynamische Kapazitätsoptimierung durch Automatisierung des Bahnbetriebs, in: Eisenbahn-Revue 12/2014, S. 609.

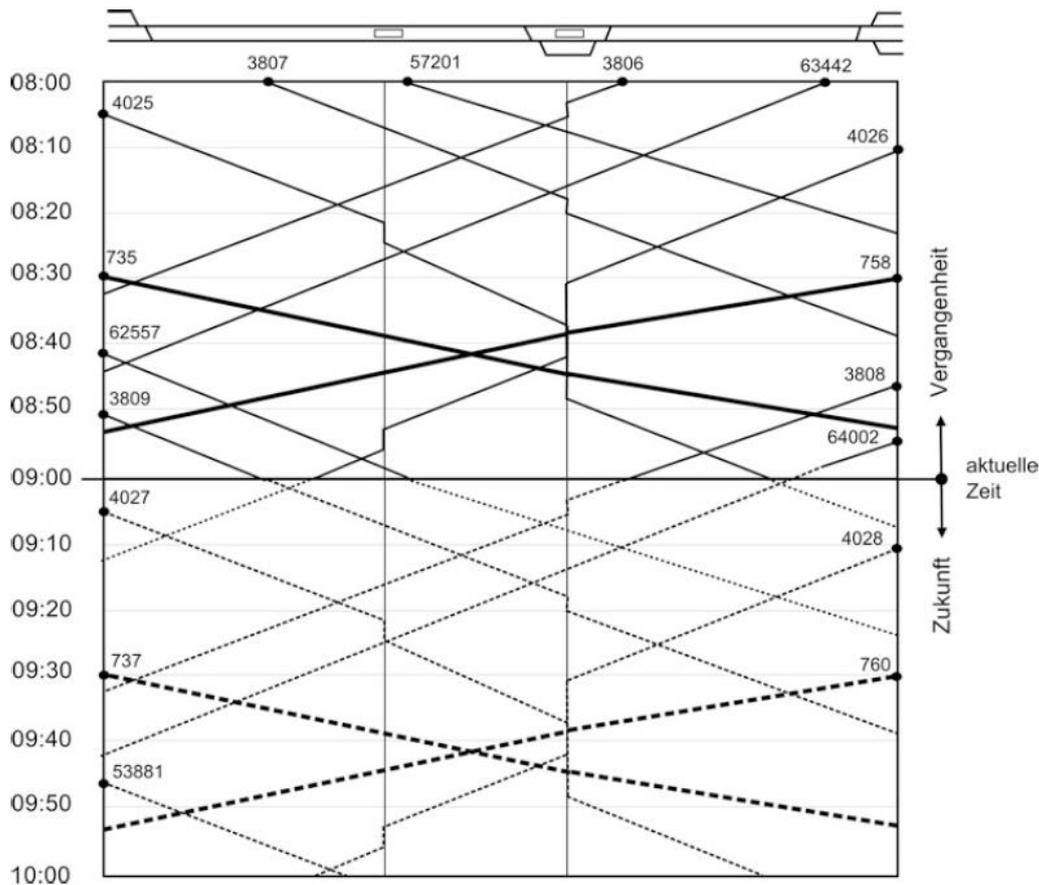


Abbildung 7: Schema ZWL Diagramm²⁷

Zudem können Zugfolgezeiten, Überholungen und geplante oder ungeplante Zugkreuzungen übersichtlich abgebildet werden. Züge werden durch Trajektorien dargestellt, wobei die Neigung die Geschwindigkeit des Zuges darstellt, Bereiche ohne Neigung (senkrechte Trajektorien) stellen Halte dar.

²⁷ Jörn Pachl: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 2016, S. 231

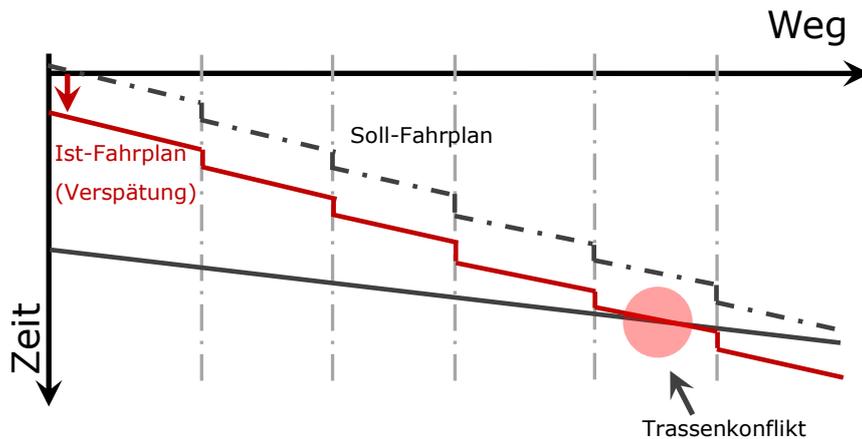


Abbildung 8: Darstellung eines Trassenkonfliktes im Zeit-Weg-Linien Diagramm

Ein Trassenkonflikt durch Abweichung vom IST-Fahrplan ist in Abbildung 8 dargestellt. Ein langsamerer Zug (rot) fährt verspätet im Startbahnhof ab (roter Pfeil), wodurch ein schnellerer Zug auf den langsameren Zug auffährt (rot schraffierte Fläche). Ein Eingreifen des/der Disponenten/in ist erforderlich, um eine Kollision zu vermeiden. Für solche Konflikte gibt es im Vorhinein definierte Grundbausteine sowie übergeordnete Ziele bzw. Regeln.

3.2.2.4 Grundbausteine der Konfliktlösung

Der/ die Disponent/in löst Konflikte basierend auf Streckenkenntnis und Erfahrung sowie vorgefertigter Lösungsschemata. Grundsätzlich kann zwischen Folgefahrt-, Gegenfahrt-, Kreuzungs- und Gleisbelegungskonflikten unterschieden werden.

Eine Lösungsvariante bei Konfliktsituationen ist zum Beispiel der Reihenfolgetausch. Darunter wird das Abwarten von entgegenkommenden Zügen oder das Überholen von vorausfahrenden Zügen verstanden. Weiter ist die Entkopplung der Zugfahrten durch Gleiswechsel bzw. (Teil-)Umfahrung möglich. Daraus spannt sich eine Matrix von zahlreichen Lösungsmöglichkeiten auf (Tabelle 1).

Situation Lösungen	Folgefahrtkonflikt	Gegenfahrtkonflikt	Kreuzungskonflikt	Gleisbelegungskonflikt im Bahnhof
Züge verkehren in prognostizierter Reihenfolge	Zug 2 folgt Zug 1 (V-Harm.)	-	Zug 2 folgt Zug 1 (Zug 2 wartet vor Kreuzung)	Zug 2 folgt Zug 1 (Zug 2 wartet vor Einfahrt)
Reihenfolgentausch	<ul style="list-style-type: none"> - Überholung vor Konfliktort (wenn möglich) - Überholung nach Konfliktort - ggf. wartet Zug 1 vor Einfädelung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug 1/ Zug 2 wartet auf Kreuzung - ggf. Zug 1/ Zug 2 wartet vor Einfädelung 	Zug 1 wartet vor Kreuzung	Zug 1 wartet vor Einfahrt
Entkoppelung der Zugfahrten durch (Teil-)Umfahrung	<ul style="list-style-type: none"> - Zug 1 fährt auf dem Gegengleis bzw. Umleitung - Zug 2 fährt auf dem Gegengleis bzw. Umleitung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug 1/ Zug 2 fährt Umleitung - Zug 1/ Zug 2 fährt auf dem Regel- bzw. Gegengleis 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug 1/ Zug 2 befährt alternatives Gleis - Zug 1/ Zug 2 befährt Gegengleis - Gleistausch 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug 1 befährt alternatives Gleis - Zug 2 befährt alternatives Gleis

Tabelle 1: Übliche Konfliktsituationen und Lösungsvorschläge im Eisenbahnbetrieb

Zusätzlich zu diesen Maßnahmen sind die Verlängerung der Fahrzeit bzw. die Anpassung der Geschwindigkeit für einen bestimmten Streckabschnitt bzw. der Entfall von Zügen möglich.

Abhängig von Netztopographie und Betriebsdichte können in der vorhandenen Reaktionszeit jedoch nicht sämtliche Auswirkungen dieser Lösungen auf den Fahrplan bzw. die Netzwirkung berücksichtigt und analysiert werden. Um Lösungsvorschläge bewerten zu können, ist daher die vorgehende Definition von Dispositionszielen bzw. -regeln erforderlich.

Das grundlegende Ziel der Disposition ist es, möglichst viele Zugfahrten in der Plantrasse bzw. innerhalb der Pünktlichkeitsschwellwerte abzuwickeln. Zudem spielt die „sichere, pünktliche und energiesparende Abwicklung“ bei „optimaler Ausnutzung der Infrastrukturkapazitäten eine wichtige Rolle.“²⁸

Zur Umsetzung dieser Ziele werden konkrete Reihenfolgen fixiert. In der Regel werden Notfallzüge und Züge aus hochpreisigen Segmenten vorrangig behandelt, danach folgt der Fernverkehr vor dem Nahverkehr. In einigen Bahnnetzen gibt es zudem Strecken, wo bestimmte Zuggattungen bevorzugt behandelt werden, wie z.B. Güterzüge.

Im Abweichungsmanagement der ÖBB ist diese Reihenfolge folgendermaßen festgelegt:

²⁸ ÖBB-Infrastruktur AG (2016): Abweichungsmanagement (Verfahrensanweisung), GP_01,02,01,03-BE-01_VA_Abweichungsm.

- (1) Erforderlichenfalls Fahrt zur Behebung von Betriebsstörungen
- (2) Personenfernverkehrszug
- (3) Zug, dessen Abweichung von der Plantrasse zwischen -5 und +10 Minuten liegt²⁹
- (4) Personennahverkehrszug
- (5) Güterzug

Kann aus diesen Regeln keine eindeutige Reihenfolge abgeleitet werden, sind die weiteren Entscheidungsgrundlagen²⁸ zu berücksichtigen:

- I geringerer Trassenkapazitätsverbrauch
- I zu erwartende Folgekonflikte
- I Sicherstellung von Anschlüssen
- I Anzahl der verbleibenden Halte auf der Restlaufstrecke am ÖBB-Netz
- I Reisendenströme (Frequenz, Berufsverkehr, Hauptverkehrszeiten)
- I Zulaufsteuerung zu Vershubknoten und Vershubstandorten
- I Qualitätsstufen innerhalb desselben Eisenbahnverkehrsunternehmens

Hier wird keine fixe Reihenfolge vorgegeben, es liegt im Ermessen der/ des Disponentin/en, entsprechende Maßnahmen zu setzen.

3.2.2.5 Aktuelle Dispositionssoftware

Das derzeit bei den ÖBB verwendete zentrale Dispositionssystem ARAMIS (Advanced Railway Automation, Management and Information System) ermöglicht die Übernahme von Fahrplan- und Zugdaten aus Vorsystemen sowie deren Bewertung. Es erfolgt eine Ausgabe des automatischen Lenkplanes in den Betriebsführungszentralen entsprechend der getroffenen Maßnahmen. Zugbeeinflussungssysteme und Zugfunk sind automatisch verknüpft.³⁰ Dies bedeutet, dass es sich um einen integrierten Automatikbetrieb handelt – eine Bedienhandlung des Disponenten löst verschiedene Maßnahmen wie Zuglenkung oder Aktualisierung von Fahrgastinformationen aus, manuelle Regelhandlungen entfallen. Bei längeren Wartezeiten für Fahrzeuge werden z.B. Informationen über das weitere Verhalten an das Triebfahrzeug übermittelt.

²⁹ Anmerkung: Züge in einer Bandbreite von -5 bis +10 Minuten Abweichung vom Soll-Fahrplan gelten als gleich pünktlich.

³⁰ ÖBB-Infrastruktur AG, Schienennetz-Nutzungsbedingungen 2018 der ÖBB-Infrastruktur AG, 2018.

Für den/ die Disponent/in wird eine Vielzahl von Anwendungen zur Steuerung des Zugbetriebes angeboten:

- I Knotentabelle: Dynamische Anzeige von Ankunfts- und Abfahrtstabellen einer oder mehrerer Betriebsstellen
- I Soll-Ist-Abweichung: Dynamische Anzeige von Zuglaufdaten einer oder mehrerer Betriebsstellen
- I Streckenspiegel: Dynamische Anzeige eines Streckenspiegels
- I Knotengrafik: Dynamische grafische Anzeige von einem oder mehreren Knoten mit Anschlussbeziehungen und –konflikten.

Zusätzlich stehen externe Bild- bzw. Datenabfragen zu Verfügung. Diese ermöglichen statische Anzeigen zu grafischen und tabellarischen Anwendungen bzw. die Auflistung von Zugläufen und Störfällen nach bestimmten Filter- und Sortierkriterien.

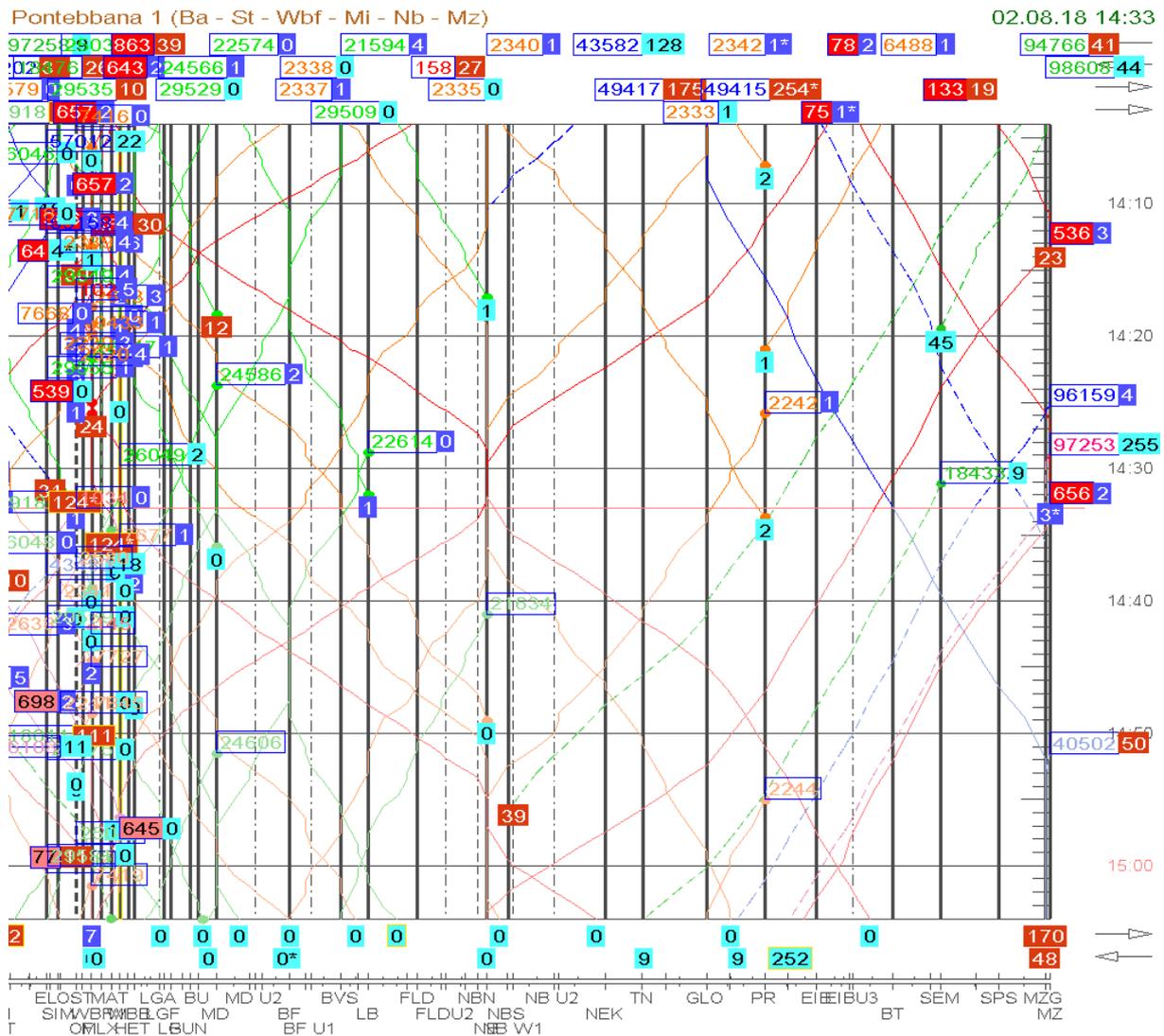


Abbildung 9: Strecke Wien-Mürzzuschlag im ZWL Diagramm von ARAMIS

Die aussagekräftigste Anwendung ist das Zeit-Weg-Linien Diagramm (Abbildung 9). Hier sind SOLL- bzw. IST-Fahrzeiten in beiden Fahrtrichtungen dargestellt. Unterschiedliche Zuggattungen sind durch farbliche Hinterlegung leicht unterscheidbar. Im unteren Bildbereich ist ersichtlich, ob es sich um ein- oder zweigleisige Abschnitte handelt; Abzweigungen werden strichliniert dargestellt.

Konflikte in Strecken und Bahnhöfen werden bis zu einer Stunde im Voraus automatisch erkannt und grafisch dargestellt. Prognosen für den weiteren Zugverlauf sind jedoch üblicherweise nur bis zu einer halben Stunde im Voraus verlässlich, weshalb in der Regel in diesem Zeitraum disponiert wird. Lösungsvorschläge für Konfliktsituationen werden mit Ausnahme der Anschlussdisposition nicht angeboten. Im letzteren Fall werden Anschlussübergänge in Knotenbahnhöfen von ARAMIS

überwacht und Maßnahmen zur Konfliktbeseitigung bereitgestellt.³¹

Es ergeben sich folgende Anforderungen an ein Tool für eine automatisationsunterstützte Disposition:

- I Darstellung der Disposition wie im ZWL Diagramm bei ARAMIS.
- I Die bestehenden Regeln bzw. Entscheidungsgrundlagen (siehe oben) sollen implementiert werden. Der Hintergrund des Optimierungsvorschlags bzw. die verwendeten Dispositionsregeln sollen erkenntlich gemacht werden.
- I Lösungsvorschläge sollen Fahrstraßen berücksichtigen. Es dürfen keine bereits vergebenen Fahrstraßen gekreuzt oder verunmöglicht werden.
- I Aus erkannten Konflikten sollen verschiedene Lösungsvorschläge abgeleitet und nach unterschiedlichen Zielsetzungen (Verspätung, Anschlusssicherung, Energiebedarf, ...) bewertet werden.
- I Standardsituationen sollen idealerweise vom Programm vollautomatisch gelöst werden, damit sich der/die Disponent/in auf komplexere Situationen konzentrieren kann.
- I Hinterlegung von Zuggarnitur-Umläufen soll gewährleistet sein.
- I In weiterer Folge (nicht Teil des gegenständlichen Projekts) soll die Anzeige von Fahrgastströmen als zusätzliche Entscheidungsgrundlage berücksichtigt werden können.
- I Punktgenaue Darstellung der Züge mit GPS anstatt der bisherigen Aktualisierung der Zugtrajektorien am Übergang von Blockstellen und Signale bzw. zum Wechsel in den Bahnhof

3.3 Potentiale

Für den Optimierungsprozess muss zunächst definiert werden, welche Potentiale abgeschöpft werden sollen. Im Kontext der automatisierten Disposition von Zugfahrten sind dies Erhöhung der Kapazität, Erhöhung der Fahrplanstabilität, Knotenoptimierung und Minimierung des Energiebedarfs (Abbildung 10).

³¹ SysDesign: Dispositives Leitsystem für Streckennetze internationaler Bahnunternehmen
<http://www.sysdesign.com/download/ge/Projektblaetter/AS-ARAMIS.pdf> [zuletzt aktualisiert am 02.08.2018]

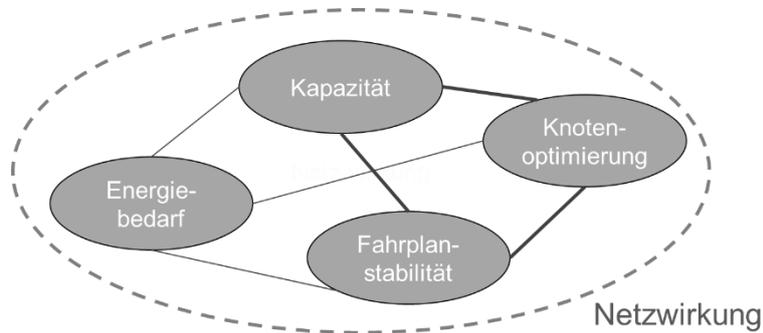


Abbildung 10: Verknüpfung der Optimierungsziele

Dabei bedingen sich die ersten drei Ziele gegenseitig. Eine Erhöhung der Kapazität ist ohne aufwändige Anpassung der Infrastruktur in erster Linie in den Knoten zu erreichen und umfasst damit insbesondere eine Knotenoptimierung. Eine Erhöhung der Kapazität geht zu Lasten der Reserve- bzw. Pufferzeiten und kann damit die Fahrplanstabilität reduzieren. Letztere ist essentiell für die Zuverlässigkeit und damit die Attraktivität des Integrierten Taktfahrplanes (ITF), der wiederum die oberste betriebliche Prämisse darstellt.

Von diesen Zusammenhängen teilweise entkoppelt ist der Energiebedarf. Dieser hängt zu einem beträchtlichen Teil vom Fahrverhalten auf freier Strecke ab. Dieses wird maßgeblich vom Verhalten des/der Triebfahrzeugführers/in sowie der Zugleitung beeinflusst. Unterstützend kann eine Fahrempfehlung hinsichtlich einer energieoptimierten Fahrweise in die Fahrzeugkabine übertragen werden. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Anfahrvorgang, weshalb ungeplante Haltevorgänge vermieden werden sollten und damit Anfahrvorgänge vermieden werden können.

3.3.1 Kapazität

Kapazität im Eisenbahnwesen ist durch die Anzahl der Züge je Zeiteinheit auf einer Strecke definiert. Wie viele Züge hintereinander auf einer Strecke fahren können, ist von der Signalisierungstechnik bzw. dem Zugsicherungssystem abhängig. Im konventionellen Zugbetrieb sind Blockabstände und Mindestzugfolgezeit die limitierenden Parameter. Zusammen mit der Fahrzeitreserve und der Pufferzeit ergibt sich die sogenannte Sperrzeitentreppe (Abbildung 11).

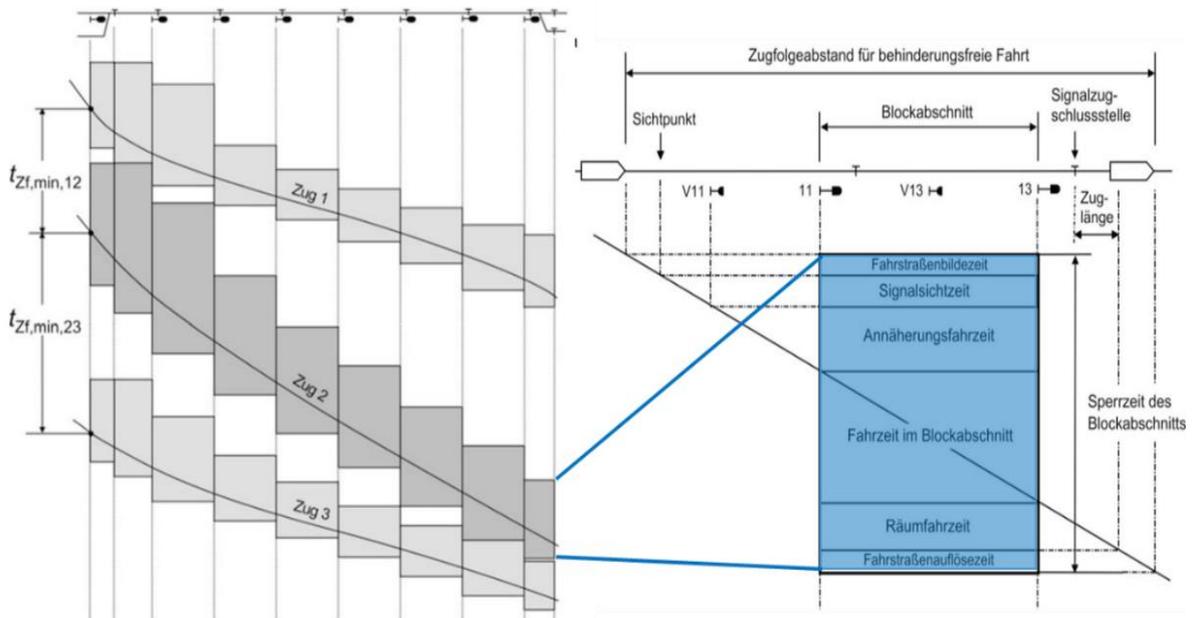


Abbildung 11: Sperrzeitentreppe (links) und Aufschlüsselung der Komponenten (rechts)³²

Solange der Betrieb mit konventioneller Zugführung abgewickelt wird, sind die Potentiale einer automatisierten Disposition zur Steigerung der Kapazität relativ gering, da Reserve und Pufferzeiten für eine stabile Betriebsführung erforderlich sind (siehe auch 3.3.3). Eine Kapazitätssteigerung ist nur möglich, wenn an Engpassstellen wie Knoten Reserven reduziert werden. Dies kann durch die Einführung einer dynamischen Kapazitätsoptimierung umgesetzt werden, die allerdings mehrere (infrastrukturelle) Maßnahmen voraussetzt. Dies sind meter- und sekundengenaue Echtzeitdaten von Zügen und eine entsprechende Verarbeitung durch automatisierte Fahrplanerstellung. Zudem sind die Fernsteuerung von Stellwerken und ein Driver Advisory System (DAS) erforderlich, das Echtzeitdaten zum Fahrverhalten an das Triebfahrzeug liefert bzw. eine adaptive Zuglenkung erlaubt. Weiters sind eine automatische Zugführung und eine optimierte Reservenzuteilung erforderlich.

Weiteres Potenzial zur Kapazitätssteigerung bietet das Fahren im Bremswegabstand („Moving Block“), das durch die Aufhebung der Blockabstände möglich wird. Voraussetzung dafür ist jedoch eine Zugsicherung auf ECTS Level 3 bzw. einen Betrieb auf Level GoA 2 oder 3.

³² Eigene Darstellung nach Jörn Pachl: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 2016, S. 47.

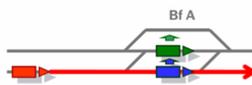
Sowohl automatisierte Zugführung als auch Fahren im Moving Block gehen jedoch über eine automatisierte Disposition hinaus und sind daher nicht Teil dieser Untersuchung. Im Rahmen der automatisierten Disposition wird versucht, den Kapazitätsverlust bei Konfliktsituationen unter Berücksichtigung der (Teil-) Netzwerkwirkung möglichst gering zu halten.

3.3.2 Knoten

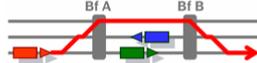
Die Optimierung des Betriebsablaufes bei Abweichungen vom IST-Fahrplan kann durch Anpassung von Fahrweg, Ankunfts- und Abfahrtszeiten oder Adaption der Umsteigebeziehungen erfolgen.

Die ersten zwei Varianten orientieren sich an den Grundbausteinen der Konfliktlösung. Optimierungen können durch Wechsel der Bahnsteigkante (a), Fahrweganpassung im Knoten (b) bzw. in der Bahnhofsausfahrt (c) oder durch Anpassung von Ausfahrtsreihenfolge (d) oder Ankunfts- und Abfahrtszeit (e) erfolgen (Abbildung 12):

a) Überholen im Knoten



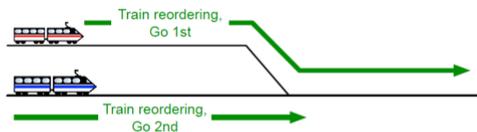
b) Trassenänderung im Knoten



c) Parallelausfahrt bei Mehrgleisigkeit



d) Änderung Reihenfolge Ausfahrt



e) Anpassung Abfahrtszeit Ausfahrt



Abbildung 12: Dispositionsmöglichkeiten in Knoten

Eine Adaption der Umsteigebeziehungen kann durch Anpassung der Aufenthaltszeit erfolgen. Die Mindestaufenthaltszeit in Bahnhöfen berücksichtigt eine sogenannte „dispositive Übergangszeit“ vom Zubringer- zum Abbringerhalt sowie eine Übergangspufferzeit. Durch Kürzen oder Entfall der

letzteren können Verspätungen reduziert werden, solange die Umsteigebeziehungen gewährleistet sind.

Umsteigebeziehungen können nur dann entfallen, wenn Mehrfachanschlüsse bestehen und den Fahrgästen daraus keine oder nur minimale Verspätungen entstehen (Abbildung 13). Kann die erforderliche Übergangszeit vom Zug F1 zum Zug F2 nicht eingehalten werden, ist bei entsprechender Kommunikation ein Fahrgastwechsel auf den Zug F3 möglich.

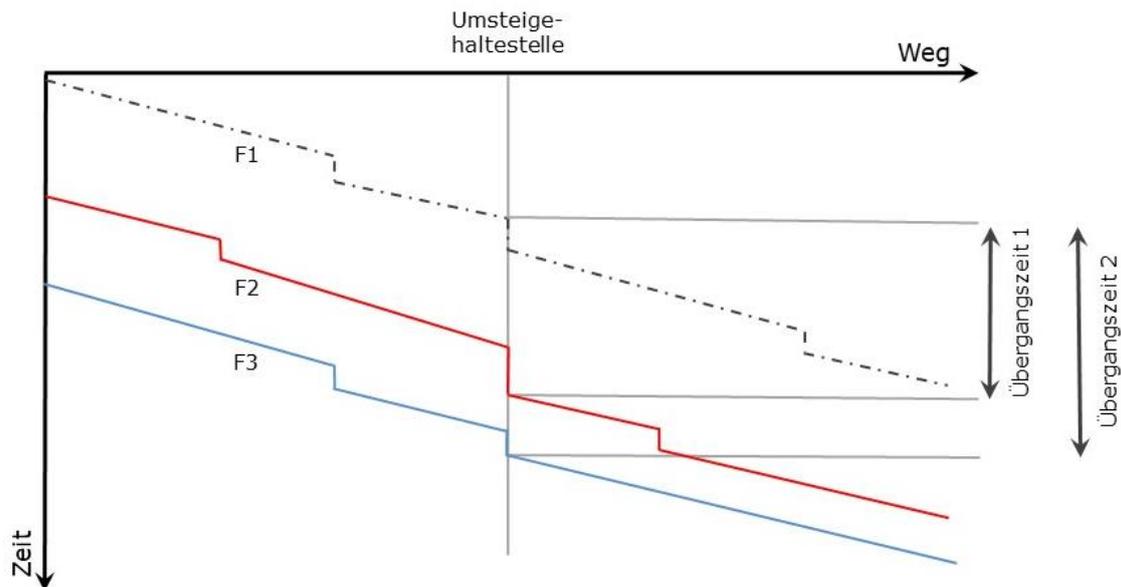


Abbildung 13: Anschlussoptimierung bei Mehrfachanschlüssen

Ein weiteres Potenzial lässt sich durch Echtzeitdaten zu Fahrgastströmen heben. Ist die Anzahl von wartenden Fahrgästen am Bahnsteig bekannt, können Aufenthaltszeiten im Verspätungsfall von verspäteten Zügen entsprechend gekürzt werden.

Bei Anpassungen von Aufenthaltszeiten in Knotenbahnhöfen ist jedenfalls zu berücksichtigen, dass Umsteigebeziehungen im Sinne des Taktfahrplanes gewährleistet sind.

3.3.3 Fahrplanstabilität

Fahrplanstabilität kann in erster Linie durch ausreichende Reserve- und Pufferzeiten bzw. Knotenaufenthaltszeiten garantiert werden. Dies steht allerdings im Gegensatz zur Erhöhung der Kapazität (Abbildung 14). Eine möglichst hohe Zuverlässigkeit bzw. Stabilität eines Fahrplanes reduziert die Zuganzahl auf ein Minimum. Umgekehrt würde die theoretische umsetzbare Kapazität die Fahrzeitreserven bzw. Puffer deutlich einschränken. Bereits minimale Verspätungen würden

dann direkt weitergegeben werden, das engverknüpfte System eines Taktfahrplanes würde sich über Stunden nicht erholen können.

Nur eine ausgewogene Mischung aus beiden Zielgrößen führt zu einem praktikablen Fahrplan, womit der Kapazität Grenzen gesetzt sind.

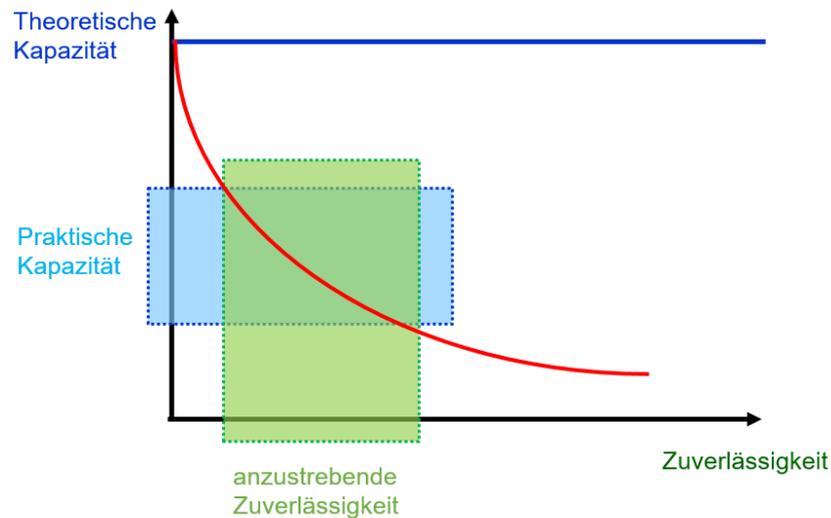


Abbildung 14: Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Kapazität

Wird diese Fragestellung auf den Zugmix (Reihenfolge) bzw. die Durchschnittsgeschwindigkeit erweitert, ergibt sich ein klares Bild. Die Optimierung der Disposition stellt keine Optimierung des Fahrplanes dar. Damit ist jedoch auch die Kapazität durch den Fahrplan definiert. Eine optimierte Disposition kann jedoch die Betriebsqualität verbessern. Maßnahmen dazu können eine Angleichung der Durchschnittsgeschwindigkeit oder ein homogener Zugmix sein (Abbildung 15).

Kapazität

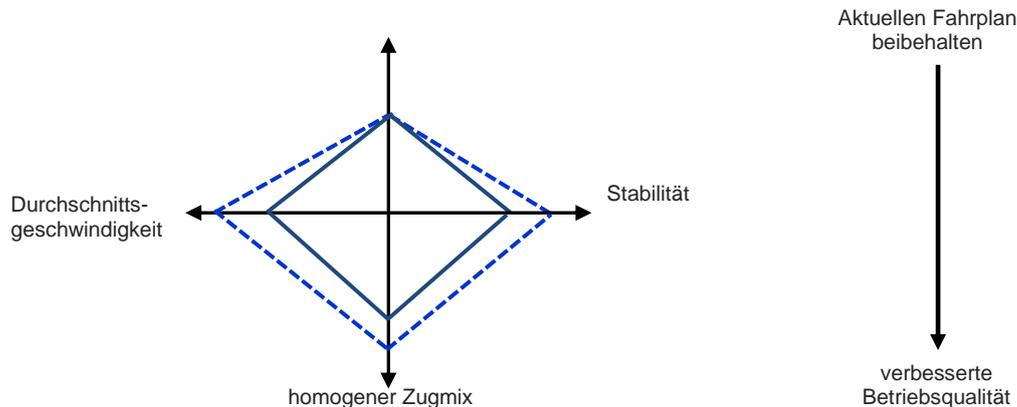


Abbildung 15: Wechselwirkung von Stabilität, Zugmix, Geschwindigkeit und Kapazität

3.3.4 Energieeinsparung

Die bisher beschriebenen Potentiale können im Bereich von Knoten abgerufen werden. Großteils unabhängig davon stellt der Energiebedarf im Bereich der freien Strecke ein großes Potential dar. In der Praxis kommt es aufgrund betrieblicher Randbedingungen zu unterschiedlichsten (suboptimalen) Fahrkurven (Abbildung 40). Durch eine optimierte Disposition und entsprechende Fahrbefehle können Fahrkurven optimiert und der Energiebedarf reduziert werden. Durch folgende Maßnahmen kann der Energiebedarf situationsbedingt reduziert werden.

Zur Energieeinsparung sind neben der Vermeidung von ungeplanten Halten folgende Optimierungsmöglichkeiten möglich:

- I Ausroll-Optimierung bzw. Optimierung der elektrischen Bremse
- I Definierte Beschleunigung bzw. Leistungsabruf
- I Geschwindigkeitsbegrenzung nach fahrplanmäßigen Erfordernissen

Um dieses Potential zu heben, sind die Bestandteile einer Fahrkurve bzw. deren Optimierungsmöglichkeiten essentiell.

3.3.5 Energiebeeinflussung durch Fahrphasen

Der Energiebedarf eines Schienenfahrzeuges kann durch bestimmte Fahrstile oder durch eine Energierückführung, die Rückspeisung, positiv beeinflusst werden.

3.3.5.1 Standardfahrzyklus

Der Standardfahrzyklus beschreibt die vier verschiedenen Phasen eines Fahrabschnittes, welche in Abbildung 16 dargestellt sind:

- I Beschleunigung
- I Beharrung
- I Auslauf
- I Bremsung

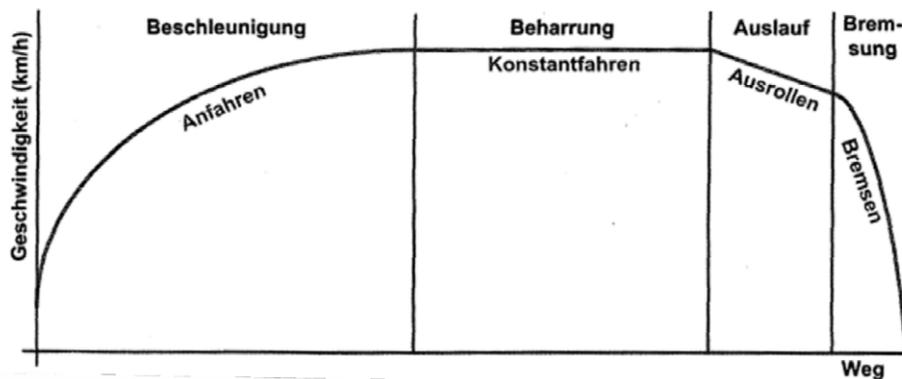


Abbildung 16: Standardfahrzyklus

Unter dem Fahrzustand „Anfahren“ bzw. „Beschleunigung“ versteht man einen Beschleunigungsvorgang bis zu einer Zielgeschwindigkeit. Dabei ist der Beschleunigungsbereich sowohl von der Antriebsleistung des Fahrzeuges als auch von den Antriebskräften, die vom Rad auf die Schiene übertragen werden, abhängig.

Wird die Zielgeschwindigkeit erreicht, tritt die sogenannte „Beharrungsfahrt“ bzw. „Konstantfahrt“ ein, welche eine Fahrt mit unterschiedlicher Zugkraft in Abhängigkeit der einzuhaltenden Geschwindigkeit darstellt. Ist jedoch die Zugkraft so groß wie der auftretende Fahrwiderstand, so ist die Geschwindigkeit annähernd konstant.

Beim „Auslauf“ oder „Ausrollen“ erfolgt kein Antrieb, womit die auftretenden Widerstände auf die Fahrt Einfluss nehmen. Das heißt, die Zugkraft wird kleiner, somit ist der Fahrwiderstand größer und verringert die Geschwindigkeit des fahrenden Zuges.

Wird die Fahrgeschwindigkeit des Zuges auf eine gewünschte Zielgeschwindigkeit reduziert, so erfolgt eine „Bremsung“. Dabei wirkt nicht nur der Fahrwiderstand alleine auf das Fahrzeug, sondern

auch noch zusätzlich erzeugte Bremskräfte.³³

3.3.5.2 Energiesparende Fahrweise ESF

Eine energiesparende Fahrweise (ESF) wird dem/der Triebfahrzeugführer/in mittels der Geschwindigkeitsempfehlung nahegelegt. Das Fahren ohne Antrieb in der Auslaufphase liegt dem Standardfahrzyklus der Energieeinsparung zugrunde (Abbildung 17). Dadurch kann der Energiebedarf um rund 15% reduziert werden.^{34,35}

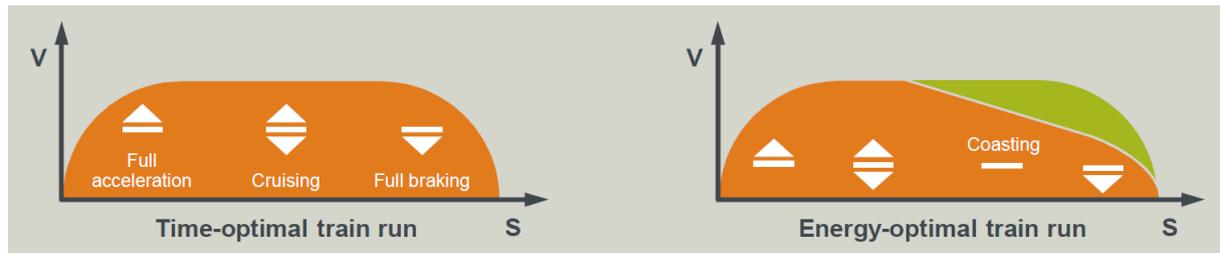


Abbildung 17: Zeit-optimierte und Energie-optimierte Fahrweise³⁵

Neben dem antriebslosen Fahren (Ausrollen) in der Auslaufphase, gibt es weitere Möglichkeiten, bei pünktlicher Ankunft Energie einzusparen. Neben einer Reduktion von Antriebs- und Bremsvorgängen kann auch durch niedrigere Maximalgeschwindigkeiten (im Beharrungsbereich) Energie eingespart werden.

Um den unterschiedlichen Energiebedarf von optimalen bzw. suboptimalen Fahrweisen auswerten zu können, wurden fünf Planfälle definiert (

³³ Janicki, Jürgen (2011): Systemwissen Eisenbahn, Berlin: Bahn Fachverlag GmbH.

³⁴ Weidmann, Ulrich (2014): Die automatische Bahn. Wie Automatisierung und Schweizer Präzision die Bahn auf höchste Leistung bringen, Vortrag bei Treffpunkt Science City am 16.3.2014.

³⁵ Siemens, Division Mobility (2016): Automatisiertes Fahren auf der Schiene, Die positiven Auswirkungen durch den Wandel des Bahnmarktes, Vortrag am 27. Juni 2016.

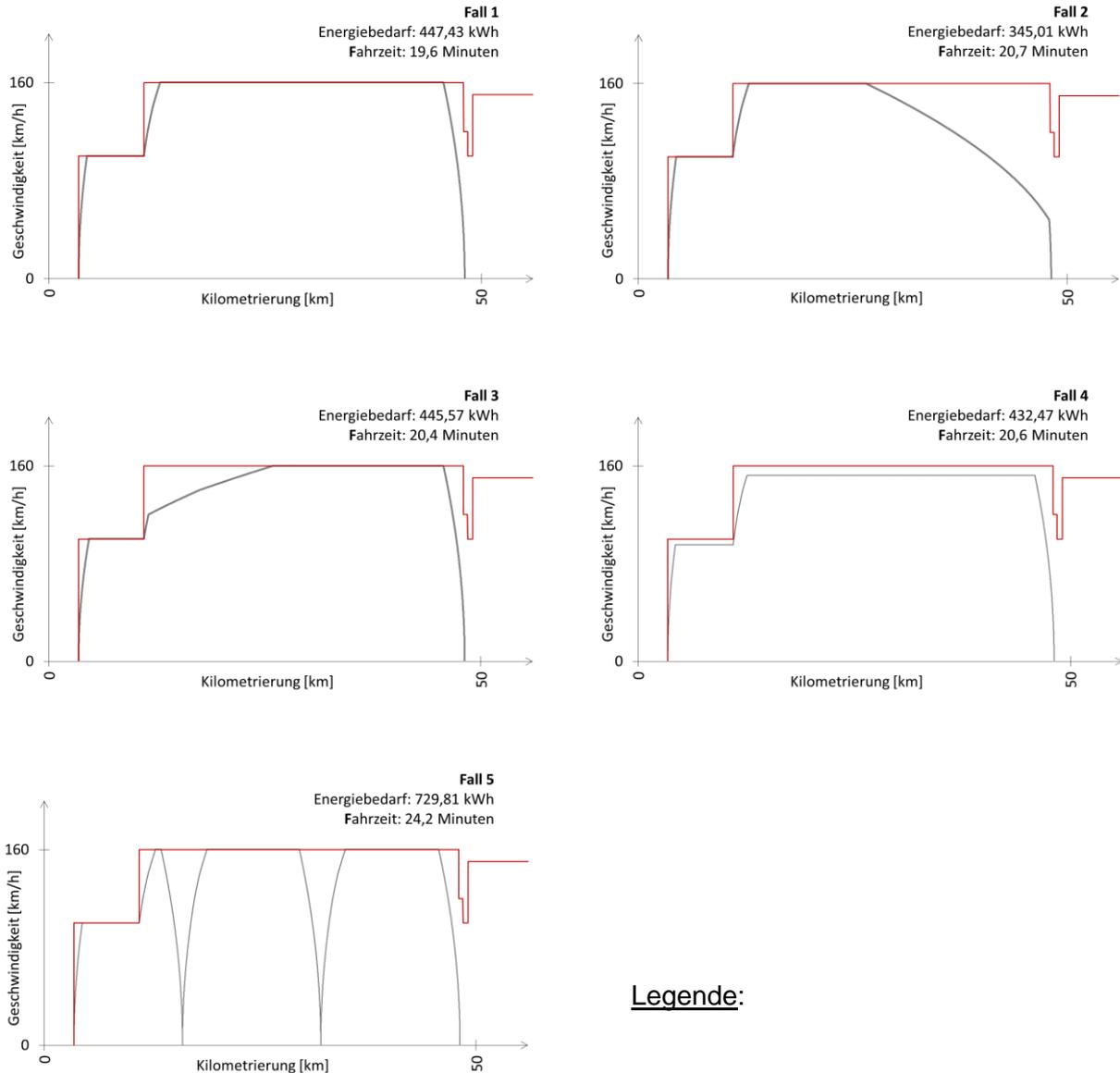
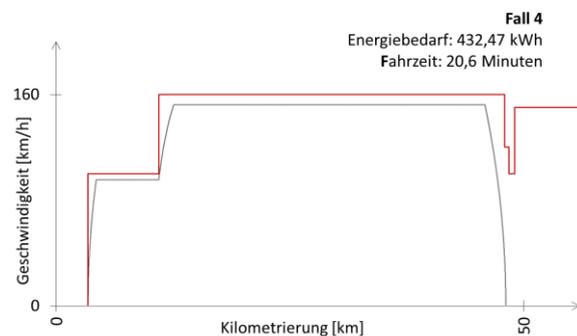
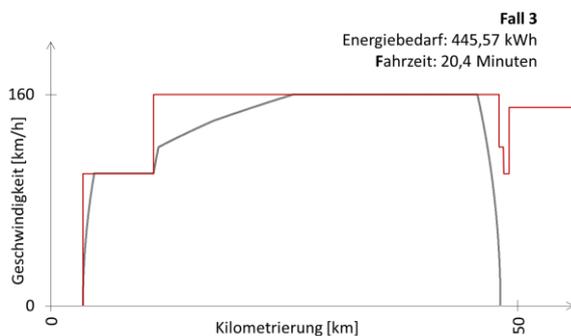
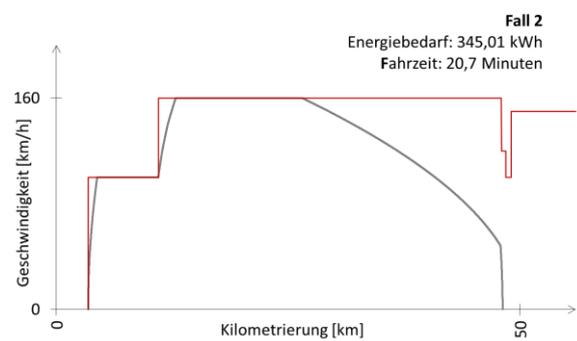
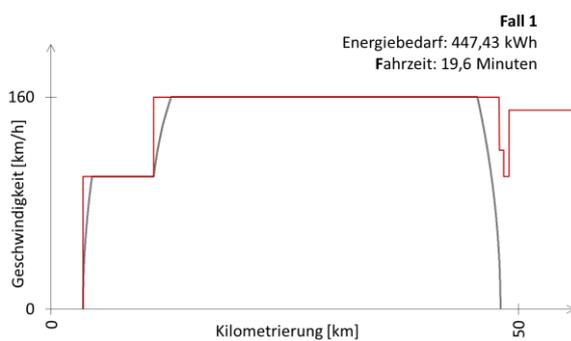


Abbildung 18). Bedingung ist in allen Fällen ein pünktliches Erreichen des Zieles. Dies sind die straffe Fahrweise (Fall 1 bzw. in abgewandelter Form Fall 3 und Fall 4) sowie ein Best-Case (Fall 2) und ein Worst-Case Szenario (Fall 5):

- I Fall 1 - Straffe Fahrweise: Volles Ausschöpfen des VzG und der maximal möglichen Zugkraft mit der Konsequenz, dass das Ziel zu früh erreicht wird. Verspätungen können so aufgeholt werden.
- I Fall 2 - Roll-Optimierung: Bei minimalem Energiebedarf durch Ausrollen wird das Ziel noch

innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit erreicht.

- I Fall 3 - definierte Beschleunigung: Die maximal mögliche Zugkraft wird nicht vollständig ausgenutzt, es erfolgt eine langsamere Beschleunigung
- I Fall 4 - Geschwindigkeitsbegrenzung: Die maximal erlaubte Geschwindigkeit wird nicht vollständig ausgenutzt.
- I Fall 5 - Worst-Case-Szenario: Es kommt zu zwei zusätzlichen unplanmäßigen Halten von je 30 Sekunden. Das VzG sowie die maximal mögliche Zugkraft werden voll ausgeschöpft.



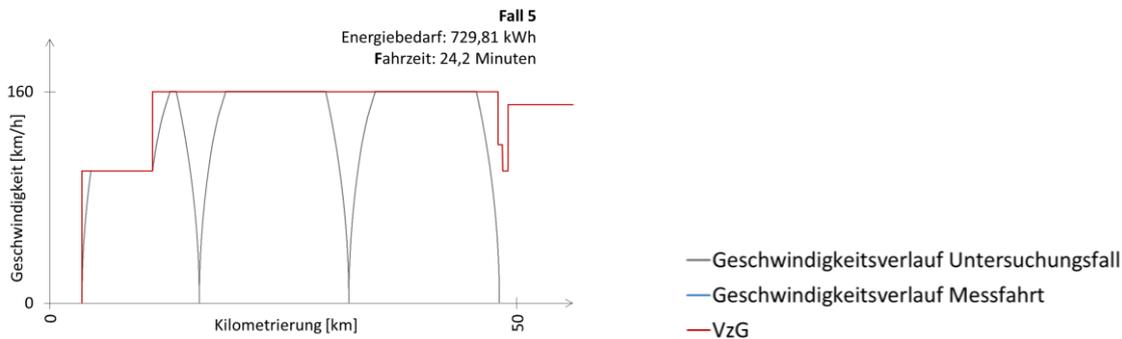


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverläufe der fünf definierten Planfälle

Die Steuerung des Fahrverhaltens durch Triebfahrzeugführer/innen bzw. die Einhaltung eines optimierten Fahrprofils sind wesentlich für die Optimierung des Energiebedarfes. Auf Level GoA1 kann dies durch eine optimierte Disposition bzw. den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen erzielt werden.

3.3.5.3 Rückspeisung

Elektrische Triebfahrzeuge bieten den großen Vorteil der Energierückspeisung ins Netz. Dabei wird die Bremsenergie zu Strom umgewandelt und zurück in das Netz geleitet. Dieser Vorgang wird auch als „Nutzbremse“ bezeichnet. Eine Rückspeisung ist jedoch nur möglich, wenn die Oberleitung fähig ist, die zurückgespeiste Energie aufzunehmen. Diese Grundbedingung ist vor allem in großen Fahrleitungsnetzen gegeben, wo das Netz mit weiteren Zügen belegt ist, die zumeist die zusätzlich auftretende Energie abnehmen.

Im Versorgungssystem selbst treten bei der Rückspeisung unterschiedliche Spannungsphänomene auf. Ein negativer Spannungsabfall wird im Netz hervorgerufen, wohingegen in der Fahrleitung eine Spannungserhöhung auftritt. Ist die Spannungserhöhung in der Fahrleitung zu hoch, kann es zu einer Netzabschaltung kommen, was zur Folge hat, dass die Nutzbremse nicht weiter genutzt werden kann. Die Nutzbremse ist somit netzabhängig und verfügt über folgende Vorteile³⁶:

- I Rückgewinnung der Energie: Auf einem flachen Streckenabschnitt ist diese mit ca. 5-20% eher gering. Bei steileren Streckenabschnitten können ca. 20-50% der Energie rückgewonnen werden. Dieser Wert gilt ebenso für den Nahverkehr mit häufigen Halten.

³⁶ Filipovic, Zarko (2005), Elektrische Bahnen. Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung, Berlin: Springer Verlag.

- I Ableitung der Wärme, die bei überschüssiger Energie entsteht, ist bei der Rückspeisung der Bremsenergie kein Problem mehr, da eine geringere Wärmeentwicklung auftritt.
- I Ohne Bremswiderstände wird die elektrische Ausrüstung leichter.

Für die Rückstromführung werden die Fahrschienen und gegebenenfalls die mit den Fahrschienen parallelgeschalteten Rückleitungsseile verwendet.³⁷

Um verifizieren zu können, welche Maßnahmen der Energiebeeinflussung für die jeweiligen Randbedingungen optimal ist, wird eine Energiebedarfsberechnung benötigt. Diese muss in der Lage sein, den tatsächlichen Energiebedarf von Zugfahrten annähernd abzubilden (Details s. Kap. 4.6).

3.4 Wahl der Versuchsstrecke und netzweiter Migrationsprozess

Um eine automatisierte Disposition validieren zu können bzw. aussagekräftige Ergebnisse ableiten zu können, ist eine Simulation auf einem repräsentativen – betrieblich anspruchsvollen – Streckenabschnitt erforderlich. Um eine solche Strecke auswählen zu können, wurden mehrere Faktoren wie Kapazität und Auslastung, Bedeutung im Zielnetz bzw. im Taktfahrplan sowie die Infrastruktur untersucht.

3.4.1 Kapazität

Hoch belastete bzw. überlastete Bahnstrecken sind vom Infrastrukturbetreiber als solche zu benennen. In den Schienennetznutzungsbedingungen 2018 der ÖBB-Infrastruktur AG wird in Österreich nur ein Streckenabschnitt als „überlastete Infrastruktur“ klassifiziert, dies ist die Strecke von Wien-Meidling nach Mödling:

„Folgender Streckenabschnitt wurde gemäß § 65c Abs. 1 EisebG für überlastet erklärt, wobei gemäß § 67a EisebG in den nachstehend angegebenen Zeiträumen Entgeltzuschläge verrechnet werden: Mödling – Wien Meidling 05:00 – 09:00 Uhr; 15:00 – 19:00 Uhr“³⁸

Entsprechend EU-Recht ist dem langfristig durch Infrastrukturmaßnahmen Abhilfe zu schaffen. Kurz- und mittelfristig kann durch dispositive Maßnahmen eine Verbesserung erreicht werden.

³⁷ Fendrich, Lothar, Fengler, Wolfgang (2013): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Berlin: Springer Verlag.

³⁸ ÖBB-Infrastruktur AG (2017): Schienennetz-Nutzungsbedingungen 2018 der ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.

Einen weiteren Hinweis auf hoch ausgelastete Bahnstrecken liefert die Verkehrsprognose 2025+³⁹. Basierend auf der Bestandsinfrastruktur 2009 wurde die Kapazitätsauslastung für das Jahr 2025 bei Bestandsinfrastruktur bzw. Zielnetz gegenübergestellt.

Die Bahnstrecken werden hier in drei Klassen unterteilt:

- I Kapazitätsauslastung <80% (Kennfarbe grün)
- I Kapazitätsauslastung >80% bzw. <100% (Kennfarbe gelb)
- I Kapazitätsauslastung >100% (Kennfarbe rot)

Wie in Abbildung 19 ersichtlich, sind die Streckenabschnitte Wien Liesing – Wien Meidling bzw. Gloggnitz –Mürzzuschlag bei Bestandsinfrastruktur rot gekennzeichnet. Bei Umsetzung des Zielnetzes 2025+ reduziert sich die Auslastung, da mittelfristig mit dem Ausbau der Pottendorfer Linie bereits Infrastrukturmaßnahmen eingetaktet sind. Bis zur Inbetriebnahme der Pottendorfer Linie ist aufgrund der hohen Auslastung eine Steigerung der Kapazität im Verspätungsfall anzustreben.

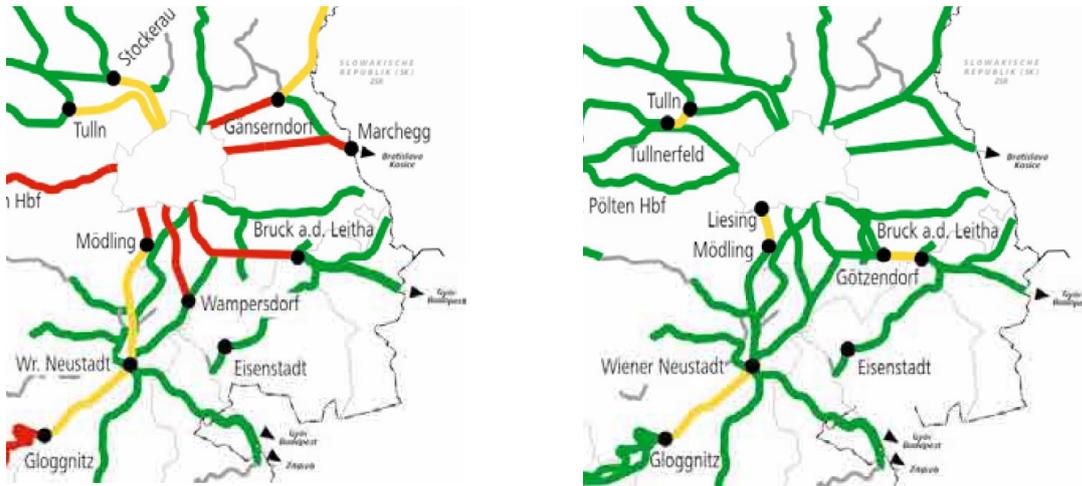


Abbildung 19: Zielnetz 2025+ mit Stand Infrastruktur 2009 (links) und 2025 (rechts)⁴⁰

³⁹ ÖBB-Infrastruktur AG (2011), Zielnetz 2025+, Wien.

⁴⁰ ÖBB-Infrastruktur AG (2011), Zielnetz 2025+, Wien.

3.4.2 Kantenzzeit

Das Zielnetz 2025+ stellt die oberste Ausbaurichtlinie für Eisenbahninfrastruktur in Österreich dar und weist Zielkantenzzeiten für das Kernnetz der ÖBB Infrastruktur AG auf. Die Kantenzzeit für die Strecke Wien-Meidling beträgt 30 Minuten (Abbildung 20). Die aktuelle Fahrzeit Wien Hbf. – Wiener Neustadt im Fernverkehr beträgt 30 Minuten, Wien-Meidling – Wiener Neustadt 23 Minuten. Eine exakte Einhaltung der Fahrzeit ist erforderlich, um beide Taktknoten bedienen und Umsteigemöglichkeiten planmäßig anbieten zu können. Verspätungen wirken sich auf dieser Strecke unmittelbar auf die Umsteigequalität aus und sind jedenfalls zu vermeiden.

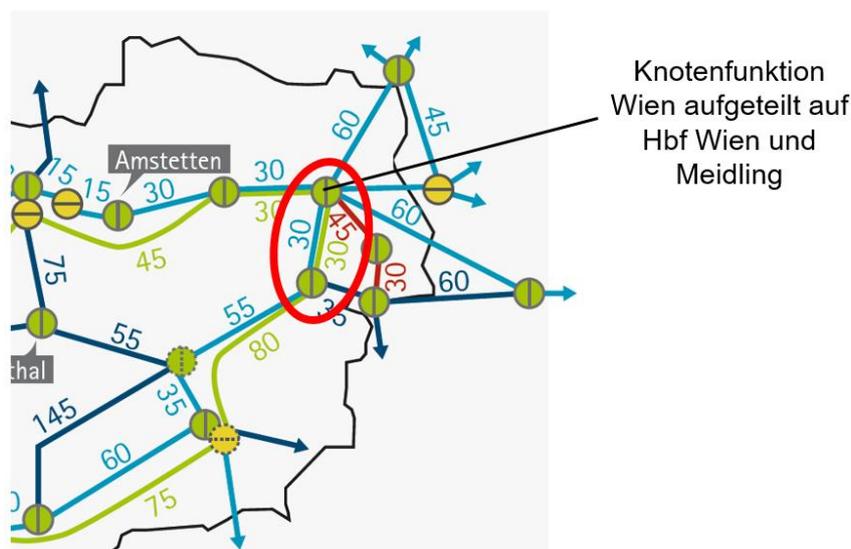


Abbildung 20: Strecke Wien-Wiener Neustadt im Knoten-Kanten-Modell⁴¹

3.4.3 Zugmix

Zusätzlich zur hohen Auslastung ist dieser Streckenabschnitt für die vorliegende Studie insbesondere aufgrund der vielfältigen Zuggattungen, welche hier im Einsatz sind, interessant.

Auf der Strecke Wien – Wiener Neustadt verkehren alle relevanten Zuggattungen von Personen- und Güterverkehr:

- I Nahverkehr (S-Bahn)

⁴¹ Bmvit, Grafiken Gesamtverkehrsplan: <https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/gvp/grafiken/grafiken/> [Abruf am 02.08.2018]

- I Regionalverkehr (R, REX)
- I Fernverkehr (IC, EC, RJ)
- I Güterverkehr

Die konkreten Zuggattungen sind in Abbildung 21 ersichtlich.



Abbildung 21: Zuggattungen im betreffenden Streckenabschnitt

Anders als auf der viergleisigen Weststrecke wird der Betrieb gebündelt auf der zweigleisigen Strecke abgewickelt.

3.4.4 Infrastruktur

Die Strecke weist relativ homogene Infrastrukturverhältnisse auf. Gleichmäßige (große) Bogenradien erlauben Höchstgeschwindigkeiten bis 160 km/h. Die Längsneigung beträgt max. 8,0‰ und es treten nur selten Neigungswechsel auf. Trotz der homogenen Streckencharakteristik gibt es entlang der Strecke in regelmäßigen Abständen Bahnhöfe bzw. Überholstellen, die verschiedenste Dispositionsmaßnahmen zulassen (Abbildung 22).

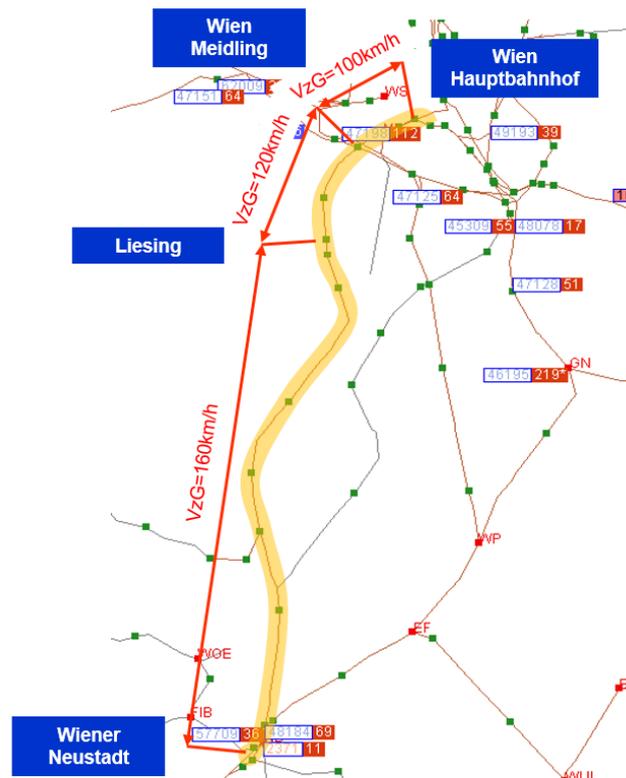


Abbildung 22: Lage der Versuchstrecke (gelb) im Netz der ÖBB-Infrastruktur AG

Nachfolgend sind alle Bahnhöfe der Strecke Wiener Neustadt – Wien Hauptbahnhof mit der jeweiligen Anzahl von durchgehenden Gleisen aufgelistet (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

- I Wiener Neustadt (11 Gleise)
- I Felixdorf (5 Gleise)
- I Leobersdorf (7 Gleise)
- I Bad Vöslau (6 Gleise)
- I Pfaffstätten (4 Gleise)
- I Mödling (4 Gleise)
- I Brunn Maria Enzersdorf (4 Gleise)
- I Liesing (5 Gleise)
- I Liesing Frachtenbahnhof (7 Gleise)
- I Wien Meidling (5 Gleise)
- I Wien Matzleinsdorfer Platz (4 Gleise)
- I Wien Hauptbahnhof (11 Gleise; ohne Stammstrecke; 1 Gleis nicht relevant für Meidling)

In Summe stehen auf der knapp 50 km langen Strecke 12 Bahnhöfe mit 4 bis 11 möglichen Fahrwegen zu Verfügung.

4 Entwicklung der Dispositionsalgorithmen

4.1 Einleitung

Zur Entwicklung der Dispo-SIM Dispositionsalgorithmen wurden folgende Elemente analysiert und anschließend in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM) umgesetzt:

- Fahrstraßen
- Fahrstraßen-Elemente
- Spurplanknoten
- FsDWeg

Zur Vorbereitung der Dispositions-Algorithmen erfolgte zunächst die Aufbereitung des von ÖBB bereitgestellten Datenmaterials.

4.2 Datensätze zur Simulationsimplementierung

Für die Arbeiten in AP 4 und AP 5 wurden umfangreiche Datensätze als Inputdaten benötigt, die in Zusammenarbeit mit den ÖBB spezifiziert und von den ÖBB zusammengestellt und übermittelt wurden.

Folgende Daten wurden übermittelt, durch USBG aufbereitet und verarbeitet:

- 20.11. 2017: Streckendaten ÖBB, public (KML-Format, ESRI-Format)
- 05.12. 2017: Dispositionsregeln ÖBB (PDF-Format)
- 18.12. 2017: ARAMIS-I – Infrastrukturdaten (ASCII-Format)
- 22.12. 2017: Fahrpläne (XML-Format)
- 09.01. 2018: Weichenkonnektivität (PDF-Format) + ARAMIS (Excel-Format)
- 22.02. 2018: Fahrzeugdaten (Docx-Format)
- 03.05. 2018: VZG Streckendaten Wien – Wr. Neustadt (mit Geo-Koordinaten)
- 18.06. 2018: Weichen-Daten Wien – Wr. Neustadt (mit Geo-Koordinaten)
- 17.12. 2018: Tagesfahrplanänderungen 1
- 24.12. 2018: Tagesfahrplanänderungen 2
- 04.01. 2019: Fahrstraßen 1: ersetzt durch Zuglaufmeldungen
- 22.01. 2019: Fahrstraßen 2: ersetzt durch Zuglaufmeldungen
- 30.01. 2019: Zuglaufmeldungen (3. – 7. Dez. 2018)

4.3 Analyse und Umsetzung Streckengleis (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)

Auf Basis der zur Verfügung gestellten ARAMIS-Daten wurden analysiert:

- Analyse und Umsetzung der Fahrstraßen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
- Analyse und Umsetzung der Fahrstraßen-Elemente in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
- Analyse und Umsetzung der Spurplanknoten in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
- FsDWeg derzeit unberücksichtigt

Sobald einzelne Datensätze verfügbar waren, wurden diese im Detail im Hinblick auf Format und Inhalt analysiert und in den Simulator NAVSIM-RAIL integriert.

Diese Umsetzung erfolgte in folgenden Schritten:

- Analyse und Integration von VZG-Daten:
 - Analyse und Umsetzung Streckengleis (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
 - Analyse und Umsetzung der Signale (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
 - Analyse und Umsetzung der Weichen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
- VZG – Visualisierung der Streckengleise und Signale in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)
- VZG – Visualisierung der Weichen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)

Es wurde festgestellt, dass es keine gemeinsamen Referenzen bezüglich VZG- und ARAMIS-Daten gibt (ausgenommen die Namen der Strecken-, Bahnhofsgleise, Weichen und Signale). In der weiteren Folge wird daher ein "Mapping" (Cross-Referenz) zwischen VZG und ARAMIS Daten erstellt, um einen schnellen Datenzugriff und eindeutige Zuordnungen aus beiden Datensätzen zu ermöglichen.

Abbildung 24 bis Abbildung 27 zeigen einige Beispiele der NAVSIM-RAIL Implementierung. Zur Visualisierung kann jeder relevante Bereich (durch "Mausklick") ausgewählt und in diesen hinein-/hinaus "gezoomt" werden (Mausrad).

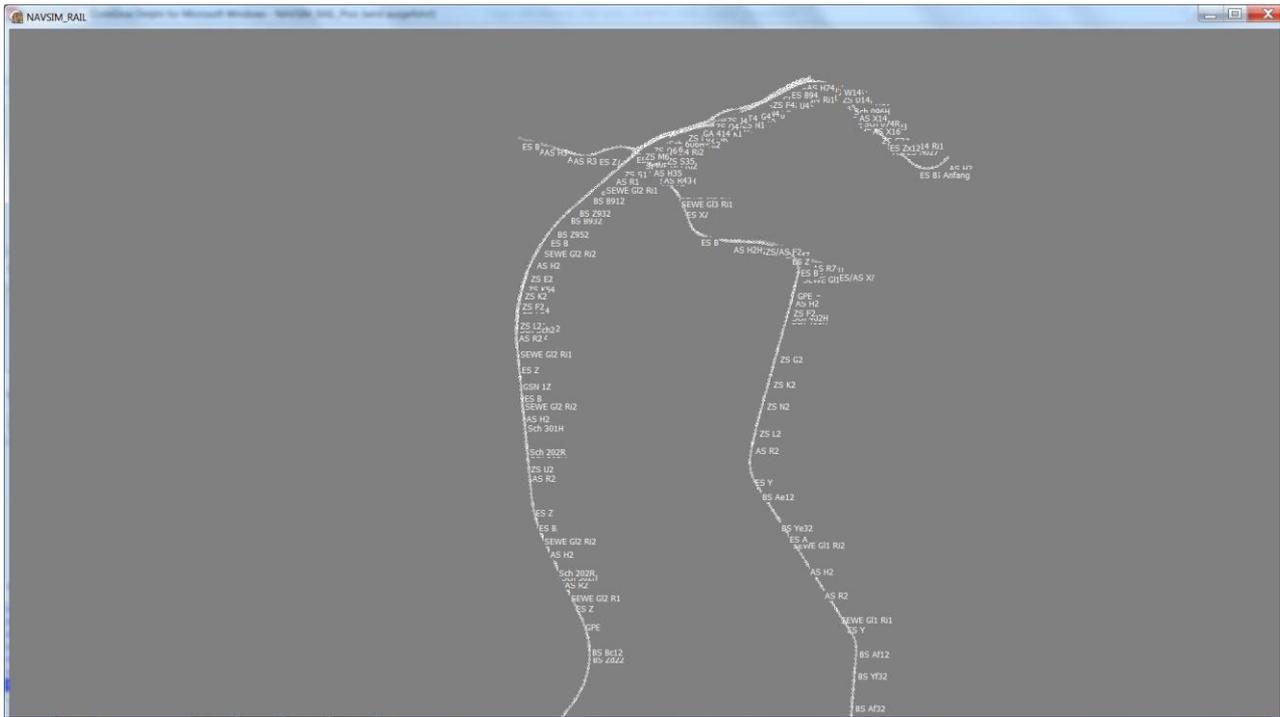


Abbildung 24: Wien Hauptbahnhof bis Mödling: Beispiel eines Streckengleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (DS)

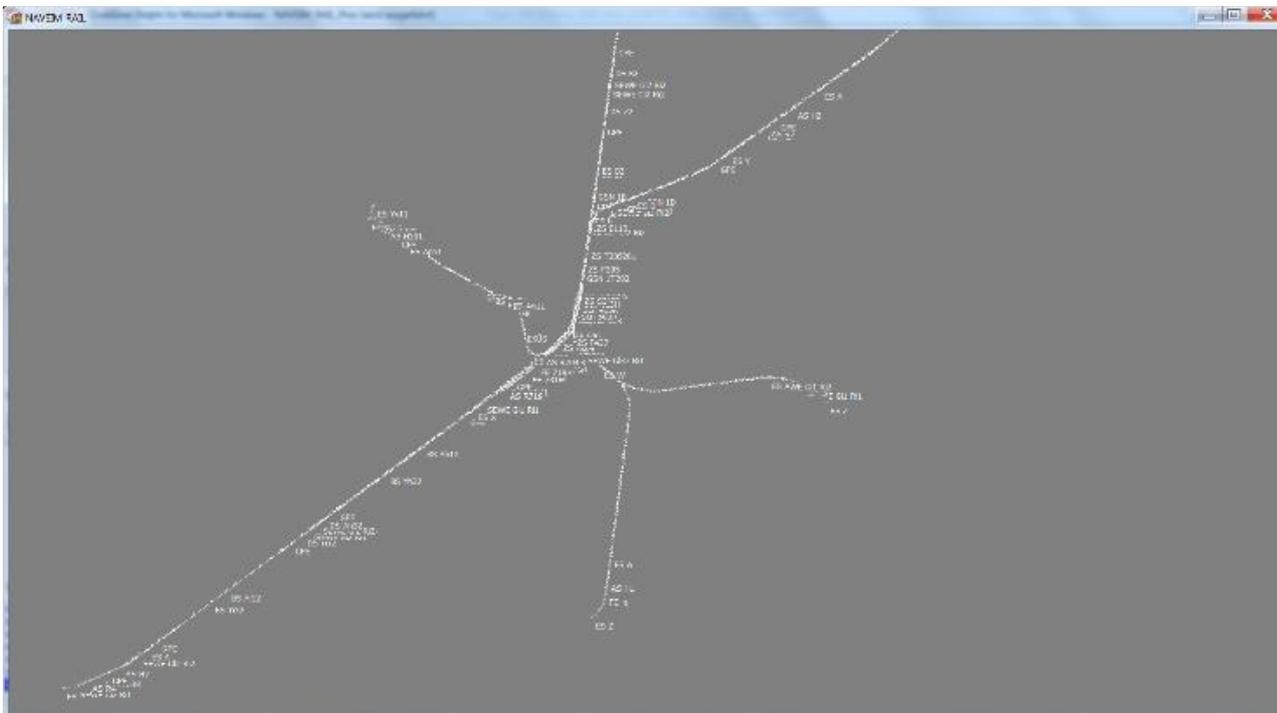


Abbildung 25: Wr. Neustadt und Umgebung: Beispiel eines Streckengleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (DS)



Abbildung 26: Wien Hauptbahnhof (Wbf): Beispiel eines Bahnhofsgleises – Implementierung mit Geo-Koordinaten; Darstellung der eingestellten und der bereits zurückgelegten Fahrstraße sowie die aktuelle Belegung durch die Zugfahrt; Visualisierung: NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)

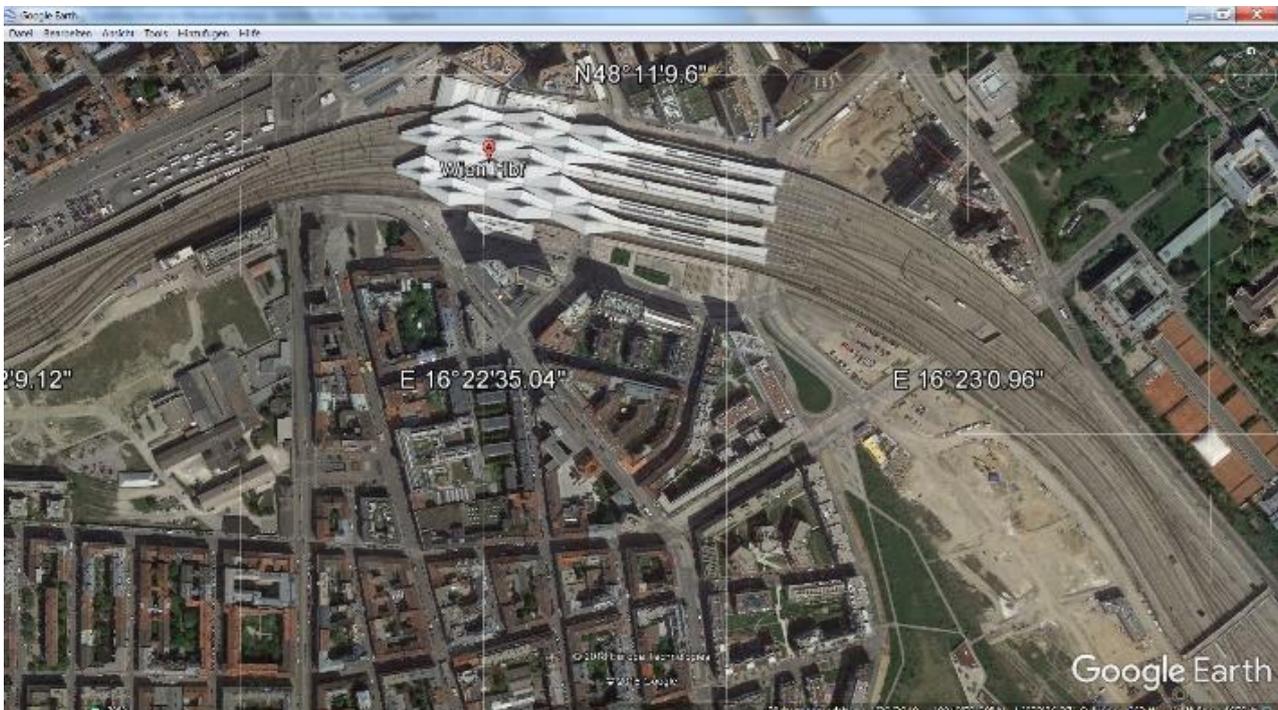


Abbildung 27: Vergleich mit fotorealistischer Darstellung von Gleisen; Bildquelle: Google Earth

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



4.4 Analyse und Umsetzung der Signale (Geo-Koordinaten) in NAVSIM-RAIL

Die Signale wurden den von ÖBB Infra zur Verfügung gestellten VzG-Daten, die neben der Bezeichnung u.a. auch die geographischen Positionen (latitude / longitude) der Signale enthalten, entnommen.

Zur Auswahl / Freischaltung von "Fahrstraßen" / "Zugstraßen" erfolgt eine Visualisierung ("defaultmäßig") von:

- Hauptsignal / Zugfahrt (AS/ES/ZS)
- Blocksignal (BS)
- Deckungssignal (DS)
- Gruppenausfahr-/Gruppensignal (GAS/GS)
- Schutzsignal (Sch)
- Zugzielpunkt (ZE/ZVE)
- Zustimmung (ZU)

Bei Bedarf kann auch die Darstellung der Vorsignale (VS) und Verschubsignale aktiviert werden.

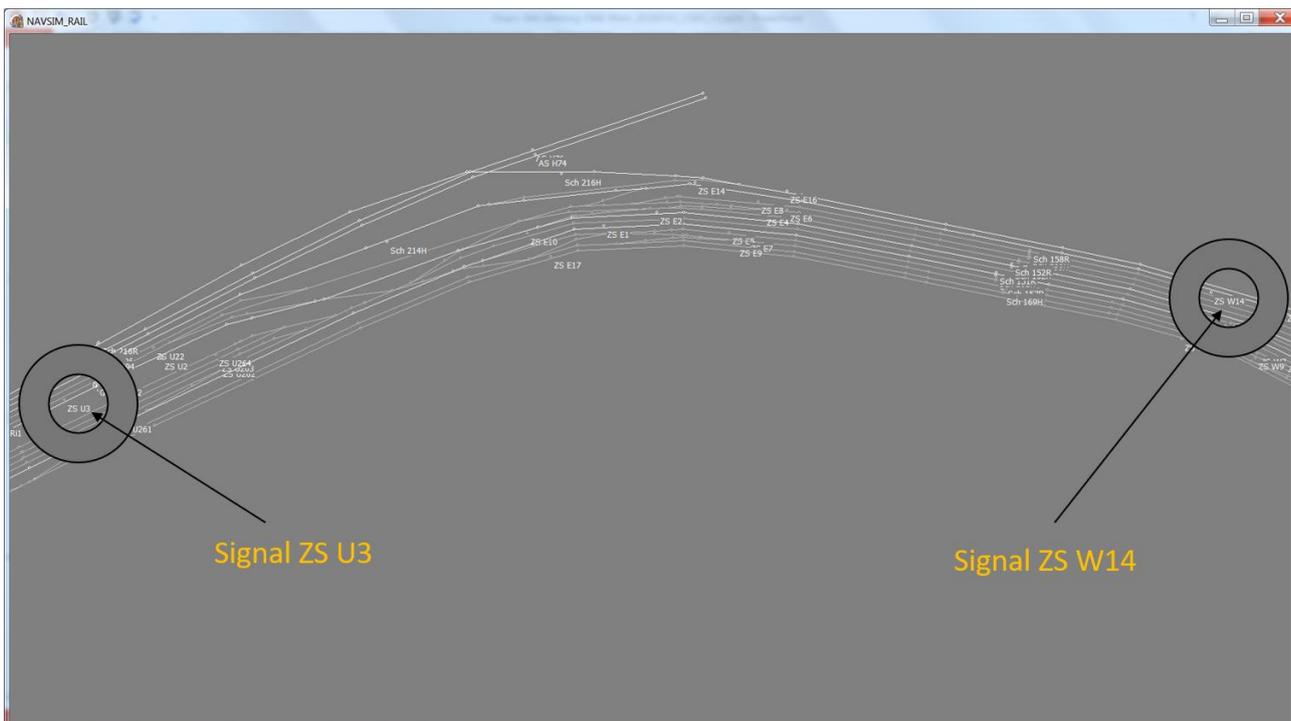


Abbildung 28: Beispielhafte Umsetzung von Signalen; Bildquelle NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM), USBG

Durch eine einheitliche Namensgebung in den VzG-Daten und in den ARAMIS-Daten konnte eine Verknüpfung zwischen diesen beiden Datensätzen hergestellt werden.

Anmerkung: für die Zukunft wird empfohlen, ein einheitliches Identifizierungssystem (über eine gemeinsame ID) für diese Datensätze (betreffend: Gleise, Signale, Weichen, etc.) zu erstellen und umzusetzen.

In NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM) wurden zunächst nur Hauptsignale berücksichtigt. Vorsignale bzw. Verschubsignale und andere Infrastrukturkomponenten (z.B. PZB-Magnete, etc.) können in NAVSIM-RAIL zwar optional visualisiert werden, spielen in den weiteren Dispositionsberechnungen aber keine Rolle.

Eine Fahrstraßenberechnung erfolgt immer von einem Startsignal (Hauptsignal) zu einem Zielsignal (Hauptsignal bzw. Zustimmung bzw. Zugzielort bei Kopfgleisen).

Anmerkung: Um eine exakte Fahrstraßenberechnung von Startsignal zu Zielsignal sowie eine georeferenzierte Visualisierung der Fahrstraße zu ermöglichen, wurden zu den VzG-Gleiskoordinaten durch NAVSIM-RAIL zusätzliche Gleiskoordinaten ("ABEAM_Signal") eingefügt, die der Signalposition am Gleis (im rechten Winkel) entsprechen.

4.5 Analyse und Umsetzung der Weichen in NAVSIM-RAIL

Zur Dispositionsberechnung auf Basis der ausgewählten "Fahrstraßen" / "Zugstraßen" ist eine detailgenaue Kenntnis bezüglich der Weichen und deren Merkmale (Position, Bogenradius, Höchstgeschwindigkeiten, etc.) erforderlich.

Bei Bedarf kann die detailgenaue Position und Bezeichnung der Weichen in NAVSIM-RAIL visualisiert werden (derzeit in Abhängigkeit des Zoomfaktors).

Dabei erfolgt die Darstellung – aus Gründen der Übersichtlichkeit – prinzipiell in folgender Form:

- Weichen mit der Position ihres "Herzstücks" (Bezeichnung "WeichenID_L1")
- Doppelte Kreuzungsweichen mit der Position des Kreuzungspunktes der Schienenstränge (Bezeichnung "Kreuzungsweicheld_KP")

Bei Bedarf können sämtliche Positionen dargestellt werden, bei Weichen:

- L1-Koordinate
- L2-Koordinate
- R2-Koordinate

Weichen - Geokoordinaten

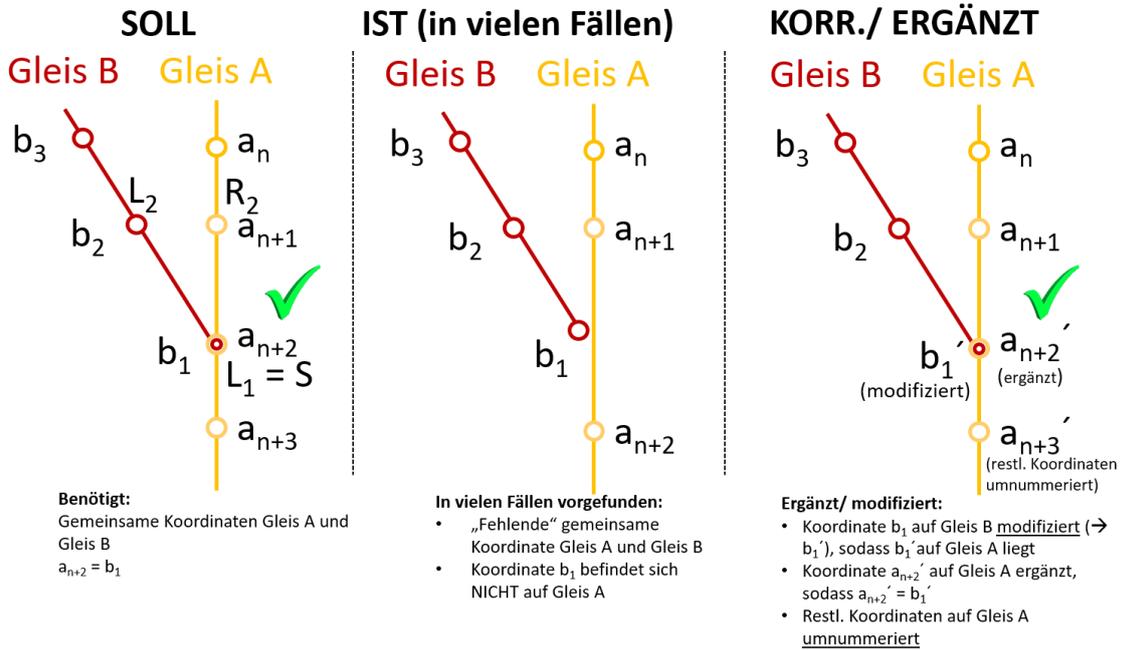


Abbildung 30: Umsetzungskonzept ergänzter Weichen (Geo-Koordinaten)

Kreuzungsweichen - Geokoordinaten

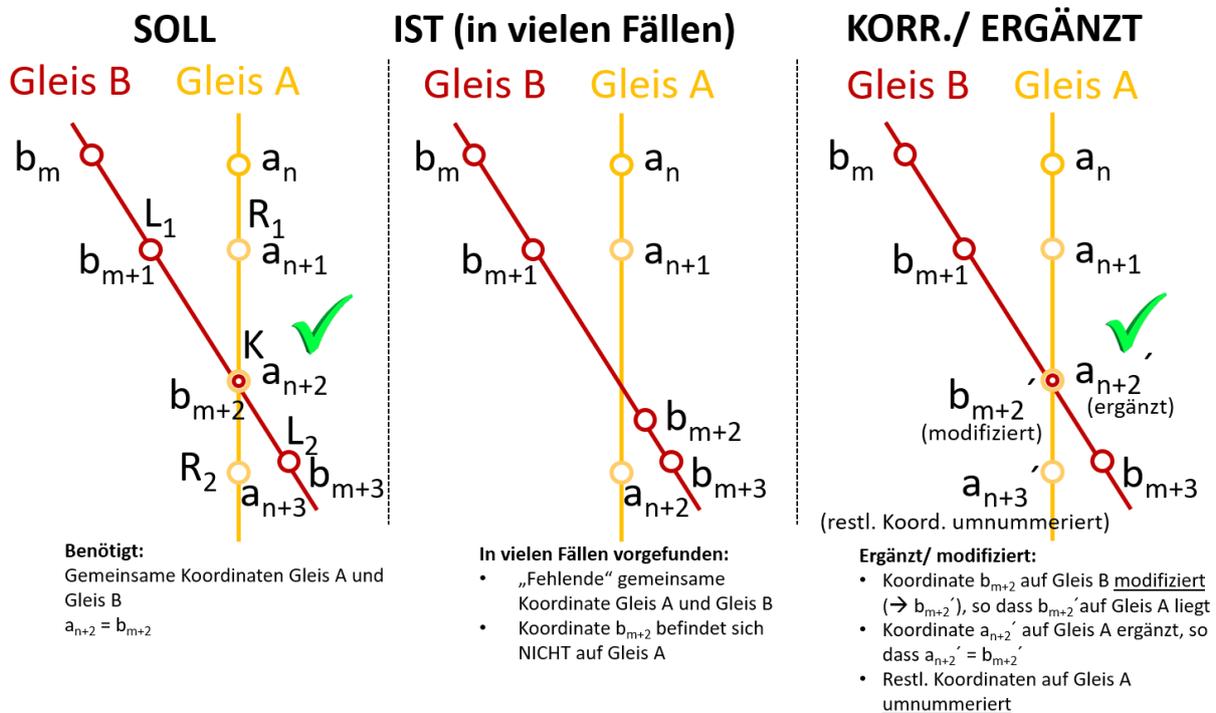


Abbildung 31: Umsetzungskonzept ergänzter Kreuzungsweichen (Geo-Koordinaten)

Abbildung 32 bis Abbildung 36 zeigen Umsetzungsbeispiele der Implementierung von Weichen und Fahrstraßen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM).

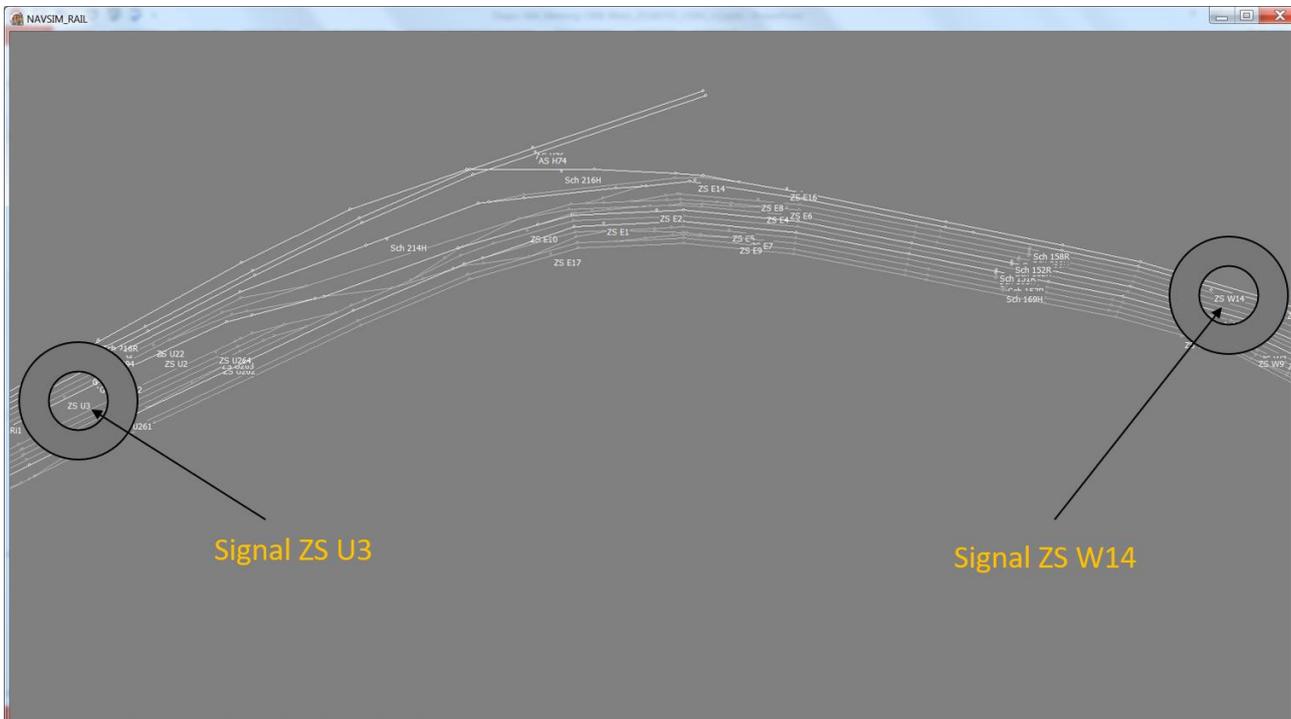


Abbildung 32: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)

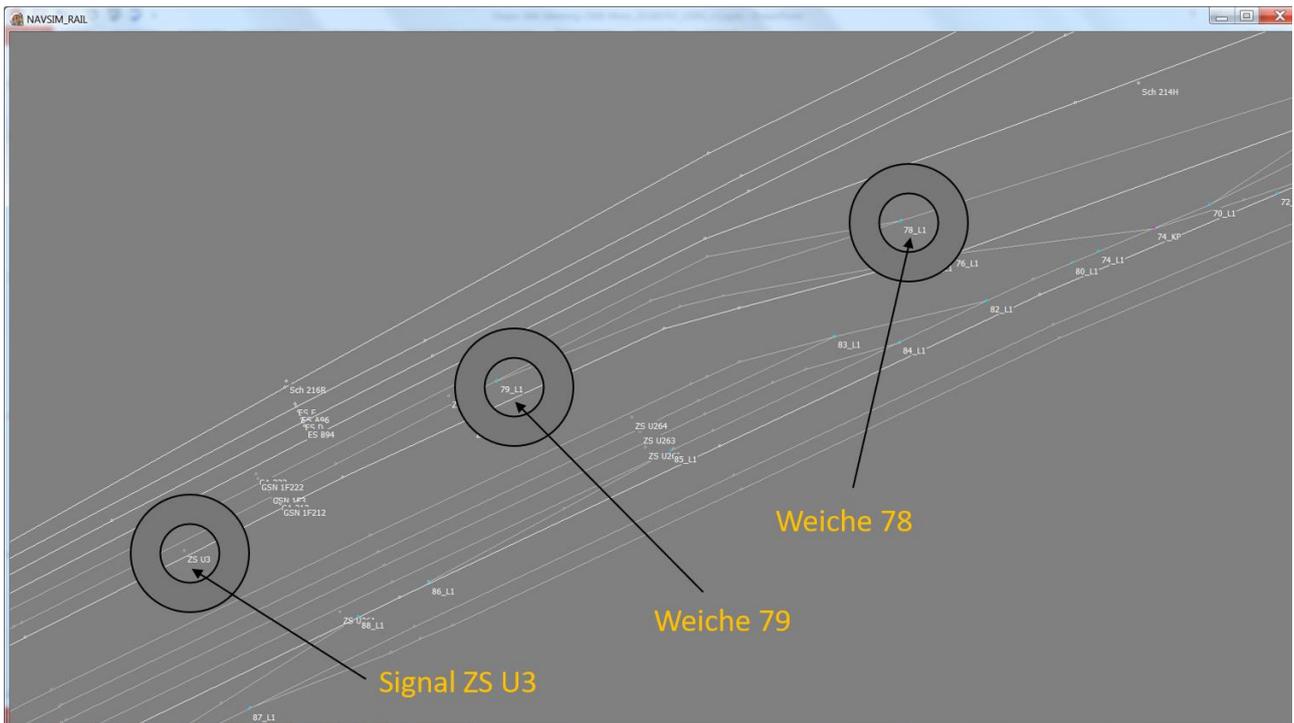


Abbildung 33: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)

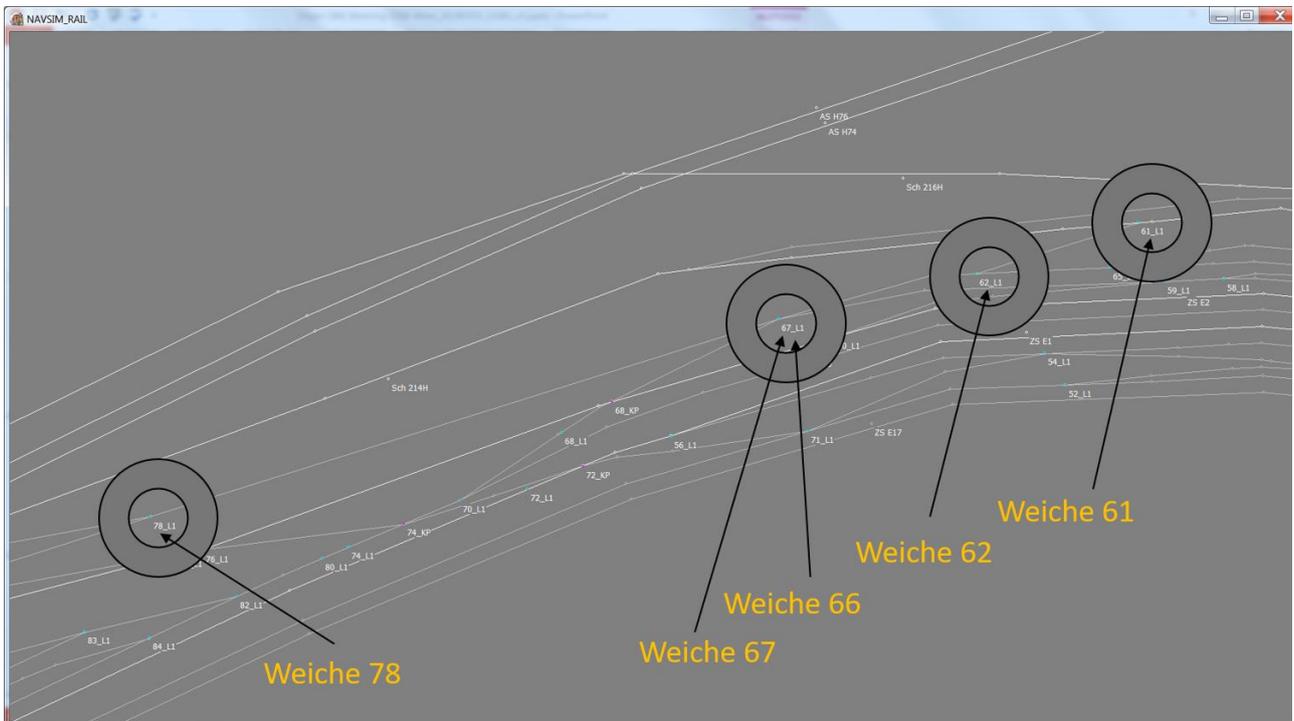


Abbildung 34: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14 (NAVSIM-RAIL Dispo-SIM)

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



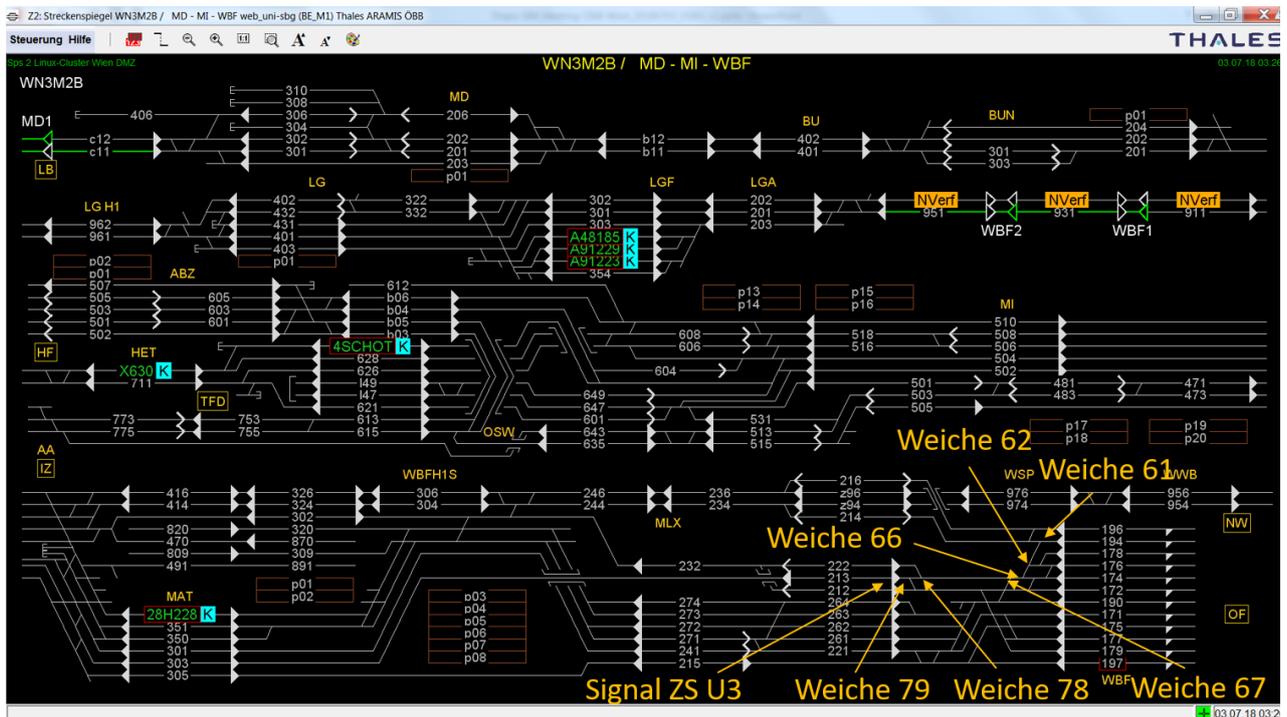
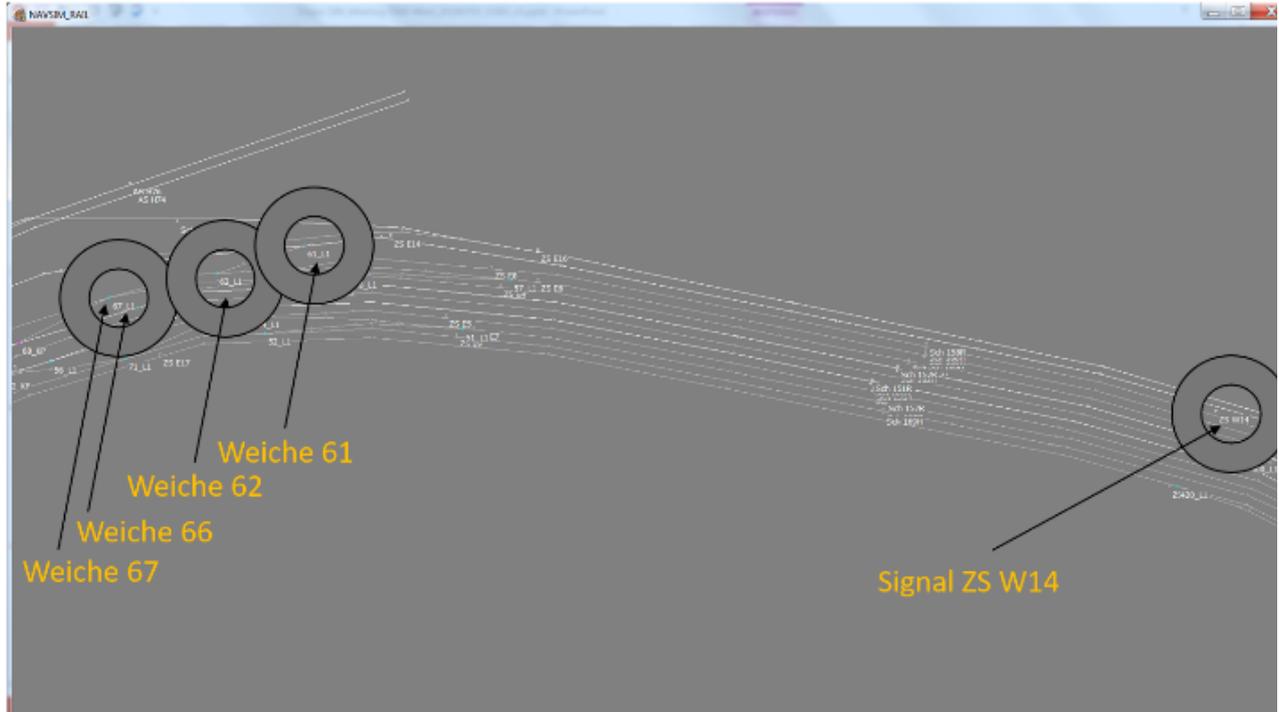


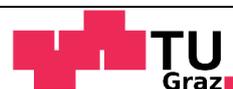
Abbildung 35: VZG Wien Hauptbahnhof - Fahrstraße ZS U3 – ZS W14: Implementierung in NAVSIM-RAIL Dispo-SIM (oben) und Bezug der Weichen und Signale in ARAMIS

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft

61 / 85

```

" <zugstr vzg_id="2186984" schutzzw_id="10589" schutzzw="ZS" zugstart="V2" zschlst_baukms_nr="356" zschlst_km=".231" zschlst_laenge="387"
rs="A">
" <sig_von sig_id="2189834" sig_name="ZS U3" sig_art_id="10039" sig_art="ZS" sichan_id="40674" siggr_id="136720" siggr_name="Wbf-ZS-2,1-
U-10501,12201" baukms_nr="5" km=".849" richtung="2" im_wbereich="N" siggeschw="50" bst_id="2393" bst_kurzbez="Wbf" bst_name="Wbf"
bst_art_id="971295" bst_art="BF"/>
" <sig_bis sig_id="2194952" sig_name="ZS W14" sig_art_id="10039" sig_art="ZS" sichan_id="40983" siggr_id="136724" siggr_name="Wbf-ZS-1,2-
W-11601,10501" baukms_nr="357" km="100.103" richtung="1" bst_id="2393" bst_name="Wbf" bst_kurzbez="Wbf" bst_art_id="971295"
bst_art="BF"/>
" <zschlst sig_id="2194952" sig_name="ZS W14" sig_art_id="10039" sig_art="ZS" sichan_id="40983" siggr_id="136724" baukms_nr="356"
km=".231" richtung="1" bstglaenge_vor_sig="382"/>
" <massneig vzg_id="2109694" neigung="-11" bwl="1000" neigungrelevant="-9" bwlrelevant="800" geschw_bis="50" rs="A">
" <sig_vs sig_id="2189836" sig_name="VS w" sig_art_id="35402" sig_art="VS" sichan_id="40674" baukms_nr="5" km=".849" richtung="2"/>
" </massneig>
" <fwelemente>
" <fwelement el_art="G" el_id="78883"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="17486" befwlage_id="10616" befwlage="L1 - L2"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="78881"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="17468" befwlage_id="10643" befwlage="L2 - L1"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="78841"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="17466" befwlage_id="10644" befwlage="R2 - L1"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="17456" befwlage_id="10616" befwlage="L1 - L2"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="78829"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="17454" befwlage_id="10616" befwlage="L1 - L2"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="83061"/>
" <fwelement el_art="W" el_id="18290" befwlage_id="10643" befwlage="L2 - L1"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="88520"/>
" <fwelement el_art="G" el_id="88422"/>
" </fwelemente>
" </zugstr>

```

Abbildung 36: Implementierung von Fahrstraßen in NAVSIM-RAIL (Dispo-SIM)

4.6 Tool zur Energieberechnung

Anhand einer praxisnahen Energieberechnung wird in weiterer Folge gezeigt, welche Auswirkungen unterschiedliche Fahrstrategien auf dem Streckenabschnitt zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt auf den Energiebedarf haben. Dieser Abschnitt wurde als geeignete Versuchsstrecke identifiziert.

Als Grundlage der Energieberechnung dient ein Energieberechnungsprogramm, welches mit Visual Basic in Microsoft Excel programmiert wurde und für die Strecke Wien Meidling – Graz Hauptbahnhof verifiziert werden konnte⁴². Der Energiebedarf eines beliebigen Zuges auf einer beliebigen Strecke kann durch die Umlegung der bei einer Zugfahrt auftretenden Widerstände auf die dafür erforderlich aufzuwendende Energie berechnet werden. Aufgrund möglicher Abweichung zur Realität sind die Berechnungen als Annäherungsmodell zu sehen.

4.6.1 Methodik

Zur Erstellung einer aussagekräftigen Berechnung für den Energiebedarf wurde die folgende Methodik angewandt:

- I Entwicklung einer annähernd realgetreuen Berechnung des Energiebedarfs.
- I Validierung der Berechnungsmethodik anhand einer realen Energiemessung.
- I Berechnung des Energiebedarfs anhand der oben definierten fiktiven Planfälle.
- I Ermittlung des theoretischen Potentials: Die fiktiven Szenarien wurden mit den tatsächlichen gemessenen Energiekennzahlen der drei ausgewählten Zugfahrten verglichen und analysiert.

Die Validierung der Berechnung erfolgte anhand von drei Railjet-Fahrten von Wien-Meidling nach Graz Hauptbahnhof aus dem Jahr 2013, deren Energiebedarf mittels RailwayBox aufgezeichnet wurde.

4.6.2 Ablauf der Energiebedarfsrechnung

Bei der Bemessung des Energiebedarfes werden sowohl variierende Eingangsparameter als auch fixe Randbedingungen, wie die geometrischen Bedingungen einer Beispielstrecke bzw. das

⁴² Messner, Melanie (2014): Berechnung des Energieverbrauches für Triebfahrzeuge, TU Graz.

dazugehörige Verzeichnis der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, berücksichtigt. Alle für die Berechnung benötigten Kräfte, die auf einen fahrenden Zug wirken, werden bestimmt, wodurch sich die für die Berechnung benötigten Eingabeparameter ergeben. Mit Hilfe einer Beispielfahrt und deren Randbedingungen wird eine mathematische Abbildung erstellt.

Für die Ermittlung des Energiebedarfs werden zuerst physikalische Grundlagen herangezogen, also sämtliche Kräfte, die seitens der Widerstände eines sich fortbewegenden Schienenfahrzeuges auftreten. Die fahrzeugabhängigen und streckenabhängigen Widerstände (Abbildung 37) wurden mit Hilfe von ÖBB-Daten und Fachliteratur ermittelt und zu einem Gesamtwiderstand, dem Fahrwiderstand, zusammengefasst.

4.6.3 Widerstände

Eine Zugfahrt ist eine geradlinige, fortschreitende Bewegung. Das Fahren wird dabei von inneren und äußeren Störeinflüssen geleitet, worunter sich bekannte und unbekannte Faktoren befinden. Im Allgemeinen werden darunter jegliche Widerstände, die auf einen sich fortbewegenden Zug wirken, verstanden. Die Widerstände ergeben sich aus verschiedensten Randbedingungen, die beim Anfahren, beim Fahren selbst bzw. beim Bremsen des Schienenfahrzeuges auftreten können.

Aus allen Einflussfaktoren ergibt sich ein Kräftespiel in horizontaler und vertikaler Ebene. Die daraus resultierende Bewegung des gesamten Zuges wird für die Bestimmung verschiedener Bedarfe einer Zugfahrt benötigt. Darunter fällt auch der Energiebedarf bzw. –verbrauch. Der Gesamtwiderstand, der sich durch die Bewegung eines Zuges auf der Trasse ergibt, wird Fahrwiderstand genannt. Dieser Fahrwiderstand wird durch verschiedene Randbedingungen beeinflusst, die einerseits durch das Fahrzeug, andererseits durch die befahrene Strecke entstehen. Neben den Fahrzeug- und Streckenwiderständen beinhaltet der Fahrwiderstand weitere Widerstände, die sich aus unterschiedlichsten Einflussfaktoren bzw. Einwirkungen auf den Zug ableiten lassen. Bildet man nun die Summe aller auf den Zug entgegen der Fahrtrichtung wirkenden Kräfte, erhält man den Fahrwiderstand (Gesamtwiderstand), welcher über die Länge den Energiebedarf ergibt (Abbildung 37).

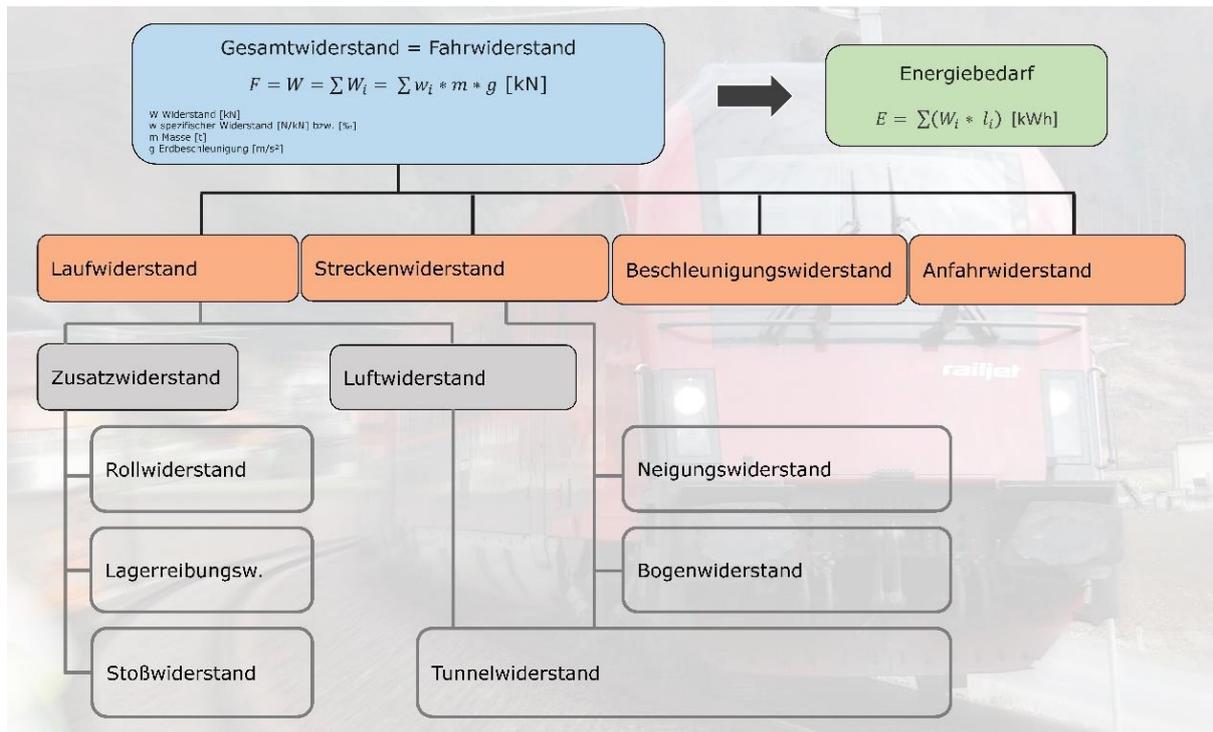


Abbildung 37: Eingangsparameter der Energieberechnung

Im Folgenden wird eine theoretische Fahrt auf der Strecke Wien Meidling – Graz Hauptbahnhof berechnet. Die geometrischen Randbedingungen sind mit dem Radien- und Neigungsverzeichnis dieser Trasse fixiert. Die Werte der Zugausstattung, die in diesem Beispiel verwendet werden, entsprechen einem Railjet.

Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung der Verteilung und Größe der einzelnen Widerstände. Die Eingangsparameter für die Berechnung des Energiebedarfs sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

	Achslager	Wälzlager	
	Ausfahren des VzG	80 %	
	Gewicht Triebfahrzeug	86 t	
	Gewicht Wagen	393 t	
	Haltestelle0: Wien Meidling	Km 3.435	3 min
	Haltestelle1: Wiener Neustadt	Km 48.120	3 min
	Haltestelle2: Mürzzuschlag	Km 116.730	2 min
	Haltestelle3: Kapfenberg	Km 153.650	1 min
	Haltestelle4: Bruck/ Mur	Km 157.860	2 min
	Haltestelle5: Graz	Km 211.540	10 min
	Laufwerktyp	Drehgestell	
	Mittelwert Nebenverbrauch	3 kWh/min	
	Mittelwert Personengewicht	75 kg	
	Personenbesetzungsgrad	100 %	
	Rückspeisung	20 %	
	Sitzplätze	411 Stk.	
a	Beschleunigung	0,4 m/s ²	
D	Raddurchmesser	0,92 m	
e	Hebelarm der Rollreibung	0,6 mm	
G	Gewichtskraft	5001,38 kN	
K	Bogenwiderstandskoeffizient	750	
l	Streckenlänge	208.105 m	
m	Gesamtgewicht	509,83 t	
n	Anfahrzahl	5 Stk.	
P	Aufstandskraft	5001,38 kN	
Q	Radkraft	74,25 kN	
r _B	Bogenradius	individuell m	
r _s	Radradius	0,46 m	
s	Neigungsverhältnis	individuell ‰	
t	Stoßbeiwert	0,0025	
v	Geschwindigkeit	individuell km/h	
v _{max}	Höchstgeschwindigkeit des Zuges	230 km/h	
w _{anf}	spezifischer Anfahrwiderstand	4 ‰	
α	Neigungswinkel	individuell °	
μ _L	Lagerreibungsbeiwert	0,0017	
ξ	Massenfaktor	1,06	

Tabelle 2: Eingangparameter Energieberechnung⁴³

Die Berechnung der einzelnen Widerstände wird mittels nachfolgender Formeln durchgeführt.

⁴³ Messner, Melanie (2014): Berechnung des Energieverbrauches für Triebfahrzeuge, TU Graz.

Rollwiderstand:

$$\sum W_R = \sum P * \frac{e}{r} = 5001,38 * \frac{0,6}{0,46} = 271.483.780,87 [N]$$

Lagerreibungswiderstand:

$$\sum W_{LA} = \sum 0,120 * \mu_L * 1000 * G = 0,120 * 0,0017 * 1000 * 5001,38 = 42.460.063,33 [N]$$

Stoßwiderstand:

$$\sum W_t = \sum t * Q * v = 0,0025 * 74,25 * v_i = 48.406.883,01 [N]$$

Luftwiderstand:

$$\sum W_L = \sum 3 * \left(\frac{v_i}{100}\right)^2 * G = 45.405.151,27 [N]$$

Beschleunigungswiderstand:

$$\sum W_a = \sum m * \xi * a = \sum 509,83 * 1000 * 1,06 * (\pm 0,4) = 1.080.829,00 [N]$$

Anfahrwiderstand:

$$\sum W_{anf} = \sum w_{anf} * G * n = \sum 4 * 5001,38 * 5 = 100.027,67 [N]$$

Neigungswiderstand:

$$\sum W_S = \sum G * \sin \alpha * 1000 = \sum 5001,38 * \sin \alpha_i * 1000 = 154.373.140,14 [N]$$

Bogenwiderstand:

$$\sum W_K = \sum w_K * G = \sum \frac{K}{r} * G = \sum \frac{750}{r_i} * 5001,38 = 80.490.580,96 [N]$$

Die Verteilung der Widerstände ist in Abbildung 38 dargestellt, wobei die

geschwindigkeitsabhängigen Widerstände in Rot abgebildet sind.

Aufteilung Widerstände

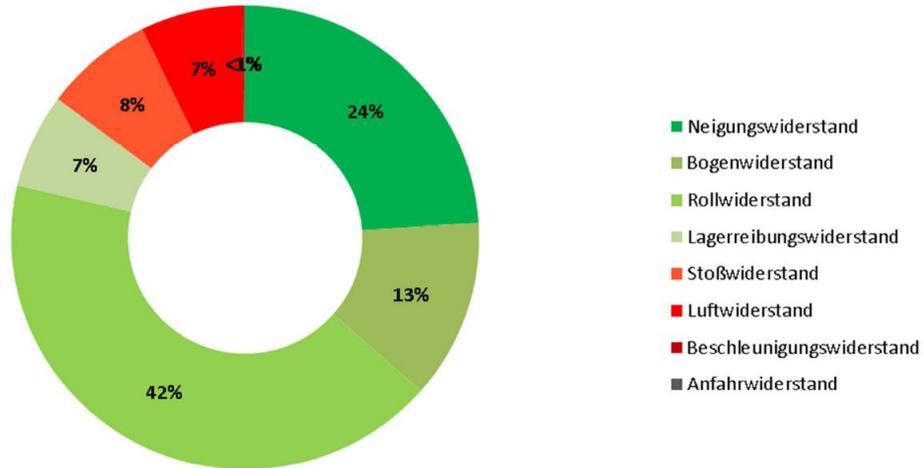


Abbildung 38: Aufteilung der Widerstände

4.6.4 Umrechnung der Widerstände auf den Energiebedarf

Die Summe aller Widerstände zusammen ergibt den Gesamtwiderstand. Dabei muss beachtet werden, dass die Berechnung des Gesamtwiderstandes abschnittsweise erfolgen muss. Das ist erforderlich, weil das Ergebnis des Gesamtwiderstandes aufgrund des Neigungs- bzw. Beschleunigungswiderstandes auch negativ ausfallen kann. Der gesamte Wert darf jedoch nicht in einen negativen Energiebedarf umgerechnet werden. Es wird lediglich ein Prozentanteil verwendet, welcher der Rückspeisung entspricht. In diesem Beispiel wurde eine Rückspeisung von 20% gewählt.

Die Widerstände werden zunächst auf einen Energiewert umgewandelt, wobei diese mit der jeweiligen Länge, auf der sie auftreten, multipliziert werden. Dieser Wert wird dann von Joule in Kilowattstunden umgerechnet.

$$\sum E_W = \frac{\sum(W_i * l_i)}{3,6 * 10^6} = 1.715,58 \text{ kWh}$$

Zum Verbrauch zufolge der Widerstände kommt noch zusätzlich der Nebenverbrauch des Zuges. Dafür wird in diesem Beispiel ein Mittelwert von 3 kWh/min angenommen. Der Nebenverbrauch muss auch im Start- bzw. Endbahnhof, wo der Zug eine gewisse Zeit lang bereitsteht, berücksichtigt

werden.

Die Zeit, die der Zug für die Fahrt benötigt, wird über die gefahrene Geschwindigkeit je Abschnitt i ermittelt.

$$\sum t_i = \frac{\left(\frac{l_i}{v_i}\right)}{\left(\frac{3,6}{60}\right)} = 151,49 \text{ min}$$

$$t_{ges} = \sum t_i + \sum t_{Halte} = 151,49 + 21 = 172,49 \text{ min}$$

$$E_{Neben} = t_{ges} * 3,00 = 172,49 * 3,00 = 517,47 \text{ kWh}$$

$$E_{Gesamt} = E_W + E_{Neben} = 2.233,05 \text{ kWh}$$

Der GesamtEnergiebedarf für die Strecke Wien Meidling - Graz Hauptbahnhof beträgt somit 2.233,05 kWh.

4.6.5 Abgleich mit den Messdaten der ÖBB

Um die mathematische Abbildung der Energiebedarfsberechnung auf ihre Richtigkeit zu prüfen, wurde eine Validierung mittels Messdaten der ÖBB durchgeführt. Zur Validierung lagen Daten von drei verschiedenen Zugfahrten zwischen Wien Meidling und Graz Hauptbahnhof mit dem ÖBB Railjet vor. Diese Messdaten wurden mit Hilfe der ÖBB Railpowerbox (Abbildung 39) aufgezeichnet.

Die ÖBB Railpowerbox ist eine Einrichtung in vielen Triebfahrzeugen, die den aktuellen Energiebedarf des Zuges über die gesamte Fahrt hinweg aufzeichnet. Sie wurde von der ÖBB-Infrastruktur AG entwickelt, um sowohl national als auch international den tatsächlichen Energiebedarf je Triebfahrzeug zu messen. Die erfassten Daten werden mit den dazugehörigen Ortsdaten in einer Datenbank abgelegt.⁴⁴



Abbildung 39: ÖBB Railpowerbox⁴⁴

Die aufgezeichneten Daten dieser Raipowerbox sind für die Fahrt eines Railjet zwischen Wien und Graz am 28.05.2013 bekannt. Für die Rückspeisung des Zuges wurde ein Mittelwert angenommen, da die genaue prozentuelle Rückspeisung je Streckenabschnitt nicht in den Daten der ÖBB Infrastruktur – Energie und Vertrieb abgebildet war. Für diesen Railjet 555 beträgt der Mittelwert rund 25% Rückspeisung.

Der Nebenverbrauch kann, da dieser nicht bekannt ist, über einen Mittelwert abgeschätzt werden. Steht der Zug bei den Messdaten der ÖBB Infrastruktur – Energie und Vertrieb still und es wird dennoch Energie gezogen, dann kann davon ausgegangen werden, dass dies der Nebenverbrauch des gesamten Zuges ist, da bei Stillstand keine weiteren Einflüsse auf den Zug wirken.

Die Abweichung des berechneten Ergebnisses zu dem tatsächlichen Energiebedarf der ÖBB Infrastruktur – Energie und Vertrieb von 2023,66 kWh beträgt ca. 14%. Dieser Unterschied kann aufgrund der verschiedenen angenommenen Eingangsparameter, wie Nebenverbrauch, Personenbesetzungsgrad bzw. Rückspeisung, auftreten. Ändert man beispielsweise die Annahme der Rückspeisung in der Modellierung von 20% auf 0%, da sich der Rückspeisungswert in der Realität je nach Topographie ändert, erhält man aus der mathematischen Abbildung einen Energieverbrauch von 2647,38 kWh.

In den Daten der ÖBB Infrastruktur – Energie und Vertrieb sind ebenso Ergebnisse ohne

⁴⁴ Jony, J. (2012), Themenblatt RailwayBox, Wien: ÖBB-Infrastruktur AG.

Rückspeisung aufgelistet. Dabei beträgt der Energiebedarf 2716,44 kWh. Die Abweichung beträgt nun nur noch -2,54% und zeigt somit, dass die Höhe der Rückspeisung nicht exakt nachmodelliert werden kann, da diese von mehreren Parametern der aktuellen Fahrt abhängt. Der Vergleich ohne Miteinbezug der Rückspeisung im Rahmen der Messung sowie der Modellierung zeigt jedoch, dass das Berechnungsmodell des Energiebedarfs hinreichend genau funktioniert.

Diese Abweichung kann somit als gering genug angesehen werden, so dass ein Einsatz dieses Modells für den Vergleich verschiedener Zugfahrten herangezogen werden kann. In dieser Studie soll vorrangig der Energiebedarf unterschiedlicher Fahrweisen zueinander verglichen werden.

4.6.6 Anwendungen auf einer Beispielstrecke

Im weiteren Verlauf wird die erstellte mathematische Abbildung des Energiebedarfs mit real gemessenen Werten der ÖBB Infrastruktur – Energie und Vertrieb gegenübergestellt. Für diesen Vergleich stehen mehrere Fahrkurven des Railjets auf der Strecke Wien-Meidling nach Wiener Neustadt zur Verfügung (Abbildung 40), weswegen auch die beispielhafte Berechnung für diese Zuggattung durchgeführt wird. Aus den dadurch zusätzlich ermittelten Ergebnissen lässt sich die Einflussstärke der einzelnen Eingangsgrößen und zusätzlichen unerwarteten Ereignissen ableiten. Damit soll es möglich sein, den Energiebedarf eines tatsächlich gefahrenen Zuges abzuschätzen.

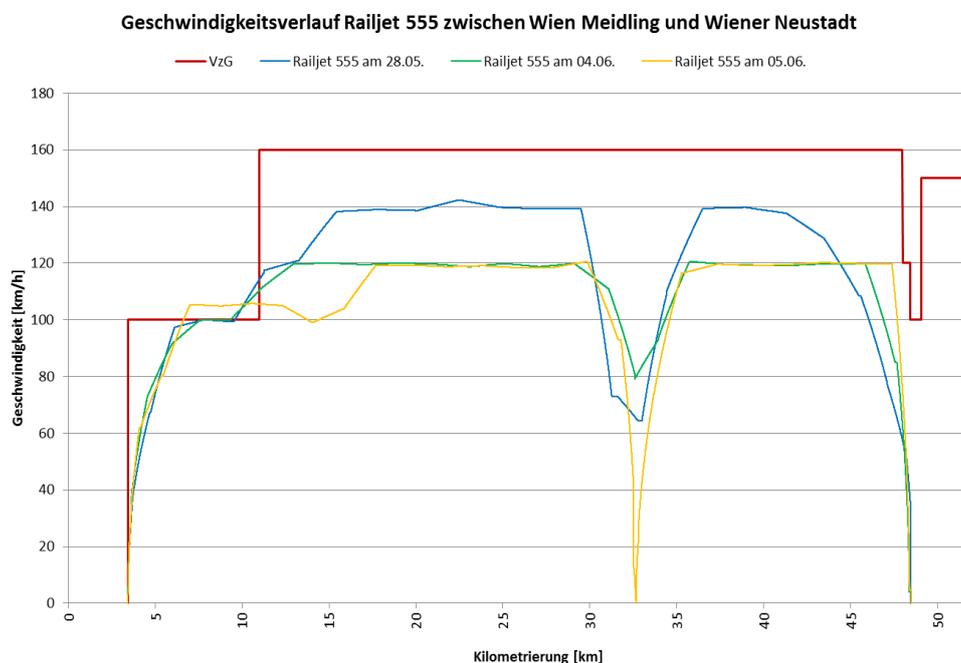


Abbildung 40: Fahrkurven von Railjets zwischen Wien und Wiener Neustadt

Um die mathematische Abbildung der Energiebedarfsberechnung auf ihre Richtigkeit zu prüfen, wird eine Vergleichsanalyse mit den vorhandenen, realen Energiemessungen der ÖBB durchgeführt. Zur Validierung lagen Daten von drei verschiedenen Zugfahrten (jeweils Railjet; Wien-Meidling – Wiener Neustadt) vor (Abbildung 41). Diese Messdaten wurden mit Hilfe der ÖBB RailwayBox aufgezeichnet.

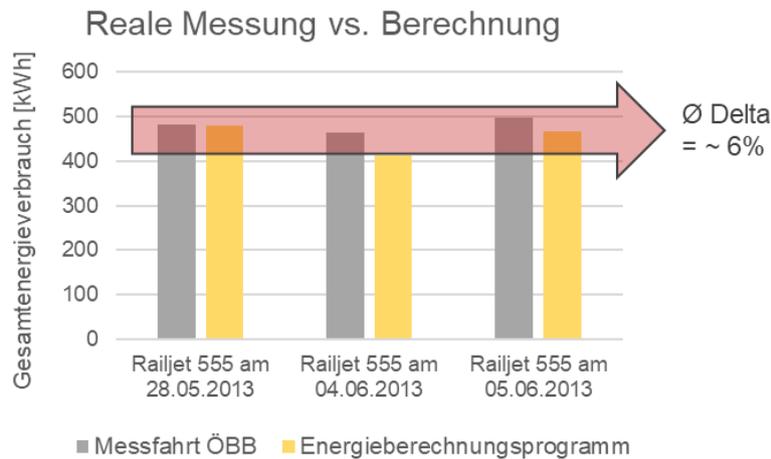


Abbildung 41: Vergleichsanalyse des Energieberechnungs-Modells mit realen Energiemessdaten

Das Berechnungsmodell stimmt sehr gut mit den realen Messungen überein, was eine durchschnittliche Abweichung von nur 6 % zeigt. Diese Abweichung kann somit als gering genug angesehen werden, sodass ein Einsatz dieses Modells für den Vergleich verschiedener Zugfahrten herangezogen werden kann. Es kann daher für diesen theoretischen Vergleich sowie für den weiteren Verlauf von Dispo-SIM angewandt werden, um den Energiebedarf von Zugfahrten abzuschätzen.

Generell tendiert das Berechnungsmodell dazu, einen niedrigeren Energiebedarf auszuweisen als in der Realität gemessen. Daher können ermittelte Einsparungspotentiale als „Mindest-Potentiale“ angesehen und eine nicht der Realität entsprechende Überzeichnung der Potentiale ausgeschlossen werden.

4.6.7 Auswertungen

Analysiert wurden die unter 3.3.5 beschriebenen fünf Planfälle mit den drei Zugfahrten, deren realer Energiebedarf mittels RailwayBox gemessen wurde.

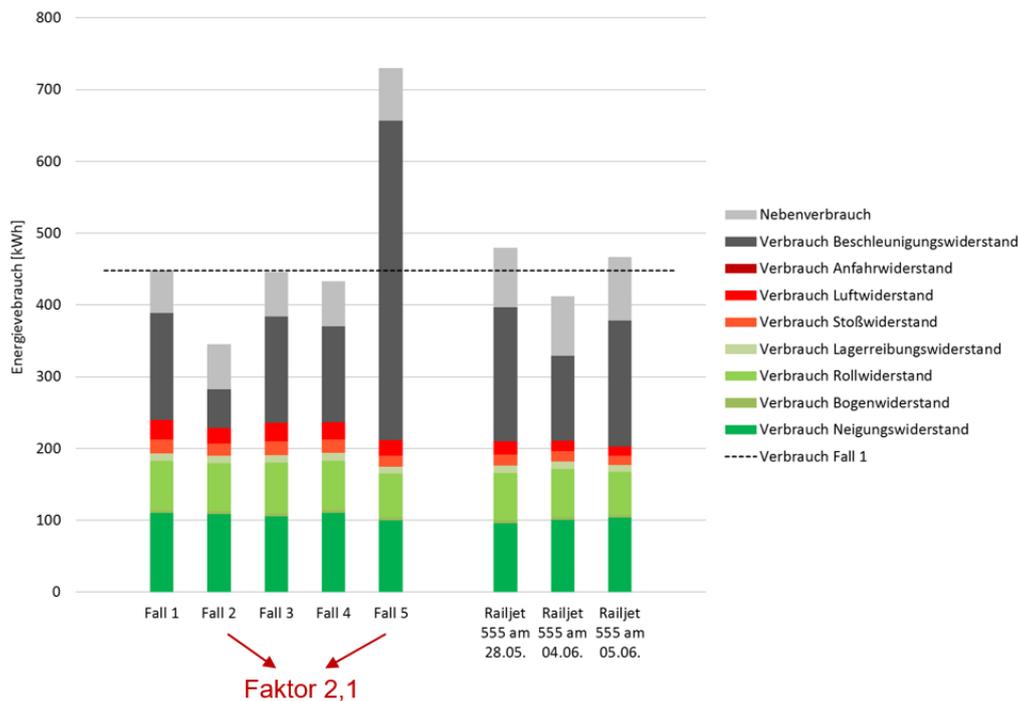


Abbildung 42: Energiebedarf unterschiedlicher Fahrweisen abhängig von Fahrwiderständen und Nebenverbrauch auf der Strecke Wien – Wiener Neustadt

Die Ergebnisse (Abbildung 42) zeigen den deutlich niedrigeren Energiebedarf im Best-Case Szenario mit maximalem Ausrollen. Im Gegensatz dazu wird im (fiktiven) Worst-Case-Szenario die doppelte Menge an Energie verbraucht. Dadurch lässt sich veranschaulichen, dass die Energieeffizienz von Zugfahrten maßgeblich von der Disposition bzw. der Lösung von Konfliktsituationen beeinträchtigt wird.

5 Verifizierung durch Simulation

5.1 Einleitung

Unter Erweiterung und Adaptierung der im Umfeld von H2020 "Shift2Rail/ Roll2Rail" entwickelten Simulationsumgebung für den Zugverkehr (NAVSIM-RAIL – USBGSim-Rail; 2015 - 2017), der Integration der in AP 4.1 spezifizierten Daten sowie den langjährigen Erfahrungen in der Simulation des Straßenverkehrs (DSRC; SIMCO, SIMCO-F; 1992 – 2004) sowie des Flugverkehrs (NAVSIM/ USBGSim; 1997 – 2019) wurde die – entsprechend der Aufgabenstellung und Zielsetzung – detailgenaue Simulation des Zugverkehrs umgesetzt (USBG). Das Simulationskonzept wurde dabei so gewählt, dass die Zielsetzungen dieses Projektes mit der Teststrecke Wien Hbf – Wr. Neustadt erfüllt werden konnten, aber bereits ein österreichweites bzw. allgemeingültiges Simulationskonzept existiert. Dies hat den großen Vorteil, dass für mögliche spätere Umsetzungen das grundlegende Umsetzungskonzept bereits vorbereitet und entwickelt ist.

5.2 Simulationsimplementation

Die in AP 3 spezifizierten Dispositionsalgorithmen wurden schrittweise und systematisch in die bestehende Simulationsumgebung integriert. Dabei kommen – ähnlich den Szenarien in der Luftfahrt – verteilte Simulationsmodule zum Einsatz: während Dispo-SIM-TG (=Traffic Generator) den Zugverkehr simuliert, wird durch Dispo-SIM-AI (= rule based Artificial Intelligence Modul) permanent die Ist-Situation (wie von Dispo-SIM-TG generiert) analysiert und darauf aufbauend die entsprechenden Dispo-Entscheidungen zur teil-/vollautomatisierten Zugsteuerung getroffen. Diese Entscheidungen können durch entsprechende Steuerbefehle über infrastruktur- und zugseitige Systemkomponenten und Kommunikationssysteme an die Triebfahrzeuge übertragen werden.

Die Funktionalität der Dispositionsalgorithmen wurden in verschiedenen umfangreichen Testszenarien überprüft. In diesem Rahmen wurden auch die Anforderungen an eine Versuchsstrecke getestet, damit die Umsetzung in AP 5 (Teststrecke) effizient erfolgen konnte.

Auf Basis der vorangegangenen Arbeitsschritte wurde eine vollständige Konzeptverifizierung der Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für die Dispositionsalgorithmen durch Simulation durchgeführt. Zur Optimierung der Kapazitäten der vorhandenen Infrastruktur, mögliche Energieeinsparungen durch Optimierung der Geschwindigkeiten, optimiertes Beschleunigen und Bremsen ohne Stillstand, Gleiswechsel, etc., wurden unterschiedliche Szenarien systematisch simuliert und verifiziert. Sämtliche Ergebnisse der Konzeptverifizierung durch Simulation wurden

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



PARIS
LODRON
UNIVERSITÄT
SALZBURG

Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



TU
Graz
Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft

74 / 85

analysiert und stellen die Basis für die Umsetzungen in AP 5 dar. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen eine beispielhafte Verifizierung der Umsetzung des Regelfahrplanes durch Simulation mit NAVSIM-RAIL.



Abbildung 43: Beispiel für eine Verifizierung durch Simulation – Regelfahrplan; Darstellung der Situation zw. Wien Hauptbahnhof (Wbf) und Wr. Neustadt (Nb) (Bild:NAVSIM-RAIL)

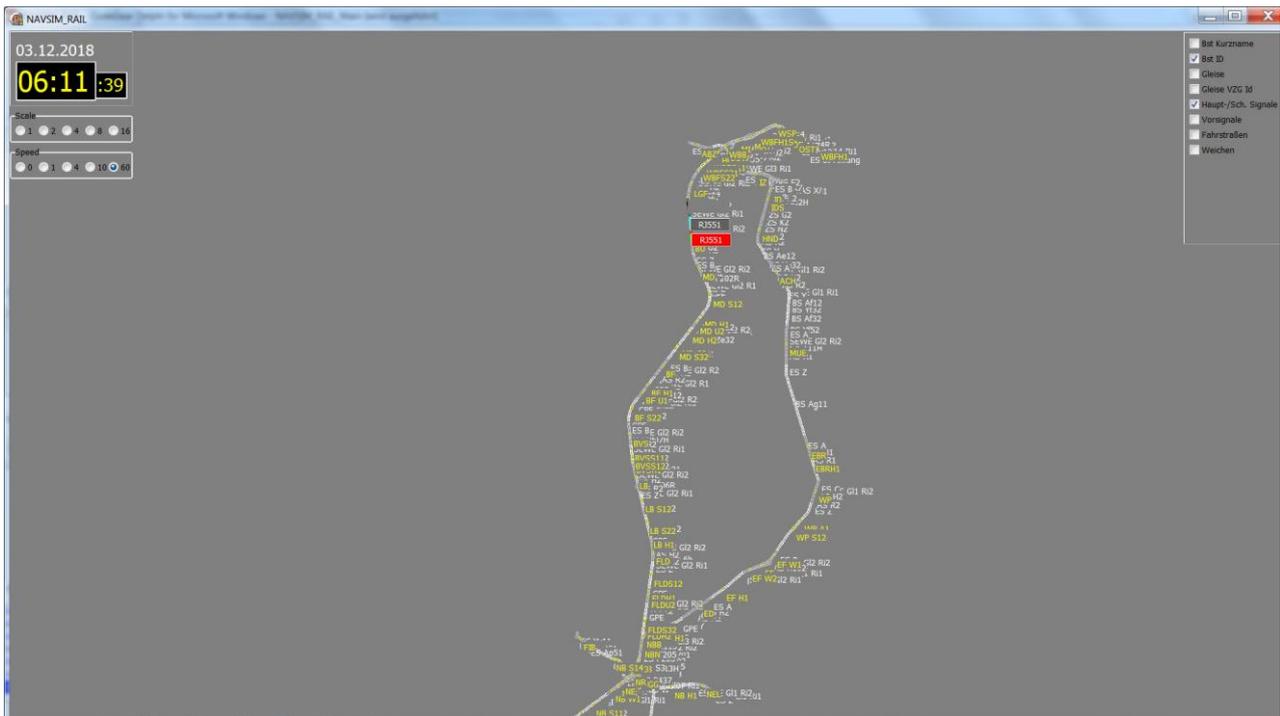


Abbildung 44: : Beispiel für eine Verifizierung durch Simulation – Vergleich zwischen Regelfahrplan und aktuellen Zuglaufmeldungen (ZLM) bzgl. Railjet RJ551 von Wien Hbf. (Wbf) nach Graz (G); (Bild: NAVSIM-RAIL)

Nach vollständiger Aufbereitung und Umsetzung des Datenmaterials erfolgte die weitere Entwicklung der Dispositionsalgorithmen in folgenden Schritten:

- Funktionsprüfung der Fahrstraßen: (54.190 Fahrstraßen verarbeitet und für Dispositionsalgorithmen bereitgestellt)
- Umsetzung und Validierung des Mobilitätsmodells
- Einspielen des Regelfahrplans bzw. tagesaktueller Zuglaufmeldungen
- Detailgenaue Spezifikation der Dispositionsalgorithmen

Datenstatistik – DS, VZG, FPL, ZLM:

Zeigt eine Statistik der verarbeiteten Daten aus DS, VZG, FPL, ZLM.

Tabelle 3: Statistik der in Dispo-SIM/ NAVSIM-RAIL verarbeiteten Daten aus DS, VZG, FPL, ZLM

Datentyp	Verarbeitete Daten in Dispo-SIM/ NAVSIM-RAIL	Bezugsgebiet
Fahrstraßen (FS)	54.190	Österreich gesamt
Fahrwegelemente (FWE)	1.048.575	Österreich gesamt
Spurplanknoten (SPLK):	50.193	Österreich gesamt
VZG Gleis-Geokoordinaten	9.353	Testgebiet Wien Hbf – Wr. Neustadt
VZG Signale	2.572	Testgebiet Wien Hbf – Wr. Neustadt
VZG Weichen	534	Testgebiet Wien Hbf – Wr. Neustadt
Fahrplandaten (gefiltert; ohne Bedarfszüge)	4.944	Österreich gesamt (bezogen auf Testgebiet)
Zuglaufmeldungen (3. – 7. Dez. 2018)	<u>1.916.172</u>	Österreich gesamt (bezogen Testgebiet)
Verarbeitete Daten-Gesamtsumme	40.478.431	Detaildaten

Die Verifizierung der Konzepte wurde in folgenden Schritten umgesetzt:

- Verifizierung mittels "Testzug" (RJ551 von Wien Hbf nach Graz Hbf)
- Regelfahrplan mittels NAVSIM-RAIL(Dispo-SIM) – Validierung
- Aktuelle (historische) Referenzsituationen auf Basis von Zuglaufmeldungen
- Betriebsablauf mit stochastisch (Weichenschaden, Oberleitungsschaden, etc.) und

[Dispo-SIM]

Projektnummer:
860531



Fachbereich Computerwissenschaften
Aerospace Research



77 / 85

deterministisch (geplante Baustellen, LA, etc.) generierten Störungen und Ausfällen – unter Anwendung der Dispositionsregeln

- Betriebsablauf mit stochastisch und deterministisch generierten Störungen und Ausfällen – Optimierung mittels NAVSIM-RAIL(Dispo-SIM) – Vergleich von bestehenden Dispositionsregeln mit Optimierung durch Dispo-SIM

6 Validierung durch Anwendungsbeispiel Wien Hauptbahnhof – Wr. Neustadt

6.1 Entwicklungen und Validierungen an der Beispielstrecke (NAVSIM-RAIL)

Damit eine Validierung der Entwicklungen an der Dispo-SIM Teststrecke Wien – Wr. Neustadt durchgeführt werden konnte, wurde schon früher als im Antrag geplant, intensiv mit der Analyse und Organisation der benötigten Daten begonnen. Durch die nachdrückliche Unterstützung der einzelnen ÖBB-Abteilungen war die Organisation der wesentlichsten Daten für die Validierung am Anwendungsbeispiel Wien Hbf – Wr. Neustadt möglich.

Nach Überprüfung der Daten und Umsetzungstests an der Strecke Wien Hbf – Wr. Neustadt wurden erste Implementierungen in der Simulationsumgebung begonnen, laufend erweitert und abgeschlossen. Auf Basis der vorbereitenden Arbeiten wurde eine Validierung der Funktionsfähigkeit der entwickelten Dispositionsalgorithmen mit realen Daten der Strecke Wien Hauptbahnhof – Wr. Neustadt durchgeführt. Zur Optimierung der Kapazitäten der vorhandenen Infrastruktur, möglichen Energieeinsparungen durch Optimierung der Geschwindigkeiten, optimiertem Beschleunigen und Bremsen ohne Stillstand, Gleiswechsel, etc., wurden folgende Szenarien systematisch simuliert und validiert:

- Kurzfristige Verspätungen,
- Unerwartete Systemausfälle (Weichenstörungen, Gleissperren, etc.),
- Auswirkungen von Baustellen und Langsamfahrstellen,
- Streckensperren, etc.

Die automatische Berechnung von alternativen Fahrstraßen durch Dispo-SIM – NAVSIM-RAIL erfolgte nach klar definierten Regeln und Vorgaben. Weichenstörungen und Gleissperren werden automatisch behandelt und mittels alternativer Fahrstraßenberechnung wie folgt gelöst:

- (1) Prüfung, ob Zugfahrt gemäß Regelfahrplan / Regelgleis möglich ist
- (2) Alternativrouten bis zum Endbahnhof können sehr schnell berechnet werden – siehe Abbildung 45
- (3) Es erfolgt eine Fahrstraßenberechnung von Haltebahnhof zu Haltebahnhof, um – nach Möglichkeit – das Regelgleis (Bahnsteig) einzuhalten
- (4) Bahnhöfe ohne Halt werden nach Möglichkeit am Regelgleis durchfahren

- (5) Vorrang bzgl. Gleiszuteilung haben Züge, die am Regelgleis halten (Bahnsteig)
- (6) Bei Weichenstörungen und Gleissperren werden alternative Gleise / Fahrstraßen ausgewählt – bei Halt: Gleis mit Bahnsteig
- (7) Auch im Bahnhofsbereich werden "Gegengleise" berücksichtigt! Vorrang haben Fahrstraßen, die nicht auf das "Gegengleis" führen
- (8) Vorrang bei der Fahrstraßenauswahl haben grundsätzlich – "best fit" – Algorithmen, d.h. kürzeste Route bei ökonomischer Ausnutzung der Höchstgeschwindigkeit (Strecke – Zug)
- (9) Falls aufs Gegengleis gewechselt werden muss, wird zum frühestmöglichen Zeitpunkt auf das Regelgleis zurückgewechselt
- (10) Dazu werden Zugfahrten entlang von "Odd" / "Even" Routen definiert (Gl.1 bzw. 2)
- (11) "Begegnungskonflikte" werden durch NAVSIM-RAIL – nach Möglichkeit - automatisch gelöst
- (12) Vorrang hat grundsätzlich der Zug mit der niedrigeren Zugnummer, außer er wird durch einen vorausfahrenden Zug ohnehin "abgebremst"
- (13) In einem weiteren Schritt soll die Gesamtzeit aller Verspätungen minimiert werden
- (14) "Erzwungene" Verspätungen sollen nach Möglichkeit im Bahnhofsbereich abgewartet werden
- (15) Bei Auftreten von Verspätungen werden durch Dispo-SIM (NAVSIM-RAIL) nachfolgende Streckenabschnitte zeitlich – unter Beachtung der Maximalgeschwindigkeit – optimiert bis der Regelfahrplan (nach Möglichkeit) wieder erreicht wird
- (16) Die Dispo-SIM Regeln wurden für zwei Modi untersucht und umgesetzt:
 - a. NORM-Mode: Steuerung durch Signale
 - b. ÖKO-Mode: Steuerung durch Disponent/ Dispo-SIM via Datenfunk (z.B. SMS, GSM-R, etc.); "Halt"-zeigende Signale werden – durch Geschwindigkeitsanpassung - "just in time" erreicht⁴⁵

⁴⁵ Anmerkung: Zur Konfliktauflösung sowie zur Zeit- und Energieoptimierung berechnet und versendet NAVSIM-RAIL sowohl Kurzmeldungen (SMS) mit Geschwindigkeitsempfehlungen an den Triebfahrzeugführer (SMS) bzw. generiert Sprachnachrichten gemäß Sprechphraseologie.

Abbildung 45 zeigt die Berechnung einer optimierten Fahrstraßenkette durch NAVSIM-RAIL von Ausfahrtsignal MAT_E4 in Wien Hauptbahnhof bis Ausfahrtsignal NB_K2 in Wr. Neustadt unter Berücksichtigung von Weichenstörungen in Wbf, Lg, BVS, Lb und Nb.

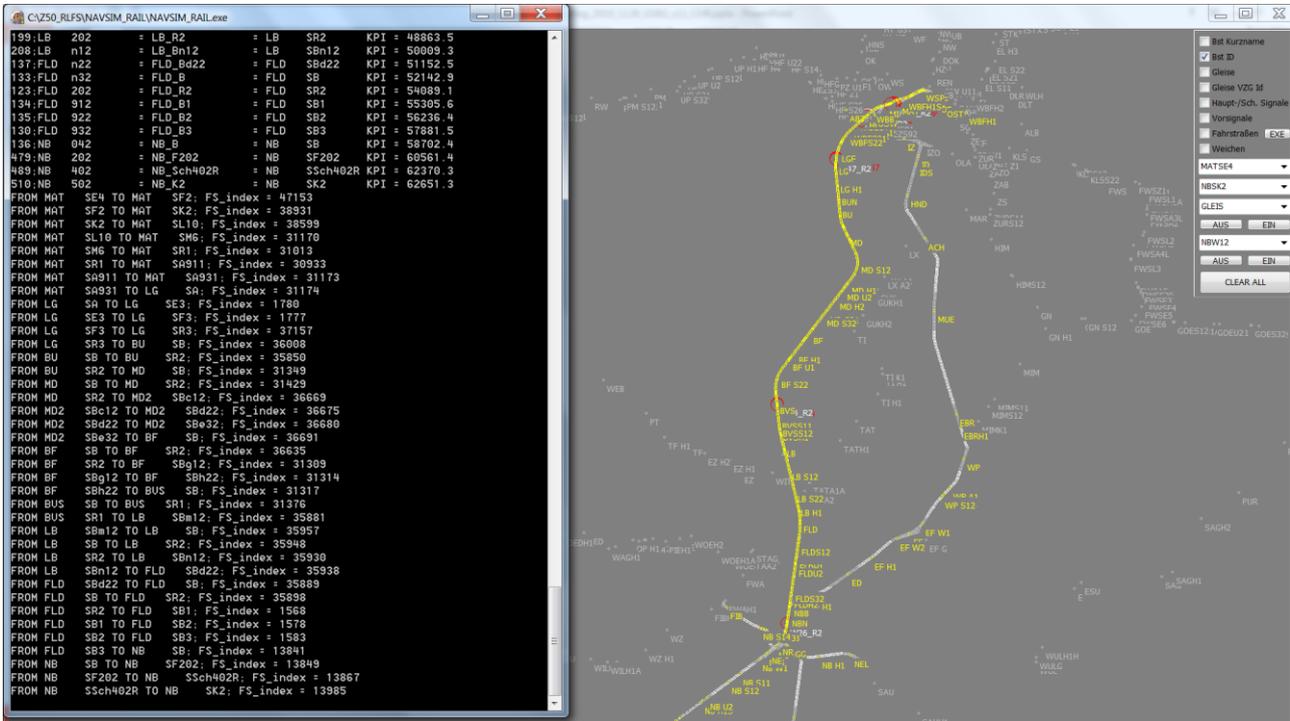


Abbildung 45: Beispiel aus NAVSIM-RAIL, Fahrstraßenkette von Ausfahrtsignal MAT_E4 in Wien Hauptbahnhof bis Ausfahrtsignal NB_K2 in Wr. Neustadt unter Berücksichtigung von Weichenstörungen in Wbf, Lg, BVS, Lb und Nb

7 Zusammenfassung und Ausblick hinsichtlich eines netzweiten Migrationsprozesses

Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes sollte der Nachweis geführt werden, dass DispoSIM einen wesentlichen Beitrag zu einer automatisierten Disposition von Zugfahrten liefern kann. Im Speziellen bezieht sich dies auf die Lösung von Konfliktsituationen unter Berücksichtigung der Netzwirkung unterschiedlicher Parameter wie Energiebedarf, Kapazität und Fahrplanstabilität. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit soll dabei anhand der Strecke Wien – Wiener Neustadt dargestellt werden. Im Rahmen dieser Anwendung sollen reale Zugfahrten eines Tages in der Vergangenheit simuliert werden. Der Algorithmus soll dabei sich anbahnende Konflikte evaluieren und einen optimierten Lösungsvorschlag liefern. Dieser kann im weiteren Verlauf den tatsächlich getroffenen Entscheidungen gegenübergestellt werden. Diese Vorgehensweise soll es ermöglichen, Potentiale einer automatisierten Disposition aufzuzeigen. Nach Möglichkeit ist es auch angedacht, einen – vom tatsächlichen Echt-Zeit Betrieb abgekoppelten – Arbeitsplatz einzurichten. Hier könnte der/ die Disponent/in gewisse Situationen durchexerzieren und parallel einen optimierten Lösungsvorschlag von Dispo-SIM erhalten. Diese Herangehensweise sollte insbesondere dazu führen, die Benutzeroberfläche möglichst übersichtlich und auch einfach handhabbar zu gestalten. Abbildung 46 zeigt den Umfang des gegenständlichen Forschungsprojektes:

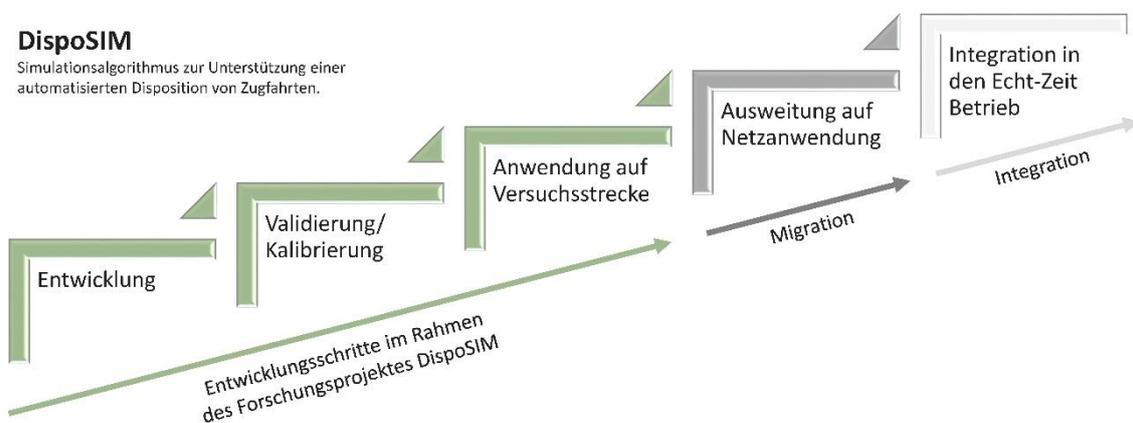


Abbildung 46: Realisierungsschritte Dispo-SIM und weiterer Ausblick

Als logische nächste Schritte können eine Migration des Algorithmus auf das gesamte Streckennetz sowie eine Integration in den Echt-Zeit Betrieb angesehen werden. Die Migration auf das gesamte Streckennetz erfordert es, sämtliche Fahrstraßen des Netzes abzubilden und die dementsprechende Information der Zugsbewegungen darauf umzulegen. Danach muss abermals eine umfassende Validierung der Ergebnisse und Vorschläge erfolgen, bevor eine Integration in die

tatsächliche Disposition von Zugfahrten denkbar ist. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass der entwickelte Algorithmus optimal in das derzeit verwendete Programm ARAMIS integriert werden kann. Des Weiteren muss die Bedienoberfläche sowie die Anzeige der Lösungsvorschläge auf Bedürfnisse der handelnden Disponenten/innen optimal abgestimmt sein. Damit soll einerseits erreicht werden, dass dieses Optimierungswerkzeug auch wirklich standardmäßig verwendet wird. Andererseits muss unbedingt verhindert werden, dass die zusätzliche Anzeige von Lösungsvorschlägen in irgendeiner Art und Weise als irritierend wahrgenommen wird und daher die Gefahr besteht, die Tätigkeit der Disponenten/innen zu beeinträchtigen.

Wie bereits erläutert, stellt eine automatisierte Disposition einen wesentlichen Schritt in Richtung automatisierten Zugbetriebs dar. Dies zeigt sich insbesondere durch den in Abbildung 47 qualitativ dargestellten Adaptionsbedarf der beiden übergeordneten Digitalisierungsschritte. Die Einführung und Umsetzung von automatisiertem Zugbetrieb (ATO) erfordert essentielle Umrüstungen hinsichtlich der Fahrzeugflotte, Infrastruktur und Software-Applikation. Die Fahrzeuge müssen automatisiert verzögert und beschleunigt werden können. Dafür ist – insbesondere, wenn man einen Betrieb im beweglichen Block umsetzen möchte – eine maximale Positionierungsgenauigkeit erforderlich, die aktuell noch nicht erreicht werden kann. Infrastrukturseitig müsste man das betroffene Streckennetz mit der jeweiligen ETCS-Ausrüstung (oder einem vergleichbaren System) ausstatten, um die notwendige Kommunikation zwischen Fahrweg und Fahrzeug sicher zu stellen. Der Softwarealgorithmus im Hintergrund muss natürlich ein netzweit optimiertes Traffic Management System beinhalten, um die Disposition der Zugfahrten durchführen zu können.

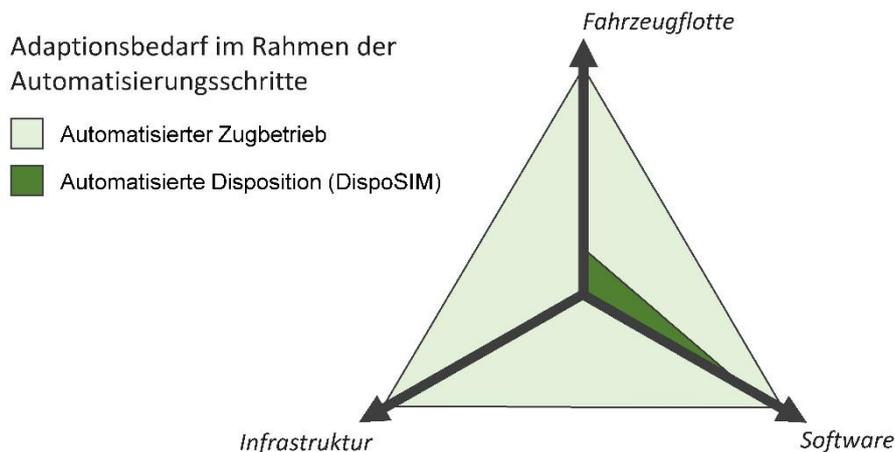


Abbildung 47: Adaptionsbedarf im Rahmen der Digitalisierungsschritte

Eine ähnliche ausgereifte Dispositions-Software wird auch für eine automatisierte Disposition von Zugfahrten benötigt. Allerdings entfallen sämtliche infrastrukturseitigen Kosten, da Algorithmen basierte Disposition(-svorschläge) bereits unter bestehender Infrastruktur genutzt werden können. Dies gilt größtenteils auch für die Fahrzeugflotte, welche lediglich eine geringe Adaptierung braucht, um die Fahrbefehle bzw. -vorschläge dem/der Triebfahrzeugführer/in übermitteln zu können. Je exakter die Positionierung, desto höher ist die Ausnutzung des Optimierungspotentials in diesem Digitalisierungsschritt.

Daher kann ein Einsatz einer automatisierten Disposition bereits mittelfristig erfolgen und somit gewisse Potentiale ausgeschöpft werden. Das langfristige Ziel, welche ATO im zweiten Grad der Automatisierung (GoA2) darstellt, bedarf eines weit höheren Aufwandes, ermöglicht dafür im nächsten Schritt jedoch auch die maximale Ausschöpfung der zur Verfügung stehenden Potentiale. Dies betrifft insbesondere die Streckenkapazität, wenn eine Anwendung des Betriebssystems „beweglicher Block“ (moving block) zum Einsatz kommt.

8 Umsetzungsmöglichkeiten aus Dispo-SIM

Das zur Umsetzung des Projektes entwickelte NAVSIM-RAIL-Tool wurde so angelegt, dass bei zur Verfügungstellung der entsprechenden Daten – nach Anpassung – das gesamte österreichische Netz abgedeckt werden kann.

Damit empfehlen sich insbesondere folgende weiterführende Anwendungen:

- 1) Österreichweite Anwendung der Dispositionsalgorithmen mit NAVSIM-RAIL
- 2) Optimierung der Baustellenplanung
- 3) Entwicklung einer Schnittstelle zum derzeit verwendeten Software ARAMIS zur Anwendung in den BVZ der ÖBB

Darüber hinaus stellt das entwickelte, sehr leistungsstarke Tool eine Basis für weitere umfangreiche Auswertungen dar, die für die Bereiche LCM (LifeCycle Management), BEK (Betriebserschwerneckosten) oder Betrieb (Gleisbelegung/Kapazitätsoptimierung) genutzt werden können. Eine Integration des zugspezifischen Energieberechnungstools in die Simulation würde einen weiteren Optimierungsschritt ermöglichen, um in einem vollintegrierten System Verspätungen (BEK) und Energiebedarf abwägen zu können.

Zur wissenschaftlichen Verwertung wird ein Artikel bei der renommierten Fachzeitschrift ZEVrail eingereicht, womit das in- und ausländische Fachpublikum im Bereich Eisenbahntechnik erreicht werden soll. Dieser Artikel wird nach Abschluss des Projektes verfasst und soll die

Rahmenbedingungen, Lösungsalgorithmen als auch das Anwendungsbeispiel anschaulich darstellen.

Möglicher weiterer Zusatznutzen und Verwertungsmöglichkeiten aus dem Projekt Dispo-SIM sind:

- **Auswertung Anzahl der Weichenstellungen (= Änderung der Weichenlage)**
 - Durch die Simulation der Stellung und Auflösung von Fahrstraßen (sowohl im Regelbetrieb als auch bei Störungen) können in einem Beobachtungszeitraum statistische Daten über die Anzahl der Weichenstellungsänderungen je Weiche erfasst werden
 - Dies ist insbesondere auch relevant für Verschleißprognosen der Weichenstränge und beweglichen Weichenteile
- **Auswertung Gleisbewegung**
 - Durch Simulation und statistische Auswertung der Häufigkeit der geschalteten Fahrstraßen und Zugbelegungen können auch Aussagen bzgl. der Gleisbelegung und damit eine Erhöhung der Planbarkeit bzgl. zu erwartender Wartungs- und Austauschkosten von Infrastrukturkomponenten durchgeführt werden
- **Betriebserschwerernskosten**

Möglicher Input aus Dispo-SIM:

 - Optimierte Reaktion auf unvorhersehbare Störungen und Reduktion der Betriebserschwerernskosten
 - Simulation unterschiedlicher Szenarien, um vorhersehbare Störungen (bspw. Baustellen) optimiert zu planen
 - Ermittlung der Verspätungen und Folgeverspätungen
 - Ermittlung des zusätzlichen Energiebedarfs
 - Auswirkung einzelner Züge als auch Netzwirkung simulierbar

Um die weitere Nutzung der Dispo-SIM Potentiale bestmöglich auszunutzen sind Workshops für die unterschiedlichen möglichen Anwendungsgebiete geplant.