

BEWERTUNG VON KNOTENMANAGEMENT-METHODEN FÜR EISENBAHNEN

Samuel Roos

Diplomarbeit
Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Januar 2006

 Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Institute for Transport Planning and Systems

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Dank

Ich danke Herrn Prof. Dr. Ulrich Weidmann für die Unterstützung dieses realitätsnahen Projekts. Es gibt mir die Möglichkeit, ein aktuelles Thema zu bearbeiten. Weiter danke ich ihm für die engagierte Betreuung.

Ich danke dem betreuenden Doktoranden Herrn Marco Lüthi für die hilfreiche Unterstützung sowie für die Zusammenarbeit bei der Lösung von Schwierigkeiten betreffend die Applikation OpenTrack.

Ich danke Herrn Dr. Felix Laube für die Unterstützung der akademischen Bearbeitung des bei den SBB unter seiner Leitung laufenden Projekts Methode PULS. Entsprechend hat er mir inhaltlich hilfreich beigegeben. Er ermöglichte mir zudem den Kontakt mit weiteren Personen bei den SBB.

Ich danke Herrn Dr. Raimond Wüst von den SBB für seine kritischen Fragen und Anmerkungen, welche etliche Anpassungen ermöglichten.

Ich danke Herrn Thomas Graffanino von den SBB für die verwendeten Sperrzeiten-Daten sowie für Hinweise auf interessante Literatur.

Ich danke Herrn Michael Fankhauser von den SBB, Abteilung Trassenmanagement Luzern, für die bereitwillige Information über das derzeit angewandte Vorgehen bei der Fahrplanerstellung und im Betrieb.

Inhaltsverzeichnis

Dank	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einführung	3
2 Kapazität: Definitionen und Kennzahlen	5
2.1 Kennwerte	6
2.2 Abstraktion der Infrastruktur	8
3 Bestehende Kapazitätsanalysemethoden	11
3.1 Übersicht Kapazitätsanalysemethoden	11
3.2 Manuell / rechnergestützt	11
3.3 DONS	18
3.4 CAPRES / AFAIG	19
3.5 Simulation	20
3.6 Burkolter (Petri Netze)	20
3.7 Fahrtenabhängigkeitsplan	21
3.8 UIC-Formel	23
3.9 Fahrstrassen-Ausschlusstafel	24
3.10 ANKE (Analytische Netzkapazitätsermittlung)	24
4 Methode PULS	25
4.1 Konzeptidee	25
4.2 Erstellung PULS-Raster	29
4.3 Belegung (grafisch)	40
4.4 Betriebsführung	41
4.5 Automatisierungsmöglichkeiten	42

5	Methodenübersicht	43
6	Kapazitätsanalyse Knoten Luzern	47
6.1	Untersuchte Betriebsprogramme und angewandte Verfahren	48
6.2	Bestehender Fahrplan	48
6.3	Methode PULS	53
6.4	Simulation	62
7	Bewertung der Methoden	69
7.1	Vergleich Kapazitätsanalyse Knoten Luzern	69
7.2	SWOT-Analyse für Methode PULS	71
7.3	Anwendungsbereich Methode PULS.....	72
7.4	Ausblick	73
8	Literatur.....	75
9	Glossar	77
	Anhang	A-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Definitionen der Kapazität, Kennwerte	6
Tabelle 2	Kapazitätsanalysemethoden	11
Tabelle 3	Verpulsungsarten von Weichennestern	35
Tabelle 4	Beispielrechnung zu Abbildung 12 (Konzeptidee)	36
Tabelle 5	Planungs- und Betriebsformen	44
Tabelle 6	Ankünfte Personenverkehrszüge Normalspur 17:00 bis 18:00 Uhr	49
Tabelle 7	Abfahrten Personenverkehrszüge Normalspur 17:00 bis 18:00 Uhr	50
Tabelle 8	Zentralbahn 17:00 bis 18:00 Uhr	51
Tabelle 9	Güterzüge / Lokzüge 17:00 bis 18:00 Uhr	51
Tabelle 10	Rangierfahrten 17:00 bis 18:00 Uhr	52
Tabelle 11	Zugzahlen Verdichtungsbereich Luzern: Fahrplan 2005	52
Tabelle 12	5 ausgewählte Zug-/Fahrwegkombinationen	54
Tabelle 13	Performance-Vergleich	56
Tabelle 14	Primärverspätungen im Betriebsprogramm 'Heutiges Angebot'	61
Tabelle 15	Sekundärverspätungen / Fahrwegänderungen	62
Tabelle 16	Vergleich Kapazitätsanalyse Knoten Luzern	69
Tabelle 17	SWOT-Analyse	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Warteschlangen-Modell.....	7
Abbildung 2	Stufen der Abstraktion der Infrastruktur	9
Abbildung 3	Planung Angebotskonzept mittels Netzgrafik.....	13
Abbildung 4	Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan.....	14
Abbildung 5	Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan.....	16
Abbildung 6	Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan.....	16
Abbildung 7	CAPRES: Fahrplan-Sättigung mit Güterzügen	19
Abbildung 8	Petri Netz Beispiel.....	20
Abbildung 9	Beispiel Topologie Fahrstrassenknoten	21
Abbildung 10	Fahrtenabhängigkeitsplan Planfall	22
Abbildung 11	Fahrtenabhängigkeitsplan komprimiert	23
Abbildung 12	Konzeptidee PULS	26
Abbildung 13	Erholungsmarge	30
Abbildung 14	Effekt der Teilfahrstrassenauflösung (TFA).....	32
Abbildung 15	Verflechtung von Gegenfahrten	33
Abbildung 16	PULS-Effizienzsteigerung mit Verflechtung von Gegenfahrten.....	34
Abbildung 17	Homogenisierung	38
Abbildung 18	Homogenisierung ‚Kamelhöcker‘	38

Abbildung 19	Nutzung der Zwischenpuls-Zeitscheibe (ZPZ)	39
Abbildung 20	Belegung	40
Abbildung 21	Gleisschema Luzern.....	47
Abbildung 22	PULS-Effizienzsteigerung mit Verflechtung von Gegenfahrten.....	55
Abbildung 23	Restriktionen Weichennest Gütsch	56
Abbildung 24	Kreuzung RE von/nach Bern.....	58
Abbildung 25	Einstellungen Preferences – verwendete Dateien	63
Abbildung 26	Später Bremseneinsatz	64
Abbildung 27	Simulation	65

Diplomarbeit Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Bewertung von Knotenmanagement-Methoden für Eisenbahnen

Samuel Roos
ETH Zürich
8093 Zürich

Telefon: 044 342 44 68
e-Mail-Adresse: saroos@student.ethz.ch

Januar 2006

Kurzfassung

Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB erarbeiten derzeit eine Methode zur Leistungssteigerung für hoch belastete Knoten ihres Netzes. Die Methode PULS grenzt die Lösungsmenge beim komplexen Prozess der Fahrplankonstruktion auf besonders vorteilhafte Konstellationen ein. Eine formale Struktur, welche aus Infrastruktur und verkehrendem Rollmaterial abgeleitet wird, ermöglicht eine rationelle Belegung. Die Abhängigkeiten im Fahrplangefüge sind intuitiv erfassbar. Die Automatisierung mehrerer Teilprozesse ist möglich. Von verschiedenen Hochschulen werden zudem verschiedene Instrumente für Kapazitätsanalyse und Fahrplankonstruktion vorgestellt. Sie nutzen unterschiedliche Kennwerte der Kapazität. Es zeigen sich zwei grundlegend unterschiedliche Prinzipien von Planung und Betrieb. Für die Untersuchung der Kapazität am Beispiel des Knotens Luzern werden verschiedene Betriebsprogramme mit der Simulations-Applikation OpenTrack sowie mit der Methode PULS erstellt und verglichen. Die Leistungswerte der Methode PULS liegen im Bereich der Referenzwerte der Simulation. Die Erfassbarkeit und damit die Schnelligkeit des Belegungsvorganges inklusive Gleisbelegung mit der Methode PULS ist für kurzfristige Anpassungen geeignet.

Schlagworte

Fahrplankonstruktion, Kapazität, Knoten, Puls, Simulation, Verdichtungsbereich

Zitierungsverschlag

Roos, S. (2006), Bewertung von Knotenmanagement-Methoden für Eisenbahnen, Diplomarbeit, IVT, ETH Zürich

1 Einführung

Die Auslastung auf dem Schweizer Schienennetz ist sehr hoch. Es bestehen etliche Streckenabschnitte und Knoten, die einen weiteren Angebotsausbau im Personenverkehr oder zusätzliche Güterzüge nicht zulassen, weil die Leistungsfähigkeit erreicht ist. Für unzählige Flaschenhälse im System liegen Ausbauvorschläge der Infrastruktur vor: Neubaustrecken, zusätzliche Spuren, weitere Perrongleise.

Im Dezember 2004 wurde die erste Etappe von Bahn 2000 mit verschiedenen Infrastrukturmassnahmen in Betrieb genommen. Der neue Fahrplan hat 12% mehr Züge gebracht. Auf gewissen Abschnitten ohne Ausbauten ist die Belastung weiter gestiegen; hingegen wurden beispielsweise auf der Neubaustrecke Mattstetten – Rothrist als Kernstück der Infrastrukturausbauten ebenso wie auf der parallelen Stammstrecke im netzweiten Vergleich grosse freie Kapazitäten geschaffen, nicht zuletzt wegen der homogenen Geschwindigkeiten der Züge. Die gesamten Kosten der Infrastrukturausbauten für Bahn 2000 beliefen sich auf 5.9 Milliarden Franken. Mit dem Entscheid der Etappierung infolge rasant steigender Kosten wurden drei der vier längeren Neubaustrecken des ursprünglichen Projekts fallengelassen. Deren Realisierung in einer zweiten Etappe sowie weitere, von den Kantonen geforderte dringende Netzerweiterungen, sprengen den Kostenrahmen bei weitem. Eine bereits mit dem Konzept Bahn 2000 verfolgte und weiterhin aktuelle Strategie der Netzentwicklung sind kleine, ins bestehende Netz integrierte und rasch betriebsbereite Ausbauten, welche konkrete Angebotserweiterungen ermöglichen und den geforderten Grad an Stabilität des Fahrplangefüges bringen.

Auf etliche Ausbauten der Infrastruktur muss vorläufig verzichtet werden. Um die Realisierung von neuen Angeboten im Personenverkehr sowie die Verlagerung des Güterverkehrs von der Strasse auf die Schiene nicht zu verhindern, müssen Alternativen zum kostenintensiven Infrastrukturausbau gesucht werden. Vom Team ‚PULS 90‘ der Abteilung Technologie- und Innovationsmanagement der schweizerischen Bundesbahnen SBB wird eine Methode erarbeitet, die die Leistungsfähigkeit von Knoten des Eisenbahnnetzes steigern soll: Die Methode PULS. PULS steht für ‚Produktorientierte Umsetzung der Leistungssteigerung‘ und zugleich für die grundlegende Idee des Ansatzes. Die Züge durchfahren hochbelastete Netzteile in Knotenbereichen in sogenannten Pulsen, diskreten, sich regelmässig wiederholenden Zeitpunkten. Die Methode lehnt sich einerseits stark an die derzeit übliche Bewirtschaftungsform von Knoten an, andererseits bedarf sie bisher nicht gekannter präziser Planung der Abläufe des Bahnbetriebes.

Die Nutzung bestehender Infrastruktur für zusätzliche Züge erhöht dank höherer Auslastung die wirtschaftliche Effizienz des Systems Bahn. Bau und Unterhalt von Anlagen ist ein grosser Kostenfaktor für den Schienenverkehr. Ebenso begünstigen Einsparungen von Infrastrukturausbauten die ökologische Effizienz, da die gleiche Leistung bei geringerem Flächenbedarf möglich ist. Die neue Knotenmanagement-Methode bringt naturgemäss Kapazitätsgewinne in der Grössenordnung von einigen wenigen Zügen pro Stunde. Massive Angebotsausbauten erfordern trotzdem Investitionen in Netzerweiterungen. Gewisse Engpässe werden früher oder später auch beim Einsatz der Methode PULS bei der Fahrplanplanung an ihre Leistungsgrenze stossen. Die Methode PULS eignet sich in diesen Fällen gleichfalls für die Bewertung des Nutzens verschiedener Varianten des Infrastrukturausbaus.

Im nachfolgenden Kapitel wird der Begriff Kapazität erläutert und seine Bedeutung für die Eisenbahn aufgezeigt.

Das Kapitel 3 stellt bereits bekannte Kapazitätsanalysemethoden vor. Sie reichen von der erfahrungsbasierten Planung eines Fahrplans der Abteilung Trassenmanagement der SBB bis zu analytischen Instrumenten, welche von verschiedenen universitären Instituten hervorgebracht wurden.

Die Methode PULS wird detailliert in Kapitel 4 vorgestellt. Das erste Unterkapitel ermöglicht einen Überblick zur Konzeptidee anhand eines fiktiven Beispielfalles. In den weiteren Unterkapiteln wird Aufbau und Anwendung erläutert.

Das Kapitel 5 beinhaltet eine Methodenübersicht mit Gegenüberstellung der bestehenden Kapazitätsanalysemethoden und der Methode PULS.

Um quantitative Aussagen über die Effizienz verschiedener Verfahren machen zu können, wird im Kapitel 6 exemplarisch der Knoten Luzern untersucht. Neben der Auswertung des heutigen Fahrplans als Ergebnis der derzeit angewendeten erfahrungsbasierten Planung wird unter Anwendung der Simulations-Applikation OpenTrack sowie mit der Methode PULS nach verschiedenen Strategien die Leistungsfähigkeit des komplexen Knotens im Zentrum des Schweizer Bahnnetzes ausgelotet.

Aufgrund der in Kapitel 7 zusammengestellten Resultate des Beispielfalles Knoten Luzern werden die Eigenschaften der Methode PULS in einer SWOT-Analyse zusammengestellt sowie deren Anwendbarkeit erläutert.

2 Kapazität: Definitionen und Kennzahlen

Allgemeine Definition des Begriffes Kapazität [lat. *capacitas* = Fassungsvermögen, geistige Fassungskraft, zu *capax* = viel fassen, taugen]: in der Physik Fähigkeit, elektrische Ladung aufzunehmen und zu speichern, in der Wirtschaft die maximale Leistung in der Produktion. Das Leistungsangebot von Menschen und/oder Betriebsmitteln in einem bestimmten Zeitschnitt wird als Kapazität bezeichnet.

Die Kapazität einer Eisenbahn-Anlage ist eine schwierig zu definierende Grösse. Von etlichen universitären Instituten im Bereich Schienenverkehr und Mathematik wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Die Herausforderung besteht darin, dass die Kapazität nicht bloss von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur (Gleise, Spurwechsel, Sicherungsanlage etc.) abhängig ist, sondern auch vom Betriebsprogramm (z.B. Taktfrequenz, Anschlusssicherung), welches auf dieser gefahren werden soll. Das Betriebsprogramm wird, soweit es die Anlage erlaubt, aufgrund der Begehrlichkeiten der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) erstellt. Der Infrastrukturbetreiber vergibt räumlich-zeitlich gebundene Nutzungsrechte (Trassen) an die EVU. An ihm ist es, die verschiedenen Nutzungen in einem Betriebsprogramm (Fahrplan) derart zu koordinieren, dass möglichst viele Trassenbegehren erfüllt werden können. Insbesondere im Personenverkehr jedoch sind die Anforderungen an einen Fahrplan hoch und die Spielräume klein. Die von den EVU beantragten Züge können nicht primär auf geringen Kapazitätsverbrauch hin geplant werden, sondern sie sollen kurze Fahrzeiten ohne betriebliche Verzögerungen, regelmässig verteilte Trassen und optimale Anschlussbeziehungen zu anderen Zügen erhalten.

Im Kapitel 3 werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die Kapazität von Eisenbahn-Anlagen zu bestimmen. Es existieren Verfahren, die Aussagen unabhängig von einem konkreten Betriebsprogramm ermöglichen und solche, die die Kapazität spezifisch einem Betriebsprogramm zuordnen. Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der grundlegenden Ansätze.

Tabelle 1 Definitionen der Kapazität, Kennwerte

Definition	Kennwerte
Produktion	Operative Machbarkeit Betriebsprogramm
Sättigung	Maximale Zugzahl in bestimmtem Zeitintervall
Komprimieren	Minimale Laufzeit für bestimmtes Betriebsprogramm
Analytisch	Planmässige und ausserplanmässige Wartezeiten

2.1 Kennwerte

Operative Machbarkeit Betriebsprogramm

Diese Kapazitätsbemessungsmethode basiert auf dem Bedarf nach effizienten Fahrplanstrukturen auf hochbelasteten Netzen in der Praxis. Das primäre Ziel ist die Erstellung eines produzierbaren Fahrplanes, die Kapazitätsanalyse ist zweitrangig. Einen wichtigen Stellenwert nehmen ein:

- Anschlussbeziehungen / Gleisbelegungswünsche
- Rangierfahrten
- Verfügbarkeit von Trassen für selten verkehrende Zugtypen
- Einschränkungen der Infrastrukturnutzbarkeit infolge Bauarbeiten oder Störungen
- Verspätungen und Verspätungsübertragung

Maximale Zugzahl in bestimmtem Zeitintervall

Um ohne Einfluss auf Züge des Taktverkehrs eine Kapazitätskennzahl bestimmen zu können, werden zusätzliche Züge in die vorhandenen Freiräume des Fahrplangefüges eingefügt. Dabei werden typische Zugsarten des bedarfsabhängigen Verkehrs verwendet, beispielsweise Güterzüge auf Strecken mit hohem Güterverkehrsaufkommen, in der Schweiz zum Beispiel auf Transitstrecken oder am Jurasüdfuss, oder durchschnittliche Zugtypen des Systemverkehrs.

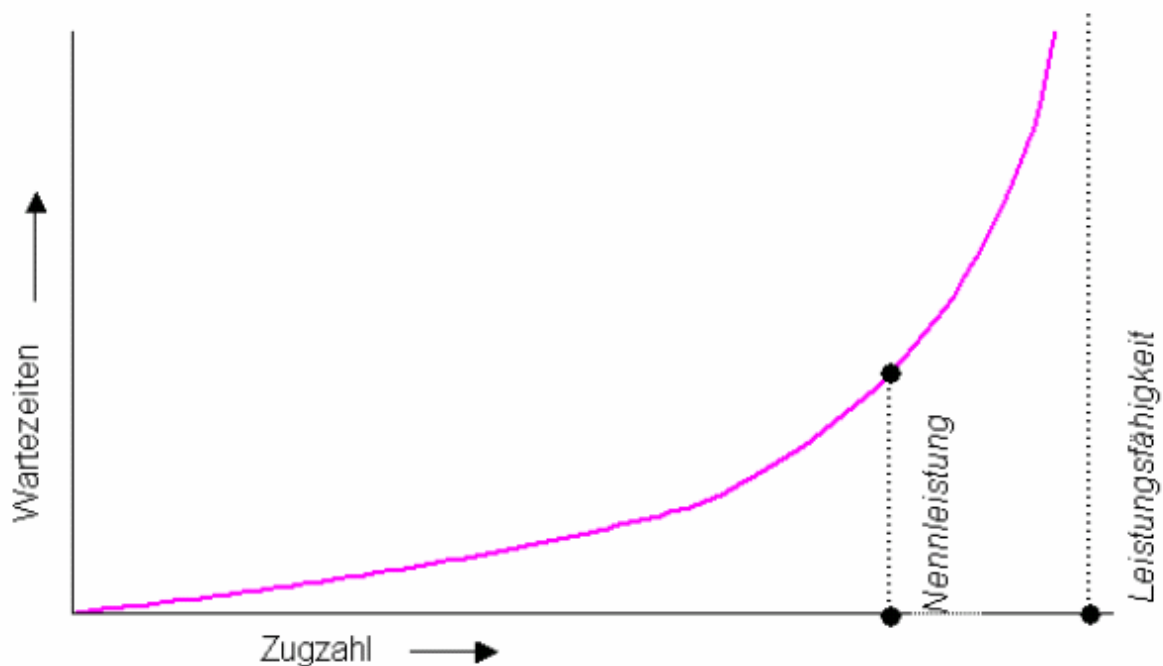
Minimale Laufzeit für bestimmtes Betriebsprogramm

Um die Festlegung auf eine bestimmte Nachfrage für zusätzliche Züge bei der Sättigungsmethode zu vermeiden, wird das vollständige Betriebsprogramm soweit als möglich komprimiert. Die Zugfahrten werden soweit verschoben wie möglich, ohne jedoch die Reihenfolge zu ändern. Die Taktintervalle werden dadurch zwar auf beliebige Werte verkürzt, ihre Regelmässigkeit bleibt aber erhalten. Die Messung erfolgt in der benötigten Zeit für eine bestimmte Anzahl Züge.

Planmässige und ausserplanmässige Wartezeiten

Das Verfahren der rechnerischen Analyse von planmässigen und ausserplanmässigen Wartezeiten stützt sich auf das bekannte Warteschlangenmodell. Je mehr Züge ein gleiches Infrastrukturelement verwenden, desto grösser wird die Wahrscheinlichkeit, dass zwei gewünschte Belegungszeiten überlappen und einer von zwei konfliktbehafteten Zügen ‚warten‘ muss. Ergeben sich Verzögerungen für gewisse Züge bei der Planung eines Fahrplanes, so sind dies

Abbildung 1 Warteschlangen-Modell



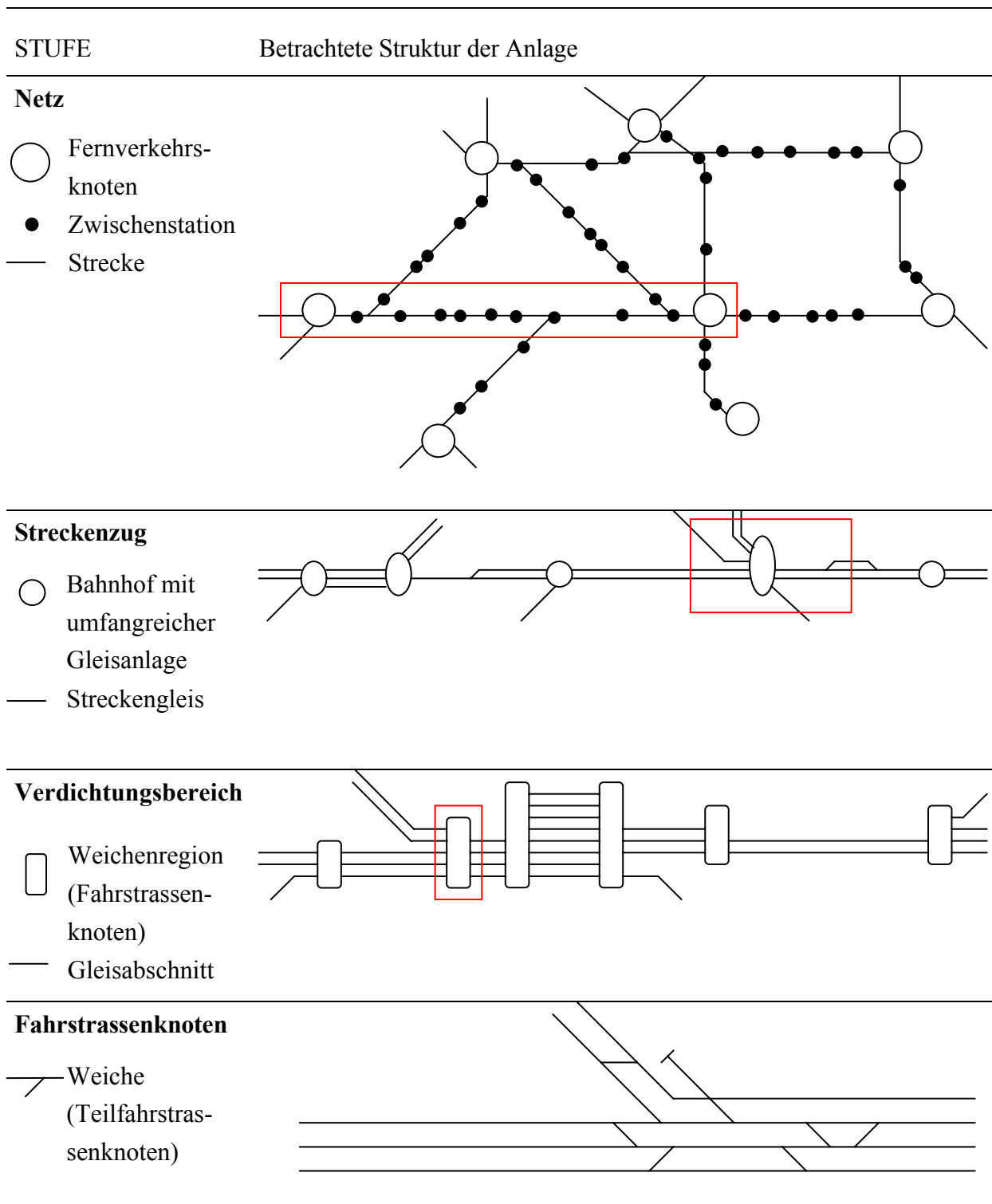
Quelle: Vakhtel, 2002

planmässige Wartezeiten. Hinzu kommen die ausserplanmässigen Wartezeiten, die sich während des Betriebs aufgrund von Verspätungen einzelner Züge ergeben. Gegen die Leistungsgrenze hin steigen die Wartezeiten ins Unendliche, so können beispielsweise ausgestellte Güterzüge erst nach sehr vielen Überholungen durch schnellere Züge weiterfahren. Da solche Betriebszustände nicht tragbar sind, ist eine Nennleistung zu definieren, die einem erträglichen Mass der Wartezeit entspricht.

2.2 Abstraktion der Infrastruktur

Die Berechnung der Kapazität ist für einzelne Streckenabschnitte vergleichsweise einfach. Die kapazitätsbestimmenden Elemente einer Eisenbahnanlage sind jedoch meist diejenigen Teile der Infrastruktur, bei welchen verschiedene Destinationen dasselbe Infrastrukturelement verwenden. In diesen Bereichen ändert die Zusammensetzung der Schar der auf den Streckenabschnitten verkehrenden Züge. Die Beziehungen zwischen verschiedenen Streckenabschnitten und den darauf verkehrenden Zügen in Bereichen der Neugruppierung, generell als Knoten bezeichnet, sind jedoch schwierig zu fassen. Die Abhängigkeiten treten beispielsweise in Form von Anschlussstrukturen in Bahnhöfen oder Abkreuzungskonflikten bei der Vereinigung zweier Strecken auf. Da die Wechselwirkungen sehr verschiedenartig und zahlreich sind, wird bei den angewandten Verfahren für Kapazitätsanalysen stets auf bestimmte Arten fokussiert. Für die Koordination der netzweit verkehrenden Züge, um möglichst gute Anschlüsse zu erzielen, ist ein grobes, aber grossräumiges Infrastrukturabbild zweckmässig; für gleisscharfe Planung der Zugfahrten in einer komplizierten Streckenverzweigung ist hingegen eine detaillierte Betrachtung der Infrastruktur angebracht. Aus diesen Bedürfnissen resultieren verschiedene Stufen der Abstraktion einer betrachteten Infrastruktur.

Abbildung 2 Stufen der Abstraktion der Infrastruktur



In der Literatur wird der Begriff ‚Knoten‘ sowohl für die Stufe Verdichtungsbereich als auch für Fahrstrassenknoten verwendet. In dieser Arbeit ist mit ‚Knoten‘ stets von Verdichtungsbe-
reichen die Rede.

2.2.1 Stufe Netz

Auf der Stufe Netz ist weniger die Kapazität massgebend als die Qualität des Angebotes (Takt, Halte, Anschlüsse). Es besteht nicht flächendeckend eine derart grosse Nachfrage, als dass ein ganzes Netz auf seine maximale Kapazität beurteilt werden muss. Die Angebotsstruktur auf der Stufe Netz gibt das gewünschte Betriebsprogramm für die Kapazitätsanalysen auf den weiteren Stufen vor.

2.2.2 Stufe Streckenzug

Ein Streckenzug beinhaltet eine Strecke zwischen grösseren Knoten unter Einbezug von kleineren Knoten und Abzweigungen. Die Fahrplanstruktur eines Streckenzuges lässt sich sehr gut in einem grafischen Fahrplan darstellen. Besonders die Bewirtschaftung von Einspurstrecken und die Evaluation von Kapazitätseffekten durch die Bündelung von Zügen sind auf der Stufe Streckenzug zweckmässig zu realisieren. Im Unterschied zur reinen Streckenbetrachtung werden beim Streckenzug in untergeordneten Knoten Ein- und Ausfädelungen, unterwegs endende Zugläufe und wechselnde Zusammensetzungen der Zugschar berücksichtigt.

2.2.3 Stufe Verdichtungsbereich

Verdichtungsbereiche umfassen mehrere stark beanspruchte Anlageteile im Bereich grosser Knoten. Sie zeichnen sich durch viele Abkreuzungsvorgänge in komplizierten Weichenregionen als auch durch eine relativ hohe Zugsdichte auf den zwischen den Weichenregionen liegenden Streckenabschnitten aus. Da die Weichenregionen meist dicht beieinander liegen (1-2 Blockabstände), ergeben sich umfangreiche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten.

2.2.4 Stufe Fahrstrassenknoten

Ein Fahrstrassenknoten entspricht ungefähr einer oben erwähnten Weichenregion. Bei der Betrachtung von Fahrstrassenknoten werden Abhängigkeiten von Nachbarweichenregionen ausser Acht gelassen. Aus der Topologie ergibt sich eine Anzahl möglicher Fahrstrassen. Die gleichzeitige Verwendung ist von der Weichenanordnung abhängig und kann mittels einer Ausschlussmatrix aufgezeigt werden.

3 Bestehende Kapazitätsanalysemethoden

3.1 Übersicht Kapazitätsanalysemethoden

Tabelle 2 Kapazitätsanalysemethoden

	Stufe Netz	Stufe Streckenzug	Stufe Verdichtungsbereich	Stufe Fahrstrassenknoten
Operative Machbarkeit Betriebsprogramm	Manuell / Rechnergestützt (Netzgrafik) Dons (Cadans)	Manuell / Rechnergestützt (grafischer Fahrplan)	Simulation (Überprüfung)	Manuell (Gleisbelegung) Afaig Dons (Stations)
Maximale Zugzahl in bestimmtem Zeitintervall	-	Capres	Simulation	-
Minimale Laufzeit für bestimmtes Betriebsprogramm	-	UIC-Formel	Burkolter (obere Ebene)	Burkolter / Herrmann (untere Ebene) Fahrtenabhängigkeitsplan
algebraisch	-	-	-	Fahrstrassen-Ausschlussstafel
Planmässige / ausserplanmässige Wartezeit	-	ANKE	ANKE	-

3.2 Manuell / rechnergestützt

Die Erstellung von Fahrplänen erfolgt heutzutage weitgehend erfahrungsbasiert. Der Computer wird insbesondere für eine rationellere grafische Bearbeitung eingesetzt, hingegen nicht für Berechnungen von Fahrplanstrukturen. Das bei den SBB verwendete Programm Viriato führt Änderungen sogleich in allen grafischen Darstellungen (Netzgrafik, verschiedene grafische Fahrpläne, Gleisbelegungspläne) nach. Dadurch sind die Auswirkungen von Modifikati-

onen einfacher fassbar. In Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die Stufe Verdichtungsbereich nicht verwendet wird.

Die Fahrzeiten der verschiedenen Züge werden von einem isolierten, in die Jahre gekommenen Programm namens Zuglaufrechnung (ZLR) berechnet. Sie können in die Programme Viriato und Syfa übernommen werden. Inzwischen ist ein eigenes Fahrzeitberechnungselement für Viriato in Entwicklung.

Bis rund ein halbes Jahr vor dem Fahrplanwechsel erfolgt die Planung mit dem modernen Programm Viriato, welches dem aktuellen Stand der Technik entspricht und hohen Benutzerkomfort bietet. Da in den verschiedenen Bereichen der SBB das rudimentäre Programm Syfa (System Fahrplan) verankert ist, wird die weitere Planung auf diesem System vorgenommen. Die aktuellen Daten können von den Stellen der Fahrzeug-, Unterhalts- und Personalplanung abgerufen werden.

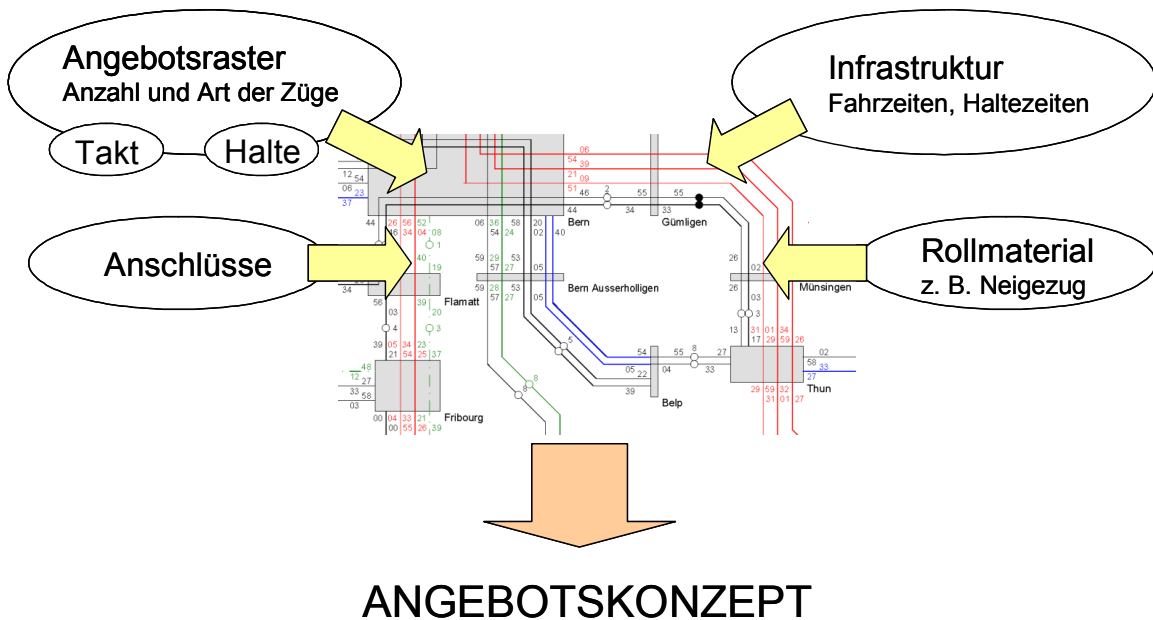
Die Fahrplanplanung erfolgt bei den SBB zehntelsminutengenau. Die Daten werden bei der grafischen Ausgabe und bei der Weitergabe an die Betriebsführung jedoch auf Minuten gerundet.

Die Übergänge zwischen den nachfolgend beschriebenen Arbeitsgängen sind ausgesprochen fließend. Schon während der generellen Planung wird die Stabilität des Fahrplanes im Auge behalten, indem typische störungsanfällige Konstellationen vermieden werden. Um das parallele, wechselhafte Vorgehen aufzuzeigen, wird es in die eigentliche Fahrplanerstellung und die Stabilitätsbetrachtungen unterteilt.

3.2.1 Erstellung produzierbarer Planfall

Die Planung von Eisenbahnfahrplänen beginnt mit der Erstellung von Angebotskonzepten. Die Netzgrafik ermöglicht, die aus der Kundenperspektive wichtigen Parameter Takt, Anschlüsse und Halte unter Berücksichtigung von Infrastruktur- und Rollmaterialbasisdaten in einem Überblick netzweit zu koordinieren.

Abbildung 3 Planung Angebotskonzept mittels Netzgrafik

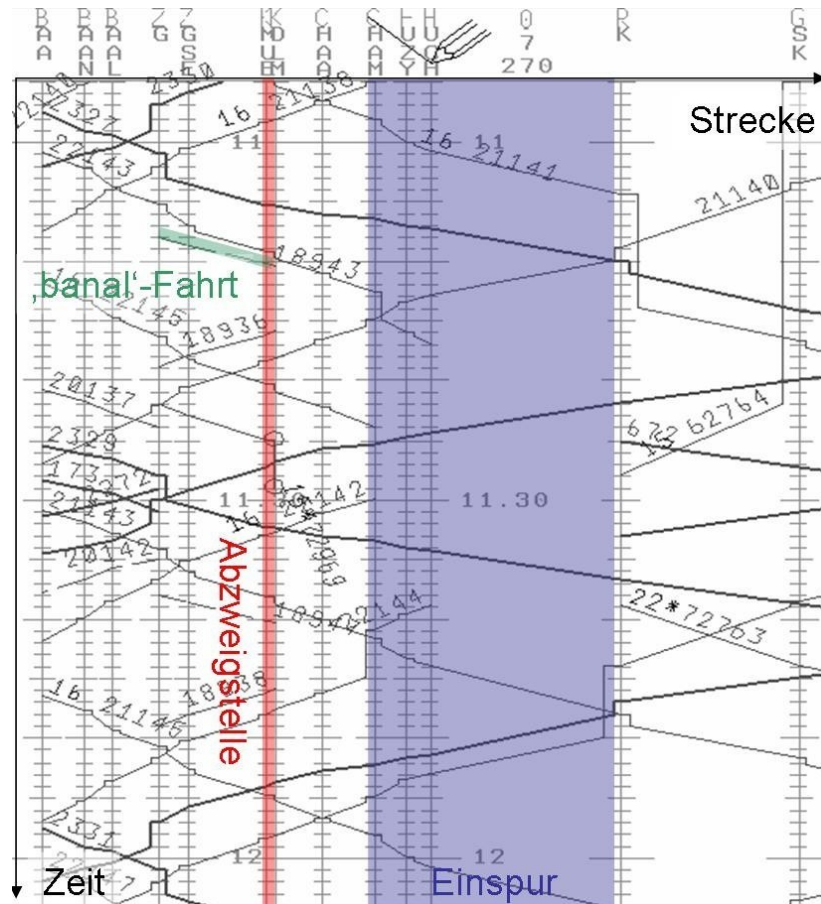


Quelle: Fahrplankonstruktions-System Viriato von SMA+Partner

In einem nächsten Schritt wird die Machbarkeit je Strecke überprüft. Dazu ist die Darstellung im Weg-Zeit-Diagramm („grafischer Fahrplan“) gebräuchlich. Er zeigt Kreuzungskonflikte auf Einspurstrecken und an Abzweigstellen auf. Auch unzureichende Zugfolgezeiten sind bei entsprechender Erfahrung ersichtlich.

Im grafischen Fahrplan werden genauere Fahrzeiten je Zugskonfiguration verwendet. Auf den Strecken werden die (in Fahrtrichtung) benützten Gleise ausgewiesen (Linienart: durchgezogen = links, gestrichelt = rechts („banal“)). In den Bahnhöfen ist der jeweilige Fahrweg nicht definiert.

Abbildung 4 Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan



Quelle: grafischer Fahrplan der Strecke (Zürich –) Baar – Zug – Gisikon (–) Luzern)

In Gleisbelegungsplänen wird die Zuordnung der Züge auf die verschiedenen Gleise eines Bahnhofes durchgeführt. Dabei müssen neben den eigentlichen Bahnhofgleisen auch die Weichenköpfe beachtet werden. Für gleichzeitige Ein- und Ausfahrten muss die Topologie über konfliktfreie Fahrwege verfügen.

Im Kernbereich der Knoten, dem zentralen Bahnhof und den unmittelbar angrenzenden komplexen Weichenregionen, sind Mitarbeiter der Betriebsführung für die genaue Zuteilung der Fahrstrassen zuständig. Im meist stark beanspruchten Raum ist der Koordinationsaufwand zwischen den verschiedenen Verantwortlichen besonders gross. Unterschiedliche Auffassungen bezüglich Risiko für Fahrplaninstabilitäten treffen aufeinander. Um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten, werden pauschale Reserven beigegeben, welche topologische oder fahrzeug-

spezifische Effekte auffangen. Im Bereich Fahrstrassenknoten fehlt beim heutigen Verfahren eine übersichtliche Darstellungsform.

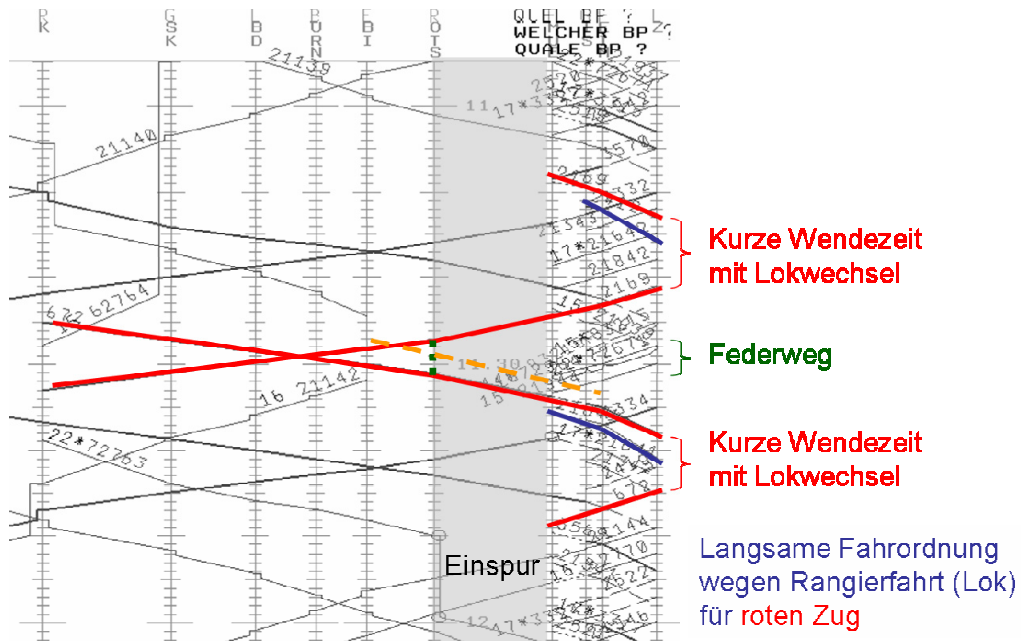
Im alltäglichen Betrieb müssen Züge oft im Knotenbereich vor geschlossenen Signalen bremsen, da sie auf der offenen Strecke und möglicherweise im Aussenbereich des Knotens vorzeitig verkehren können, ohne dass sich Konflikte ergeben. Die langsame Fahrt im Knotenbereich bedeutet aber die verlängerte Blockierung hoch belasteter Infrastrukturelemente. Um die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf andere Züge abzufangen, benötigt das System weitere Reserven. Die mehrheitlich im Knotenbereich vorgehaltenen Reserven lassen sich in bestehenden Fahrplänen nur schlecht spezifischen Zügen oder Topologieeffekten zuordnen.

Die Fahrplanstruktur wird zehntelsminutengenau erarbeitet, bei der Weitergabe der Daten geht diese Genauigkeit jedoch verloren, da die Fahrplandaten auf Minuten gerundet werden. Die Betriebsführung kann sich somit nur auf minutengenaue Vorgaben stützen.

3.2.2 Beurteilung bezüglich Stabilität

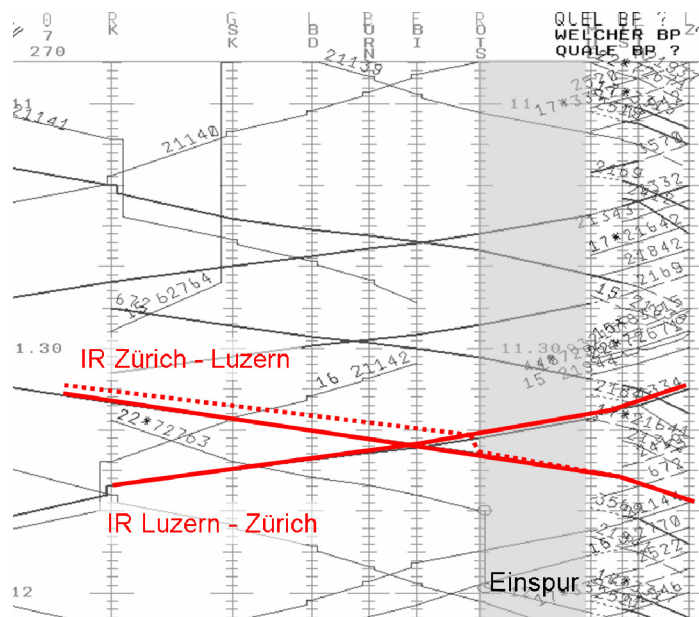
Bei der Planung eines Fahrplanes wird von den Planern dessen Stabilität stets im Auge behalten. Insbesondere bei der Beurteilung der Stabilität eines Fahrplanes spielt die Erfahrung der Planer eine wichtige Rolle. Häufig werden die möglichen Probleme in der Diskussion von mehreren Personen eruiert (Delphi-Methode). Als eine allgemeine Regel gilt, dass drei Minuten Verspätung innerhalb einer Taktfrequenz aufgefangen werden können und nicht von einem den Knoten verlassenden Zug auf einen zulaufenden übertragen werden sollen. Bei Vorgaben des übergeordneten Fahrplangefüges wird in einzelnen Fällen ein erhöhtes Risiko eingegangen, um nicht für das Gesamtnetz wichtige Strukturen zu verhindern. Es ist allerdings eine entsprechende Kompensation zwingend. Bei der Beurteilung einer konkreten Situation wird die Kaskade der Folgen einer Verspätung, die Verspätungsübertragung auf andere Züge begutachtet. In den Abbildungen 5 und 6 sind typische Fälle dargestellt, wie Stabilitätsüberlegungen in die Fahrplanerstellung einfließen. Die IC/IR Basel – Locarno und umgekehrt (rot) haben zwischen Olten und Arth-Goldau eine straffe Fahrordnung. In der kurzen Wendezeit in Luzern muss eine Lok beigestellt werden. Diese Rangierfahrt muss unmittelbar nach Einfahrt erfolgen, da das Gleisfeld anschliessend von anderen Zügen belegt wird. Würde die von Zug herkommende S1 von Ebikon nach Luzern verlängert (gelb, nur zweistündlich in alternierender Richtung möglich), so würde sich eine Verspätung des IC/IR unvermindert auf den Gegenzug auswirken.

Abbildung 5 Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan



Quelle: grafischer Fahrplan der Strecke (Zürich –) Baar – Zug – Gisikon (– Luzern)

Abbildung 6 Bewirtschaftung Streckenzug mittels grafischem Fahrplan



Quelle: grafischer Fahrplan der Strecke (Zürich –) Baar – Zug – Gisikon (– Luzern)

Bei den beiden IR Zürich – Luzern und umgekehrt wird gemäss Abbildung 6 ein kleinerer Federweg (2 Minuten) akzeptiert. Dieser funktioniert nur, wenn für den IR Zürich – Luzern im Zulauf auf die Einspur eine reduzierte Geschwindigkeit signalisiert wird (Tiefhaltung). Da seine Fahrordnung jedoch grosse Reserven aufweist, folgt dieser Zug meist der gestrichelten Linie und muss vor der Einspur warten. Deshalb wird seine anschliessende Fahrordnung so bemessen, dass er sie bei pünktlichem Verkehren des IR Luzern – Zürich auch aus dem Stand erreichen kann. Der knapp bemessene Federweg wird zudem akzeptiert, da eine leicht verspätete Ankunft im Knotenbahnhof (rechts) keine Folgeverspätungen verursacht.

3.2.3 Iterative Korrekturen, iterative Belastungserhöhung

Stellt sich eine Konstellation im operativen Betrieb als ungünstig heraus, werden soweit möglich sofort (Benützung von alternativen Fahrstrassen) oder beim nächsten Fahrplanwechsel Anpassungen vorgenommen. Ebenfalls anhand der Erfahrungen im operativen Betrieb können zusätzlich nutzbare Trassen im Fahrplangefüge eruiert werden. Dank den mit dem Programm OpenTimetable aufgearbeiteten Daten der effektiven Fahrlagen der Züge wird ersichtlich, ob eine im Planfall freie Trasse oftmals von verspäteten Zügen verwendet wird. Solche Trassen können nicht ohne Auswirkungen auf den übrigen Fahrplan für einen weiteren Zug vergeben werden, es handelt sich eigentlich um eine Reserve des bestehenden Fahrplanes.

3.2.4 Operative Betriebsführung

Entscheidend für die Ausnutzung der Kapazität einer Anlage ist, inwieweit mit Massnahmen der Disposition ein dichtes Betriebsprogramm trotz Störungen abgewickelt werden kann. Dabei ist die Ausrüstung der Disponenten-Arbeitsplätze mit Hilfsmitteln, welche eine gute Übersicht bieten wichtig. Sie ermöglichen einen breiteren Handlungsspielraum und raschere Entscheidungen. Ebenfalls von grosser Bedeutung ist, wie grosse Abweichungen vom Planfall zugunsten der Stabilität zugelassen werden.

Der planmässige Betriebsablauf wird von der Leittechnik automatisch geführt. Den Zügen werden die vorgegebenen Fahrstrassen in der geplanten Reihenfolge zugewiesen. Das aktuelle Betriebsprogramm wird in täglich angepasster Form eingegeben. Dabei können Modifikationen der Fahrstrassenbenützung einfließen, falls die aktuelle Konstellation geeigneter Betriebsverhältnisse zulässt. Auch der Fahrdienstleiter kann während des laufenden Betriebes Modifikationen in der Fahrstrassenzuweisung vornehmen, falls sie ihm aufgrund eines vom Planfall abweichenden Betriebszustands sinnvoll erscheinen. Um die Flexibilität hoch zu hal-

ten, kann der Fahrdienstleiter auch die Abfolge von Zugfahrten tauschen oder gar so disponieren, dass zwei Züge gleichzeitig einen vorausliegenden Streckenabschnitt belegen würden und den Vorrang dem zuerst ankommenden vergeben. Der Fahrdienstleiter muss die benötigten Rangierfahrten berücksichtigen und die dafür notwendigen Fahrstrassen vergeben.

Der Kenntnisstand der einzelnen Triebfahrzeugführer über die allgemeine Betriebslage ist gering. Sie sehen nur die unmittelbar vor ihnen liegenden Signale und allenfalls diejenigen der Gegenrichtung. Aus diesen Informationen, zusammen mit der Erfahrung, versuchen sie zeitraubende Signalhalte zu vermeiden.

3.2.5 Manuelle / rechnergestützte Fahrplankonstruktion in Japan

Trotz der sehr hohen Auslastung der Anlagen der japanischen Eisenbahnen erfolgt die Fahrplankonstruktion stark erfahrungsbasiert. Es kommt bis anhin nur eine unterstützende Funktion des Computers zur Anwendung. Die Vorgehensweise ist derjenigen der SBB erstaunlich ähnlich, allerdings erfolgt die Planung zeitlich präziser. Die besonders dichten Zugfolgen werden auf standardisierteren Infrastrukturen abgewickelt: Da jede Zugart in kurzen Taktfolgen verkehrt, ist eine Durchmischung von vielen Destinationen nicht machbar; es ergeben sich dagegen vermehrt Ein- und Ausfädelungen. Die Abläufe unterscheiden sich nicht grundsätzlich von den schweizerischen Strukturen; sie sind jedoch über sämtliche Teilbereiche von Planung und Betrieb durchoptimiert, indem eine einfach strukturierte, konsequente Prozessstruktur angewandt wird. Wichtige Elemente sind die Bewirtschaftung des Fahrgastflusses zu und auf den Perrons, Fahrgast-Einweiser auf den Perrons, präzise Vorgaben für das Fahrpersonal, Vorhalten von Ausweichgleisen für die Entfernung von verspäteten Zügen oder für Wendemanöver bei Streckenunterbrüchen. Bei dem enorm hohen Transportvolumen lohnt sich personeller und infrastruktureller Mehraufwand für einen leistungsfähigeren Betrieb.

3.3 DONS

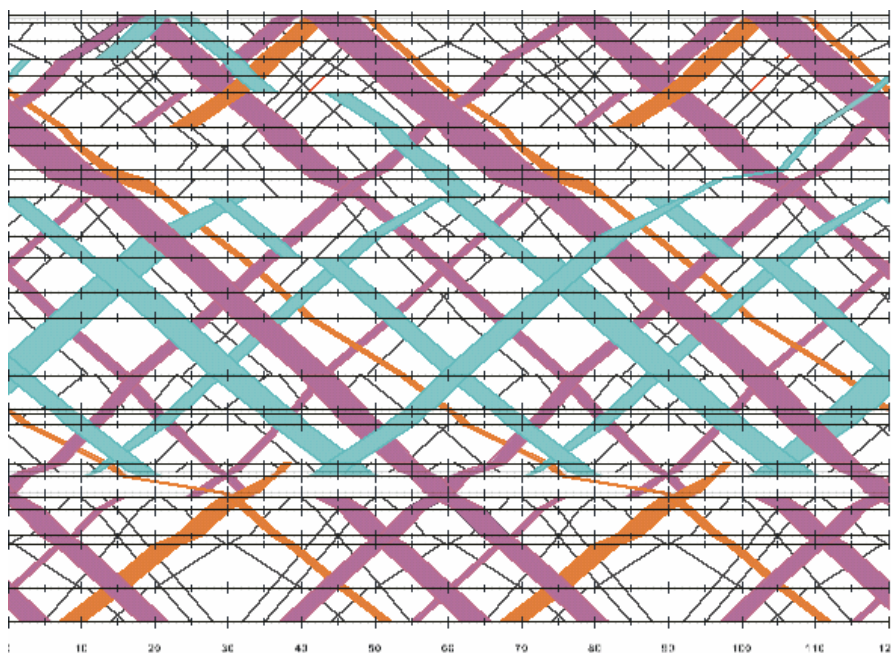
Das Verfahren DONS wurde von der Niederländischen Eisenbahn entwickelt und wird insbesondere für die strategische Planung von Infrastrukturausbauten und Fahrplankonzepten verwendet. Die beiden langfristigen Komponenten Infrastruktur und Verkehrsentwicklung können in Zusammenhang gebracht werden. Verschiedene Szenarien der Fahrplanverdichtung können mit entsprechenden Infrastrukturausbauten verglichen werden.

Das System DONS (Designer of Network Schedules) besteht aus einem zweistufigen Verfahren. In einem ersten Schritt wird der netzweite Grundtakt aufgestellt. Das zugehörige Instrument CADANS modelliert das Netz abstrakt mit den Elementen Bahnhof, Strecke und Abzweigstelle ohne Betrachtung der verwendeten Fahrstrassen in den Bahnhöfen. In einem zweiten Schritt wird mit dem Instrument STATIONS eine konfliktfreie Belegung der Bahnhofsinfrastruktur konstruiert. Ergeben sich in Bahnhöfen nicht beseitigbare Konflikte, so ist erneut in CADANS nach Optimierungsmöglichkeiten zu suchen.

3.4 CAPRES / AFAIG

Das Institut LITEP der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne (EPFL) hat ein Verfahren für strategische Planungen erarbeitet, welches analog zum niederländischen Modell in zwei Instrumente gegliedert ist. CAPRES betrachtet einen Streckenzug bezogen auf die Infrastrukturnutzung mit reduzierter Genauigkeit, AFAIG bietet eine feinere Auflösung für Bahnhofsbereiche. Das Verfahren wurde bereits für strategische Planungen bei den Schweizerischen Bundesbahnen verwendet, insbesondere auf den Gütertransitachsen im Hinblick auf die Eröffnung der NEAT-Basistunnels.

Abbildung 7 CAPRES: Fahrplan-Sättigung mit Güterzügen



Quelle: Lucchini, Curchod, Rivier; 2001

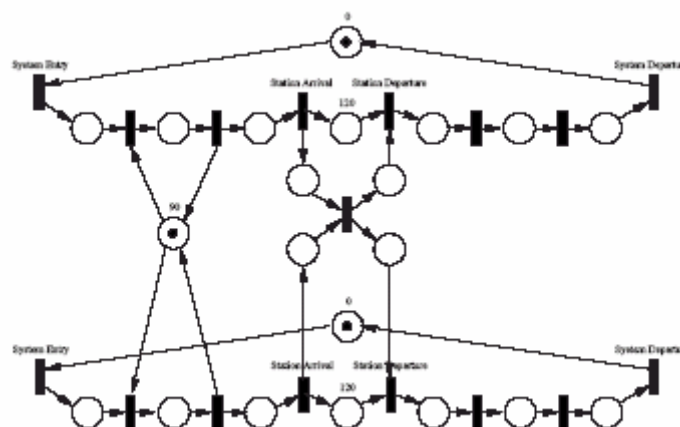
3.5 Simulation

Mit Simulationen werden Betriebsprogramme erzeugt oder überprüft. Zwei Kategorien von Simulationen werden unterschieden. Bei der asynchronen Simulation wird der Fahrplan für jeden einzelnen Zug getrennt berechnet. Weitere Züge werden zwischen bereits eingelegten eingefügt. Daher ist eine vorgängige Priorisierung der Züge notwendig, das Berechnungsverfahren entspricht einer Fahrplankonstruktion. Die allgemein übliche Simulationsform ist die synchrone. Mit dieser können geplante Betriebsprogramme auf ihre Realisierbarkeit überprüft werden, indem gleichzeitig ablaufende Prozesse synchron nachgebildet werden. Sämtliche Zugfahrten werden auf einem realitätsnahen Infrastrukturmodell simuliert, daraus ergeben sich allfällige Behinderungen von Zugfahrten, welche wiederum Auswirkungen auf nachfolgende Zugfahrten haben können. Auch die Entwicklung von Folgeverspätungen können anschaulich ermittelt werden.

3.6 Burkolter (Petri Netze)

Die von Burkolter vorgeschlagene Kapazitätsanalyse von Eisenbahnknoten wird ebenfalls in zwei Ebenen der Infrastrukturabstraktion vorgenommen. Auf der Stufe Verdichtungsbereich werden die Abhängigkeiten der Zugfahrten (Anschlüsse, Einspurstrecken) mittels eines Petri Netzes dargestellt. Dabei wird die Anzahl Gleise je Streckenabschnitt zwischen zwei Weichenregionen berücksichtigt. Die Kapazität der Weichenregionen wird auf dieser Stufe als

Abbildung 8 Petri Netz Beispiel



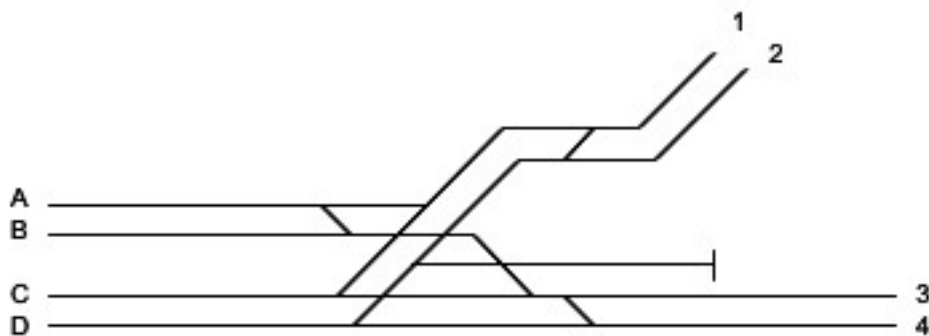
Quelle: Burkolter, 2005

unendlich angenommen. Durch die Festlegung einer Zugreihenfolge wird das Petri Netz in einen Ereignisgraphen ohne Entscheidungspunkte überführt. Mit MaxPlus Algebra kann die Zykluszeit dieses Ereignisgraphen minimiert werden, woraus ein provisorischer Fahrplan hervorgeht. Auf der Stufe Fahrstrassenknoten wird dieser Fahrplan auf seine Konfliktfreiheit in den Weichenregionen kontrolliert. Die Bereinigung erfolgt entweder durch kleinere, iterative Justierungen ohne grössere Auswirkungen auf die obere Stufe oder durch eine zusätzliche Restriktion im Petri Netz. Die Abbildung 8 zeigt ein Petri Netz für zwei Züge mit einer Anschlussbeziehung (Mitte) und einem von beiden Zügen benutzten Einspurabschnitt (links).

3.7 Fahrtenabhängigkeitsplan

In einem Fahrtenabhängigkeitsplan werden analog zu einem Gleisplan sämtliche möglichen Fahrstrassen eines Fahrstrassenknotens gegen die Zeit aufgetragen. Anschliessend werden Züge gemäss einem definierten Betriebsprogramm eingelegt. Die verwendete Fahrstrasse wird mit einer speziellen Signatur in der zeitlichen Länge der Belegung dargestellt. Mit einer andern Signatur werden die durch diese Zugfahrt ausgeschlossenen Fahrstrassen markiert. Abkreuzende und ausfädelnde Fahrstrassen erhalten eine verkürzte Dauer infolge der Teilfahrstrassenauflösung. Weitere einzulegende Züge dürfen auf ihrer Fahrstrasse mit keiner aus-

Abbildung 9 Beispiel Topologie Fahrstrassenknoten



geschlossenen Fahrstrasse überlappen, hingegen dürfen sie gleiche Fahrstrassen wie ein anderer Zug ausschliessen. Dies bedeutet, dass sich die Ausschlusssignaturen verschiedener Züge überlappen dürfen. Der vollständige Fahrtenausschlussplan kann für eine Kapazitätsbemessung komprimiert werden. Die Belegungszeiten sämtlicher Züge werden soweit verschoben, als dass von vorausfahrenden Zügen verursachte Ausschlüsse dies ermöglichen.

Anhand der Abbildungen 9 bis 11 ist das Prinzip an einem Beispiel dargestellt. Auf der Topologie gemäss Abbildung 9 soll die Fahrtenfolge über die Fahrstrassen A1, B3, 2A, 4D, 4B, 2C, A3, D1, 2B, 4C abgewickelt werden. Die Sperrzeit des gesamten Gleisabschnitts dauert als vereinfachende Annahme stets zwei Zeiteinheiten; bereits nach einer Zeiteinheit werden die Weichen freigegeben. Der zugehörige Fahrplan (Abbildung 10) wird komprimiert (Abbildung 11). Die minimale Zeitdauer für das definierte Betriebsprogramm dauert demnach noch 14 anstatt 20 Zeiteinheiten.

Abbildung 10 Fahrtenabhängigkeitsplan Planfall

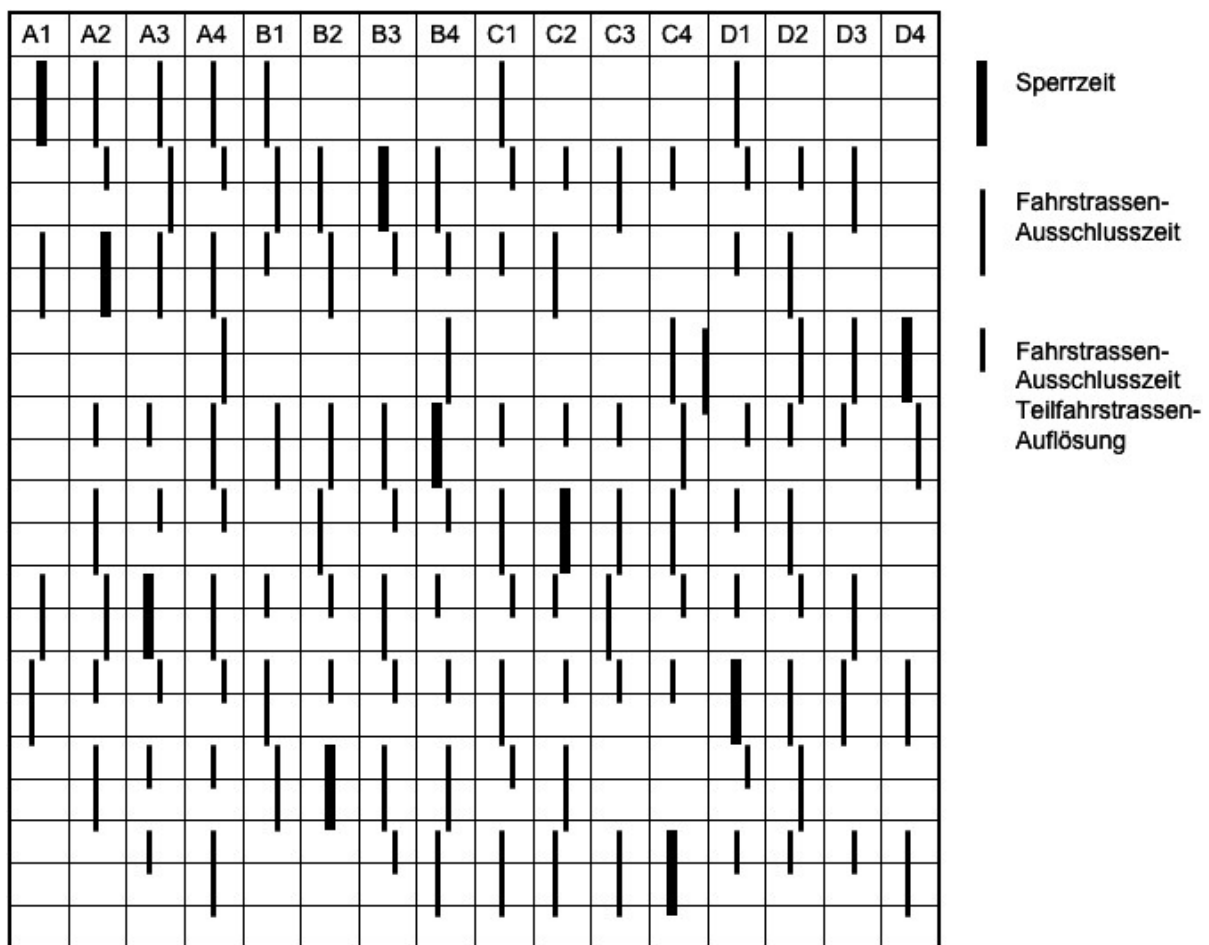
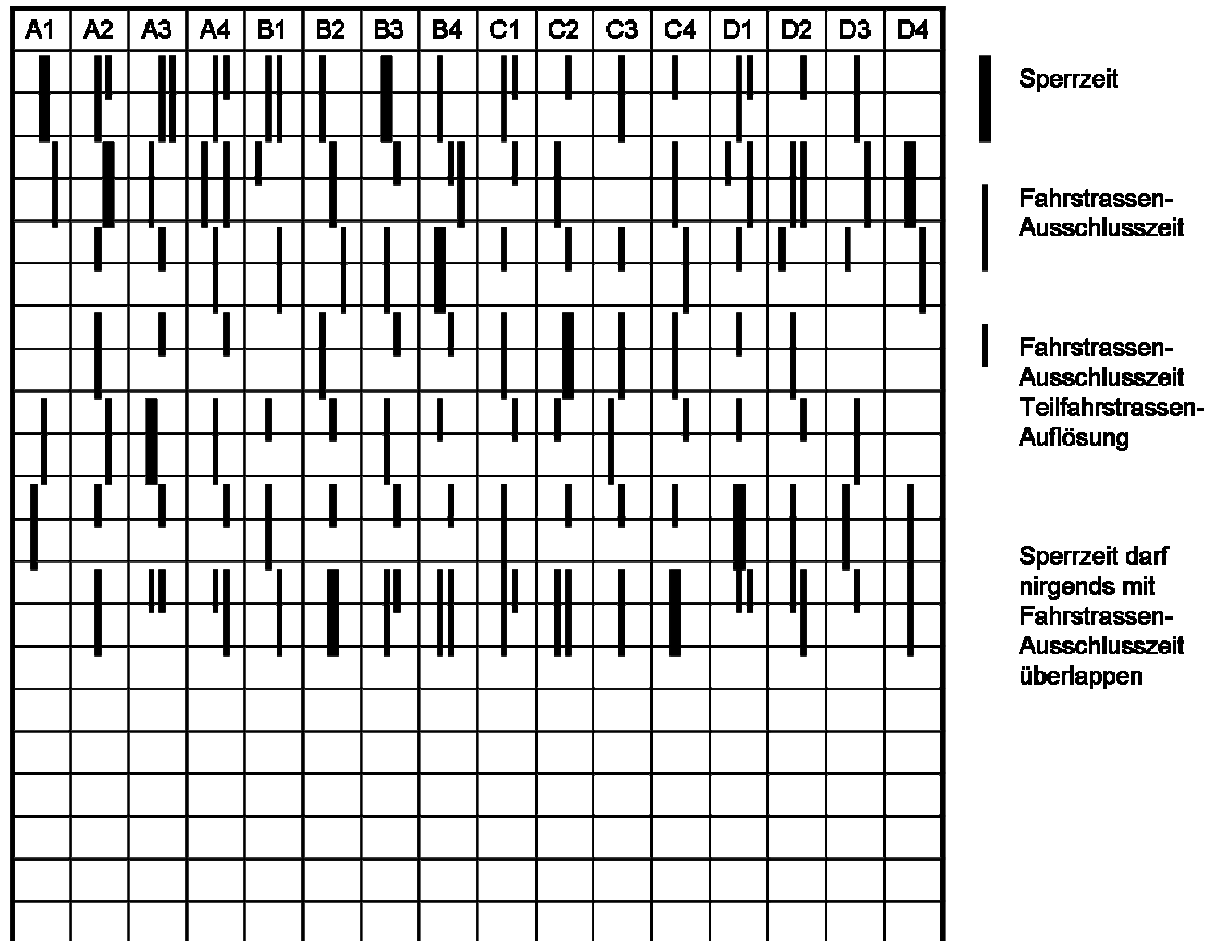


Abbildung 11 Fahrtenabhängigkeitsplan komprimiert



3.8 UIC-Formel

Die UIC-Formel wurde für Strecken aufgestellt. Sie besagt, dass die auf einer Strecke fahrenden Züge unterschiedlicher Art mit ihren Belegungszeiten dicht aneinander gereiht werden, ohne Berücksichtigung von Reserven. Es können Aussagen über die Auslastung und die verbleibenden Reserven je Streckenabschnitt gemacht werden. Die nur vermeintlich vorhandenen Freiräume zwischen unterschiedlich schnellen Zügen werden aufgezeigt. Einfachere Abkreuzungsfälle können problemlos berücksichtigt werden. Das prinzipielle Vorgehen kann auf Knoten angewendet werden.

3.9 Fahrstrassen-Ausschlussstafel

Den stärksten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit in Knoten haben Abkreuzungskonflikte. Sie treten in den Weichenköpfen der zentralen Bahnhöfe, aber auch bei Abzweigstellen auf. Die verschiedenen Weichenzonen eines Knotens stehen zwar in einer ausgeprägten Abhängigkeit zueinander, trotzdem ist in Zonen mit häufigen Abkreuzungskonflikten die örtliche Leistungsfähigkeit von grosser Bedeutung.

Die Fahrstrassen-Ausschlussstafel vergleicht in der Form einer Matrix sämtliche Fahrstrassenkombinationen in einem Fahrstrassenknoten auf die Möglichkeit der gleichzeitigen Verwendung. Anhand des Verhältnisses der nicht möglichen Kombinationen zu allen Kombinationen kann ein infrastrukturentypischer Ausschlussgrad definiert werden. Die Bewertung der Fahrstrassenkombinationen kann zusätzlich mit der Häufigkeit der Verwendung (Anzahl Züge je Fahrstrasse) gewichtet werden, um eine betrieblich relevantere Leistungsgrösse zu erhalten.

3.10 ANKE (Analytische Netzkapazitätsermittlung)

Es bestehen verschiedene Instrumente, welche analytische Leistungsfähigkeitsnachweise ermöglichen. Es werden die planmässigen Wartezeiten berechnet, die bei der Fahrplanerstellung aufgrund der Verschiebung der Züge aus deren Wunschlage entstehen. Als ausserplanmässig werden Wartezeiten im Betriebsablauf bezeichnet, welche als Folge von Verspätungen entstehen. Es werden bedienungstheoretische Modelle zur Quantifizierung von Wartezeiten im Fahrplan, sowie wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle zur Berechnung der Folgeverspätungen im Betriebsablauf verwendet. Zur Anwendung analytischer Modelle muss die Infrastruktur in sogenannte Teilfahrstrassenknoten als einstellige Bedienungssysteme unterteilt werden. Diese werden vor der Berechnung aufgrund der Infrastruktur automatisch abgegrenzt. Bei der Berechnung der Mindestzugfolgezeiten werden alternative Fahrmöglichkeiten zur Bestimmung der Kreuzungsabschnitte ermittelt. Anschliessend werden dann die planmässigen sowie die ausserplanmässigen Wartezeiten bestimmt. Es können Engpässe im Netz lokalisiert werden. Im Bereich der vollen Kapazitätsauslastung steigen die Wartezeiten im System stark an. Aufgrund dieser Beziehung kann eine nur teilweise vom Betriebsprogramm abhängige Aussage zur Kapazität einer Anlage gemacht werden.

4 Methode PULS

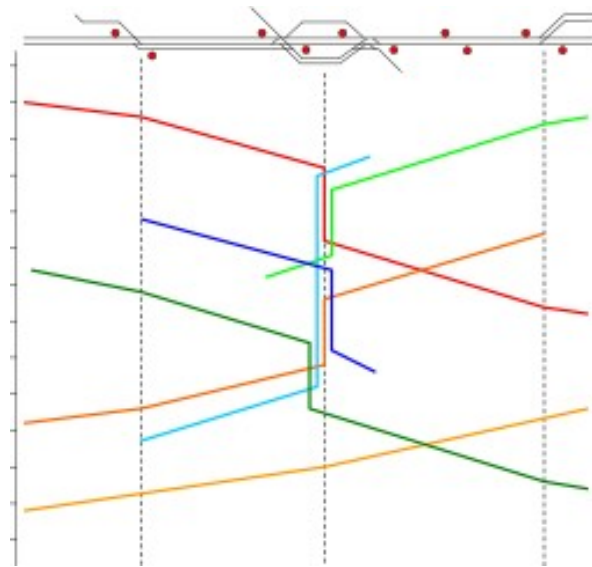
Die Methode PULS ist als praxisorientiertes Instrument der Definition ‚Produktion‘ zuzuordnen, mit dem Ziel, operativ machbare Fahrpläne zu erzeugen. Sie findet auf der Stufe Verdichtungsbereich Verwendung, wo die stärksten Kapazitätsengpässe auftreten und zugleich eine hohe Komplexität herrscht. Die Stufe Fahrstrassenknoten ist vollständig integriert, die Betrachtung auf unterschiedlichen Ebenen ist nicht nötig. Geeignete Instrumente der Systemumgebung ermöglichen die Koordination auf Stufe Netz bzw. Streckenzug.

4.1 Konzeptidee

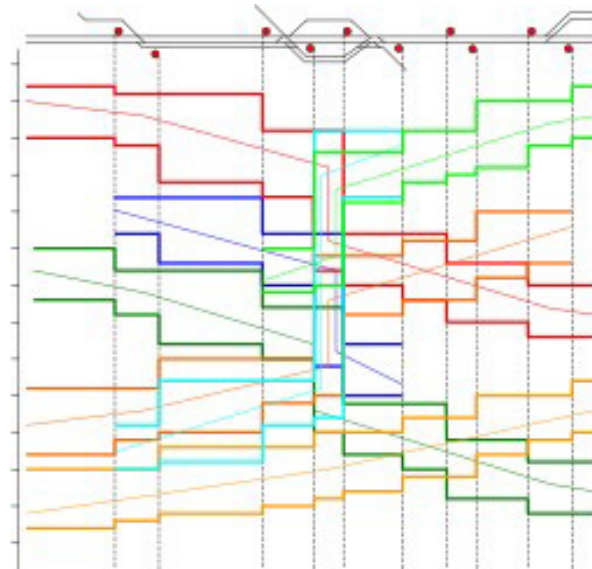
Durch eine Rasterung der möglichen Fahrlagen von Zügen im Bereich der Zugfolgezeit kann mit der Methode PULS die Lösungsmenge für die Fahrplanplanung sehr stark reduziert werden. Durch ein geeignetes Optimierungsverfahren wird ein Lösungsbereich eingegrenzt, welcher die vorhandene Infrastruktur besonders vorteilhaft nutzt. Der verbleibende Lösungsbereich, welcher auch auf die regelmässig verkehrenden Zugstypen zugeschnitten ist, wird als eine formale Struktur, dem PULS-Raster dargestellt. Das PULS-Raster ist nur im Falle von Änderungen an Infrastruktur oder Zugsmix neu zu erstellen, Fahrplananpassungen können jederzeit vorgenommen werden. Auf dem verschiedenartig nutzbaren PULS-Raster erfolgt die Belegung mit konkreten Zügen (Fahrplankonstruktion)

Die Rasterung erfolgt durch eine örtliche und zeitliche Diskretisierung. Die Gleisanlage eines Verdichtungsbereiches wird in Elemente ‚Weichennest‘ und ‚Gleisabschnitt‘ unterteilt. Die Diskretisierung ermöglicht eine ‚digitale‘ Handhabung des Zugverkehrs: Ein Weichennest / Gleisabschnitt ist während eines Pulses entweder belegt oder frei. Da die vorhandene Infrastruktur und entsprechende Betriebsformen mit vorgegebenem Rollmaterial im PULS-Raster abzubilden sind, sind die Verhältnisse für eine saubere binäre Handhabung nicht in allen Fällen vorhanden, wodurch sich verschiedene Restriktionen für die Belegung ergeben. Das PULS-Raster soll jedoch soweit abgestimmt sein, dass der Fahrplanplaner bei der Belegung mit Zügen ein stark vereinfachtes Regelwerk behändigen kann. Im Bereich der Weichennester ist die Prüfung mehrerer Fahrstrassen in demselben Puls anhand der Ausschlussmatrix durchzuführen.

Abbildung 12 Konzeptidee PULS

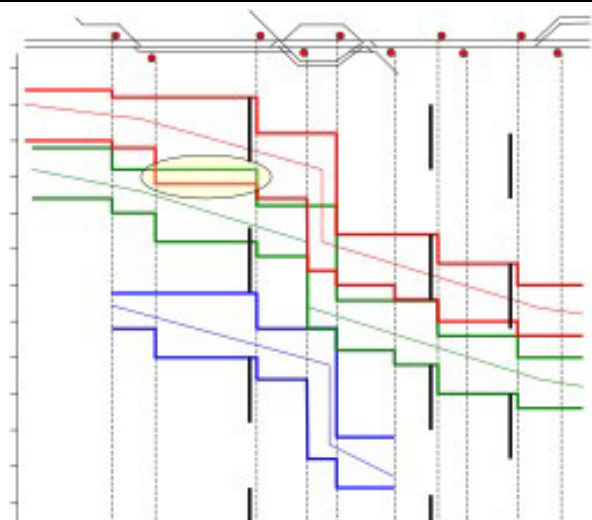


Grafischer Fahrplan
(für manuelle Fahrplankonstruktion
verwendete Darstellung)



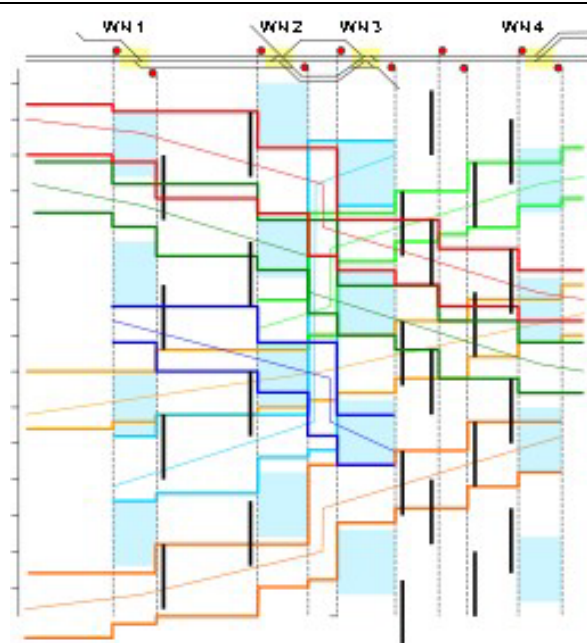
Sperrzeitentrepfen
(unveränderte Fahrplanlage)

- *erhöhter Detaillierungsgrad*
- *für Infrastrukturnutzung massgebend*



Pulsdauer anhand der Folgefahrten

- *Reduktion der Lösungsmenge*
- *Restriktion Splitting*

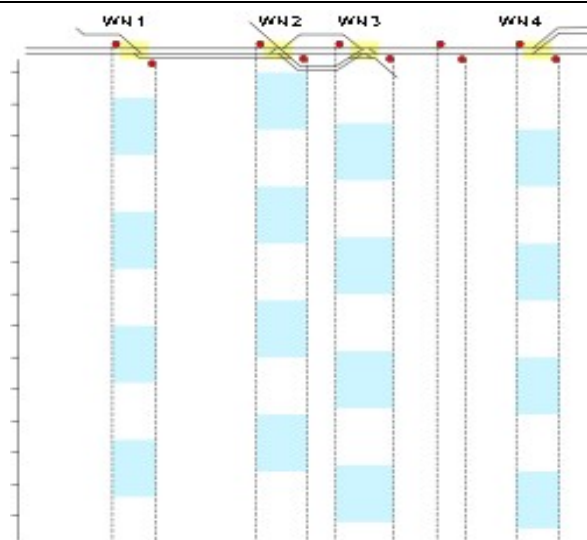


Optimierung Pulsphasen anhand der Gegenfahrten

- Fokussieren auf Lösungsmenge mit hohem Durchsatz
- Restriktionen für Gegenfahrten

Methodik

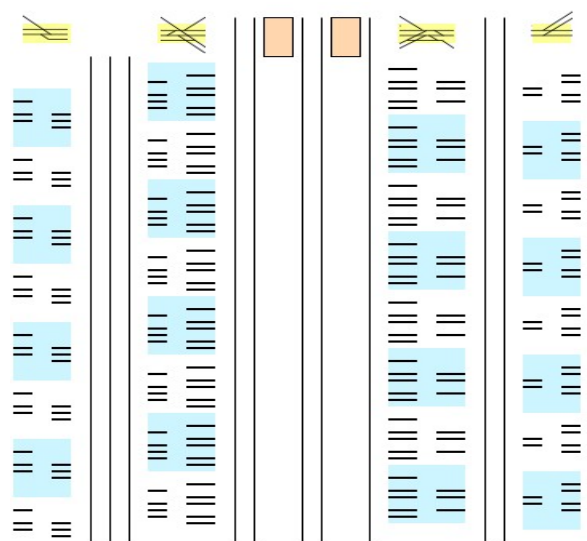
- Verflechten von Gegenfahrten unter Ausnützung der Teilfahrstrassenauflösung
- Ausnützung des Puls-Spielraumes je nach Zugstyp
- Homogenisierung: Begrenzung der Beschleunigung einzelner Zugstypen



PULS-RASTER

Optimiert für Infrastruktur und regelmässig verkehrende Zugstypen

Jeder Zugstyp hat innerhalb eines Pulses eine individuell definierte Fahrplage, die sich nach jeder Pulsdauer wiederholt

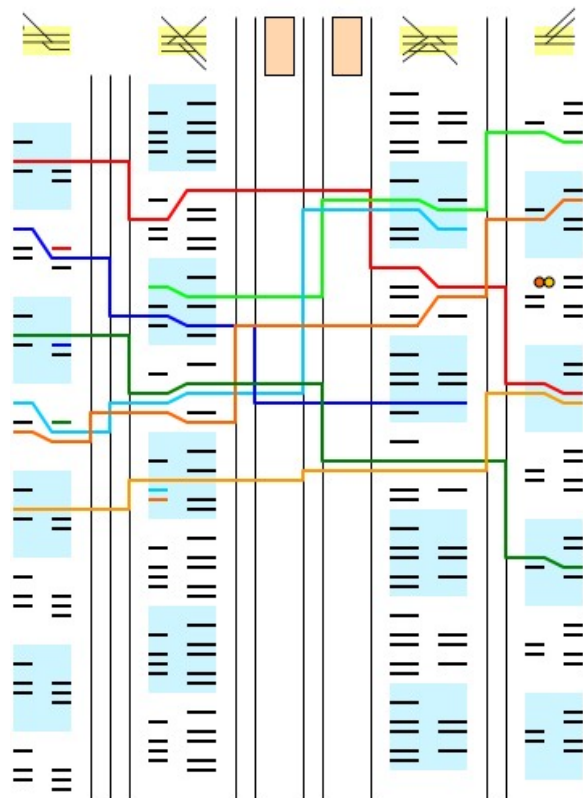


Grafisches Layout

Kombination ‚digitaler‘ grafischer Fahrplan und Gleisbelegungsplan

Elemente

- PULS-Raster
- Topologie (Gleiszahl) je Puls
- Gleise zwischen Weichennestern
- Perrons
- Topologie der Weichennester



BELEGUNG

Fahrplankonstruktion

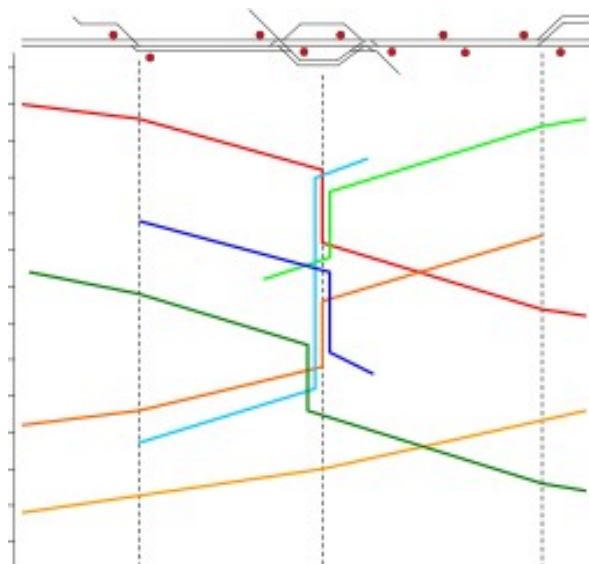
- *Rasches Auffinden von effizienten Konstellationen*
- *Gute Erfassbarkeit von Abhängigkeiten im Fahrplangefüge*

Restriktionen für Folge- und Gegenfahrten bilden infrastrukturbedingte Einschränkungen präzise ab

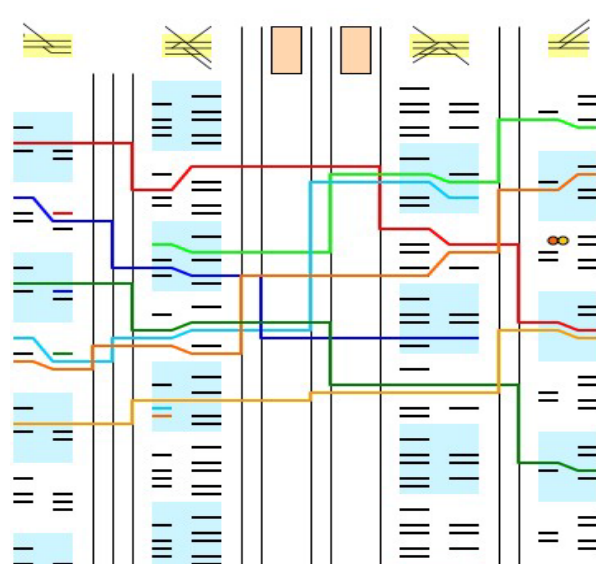
- *Lange Belegung Gleisabschnitt nach Weichennest*
- *Konflikte gewisser Zugstypen-Abfolgen aufgrund der Eigenschaften*
 - *Zuglänge*
 - *Beschleunigungsvermögen*
 - *Signalstandorte (Vorsignaldistanz)*
 - *Fahrweg (Geschwindigkeitsrestriktion)*

Vergleich desselben Fahrplangefüges im gleichen Zeitmassstab

manuell



PULS



4.2 Erstellung PULS-Raster

Das PULS-Raster ist gewissermassen ein ‚Formular‘, das eine schnelle Belegung der Infrastruktur mit üblichen Zügen nach einfachen Regeln ermöglicht. Die Vereinfachungen gehen so weit, dass der Planer Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Zügen sofort erkennt und Lösungsmöglichkeiten für Konfliktsituationen intuitiv erfassen kann.

Ein PULS-Raster ist ein präzises Abbild der Infrastruktur und des verkehrenden Rollmaterials. Ergeben sich Änderungen an der Infrastruktur durch einen Ausbau oder vor allem durch eine Einschränkung aufgrund von Unterhaltsarbeiten oder einer Störung, so ist ein neues PULS-Raster zu erstellen. Es berücksichtigt beispielsweise einen baubedingten Einspurabschnitt oder eine Langsamfahrstelle. Auch grössere Veränderungen im eingesetzten Rollmaterialbestand können ein neues PULS-Raster erfordern.

4.2.1 Verdichtungsbereich / Ausgleichsbereich

Vom gesamten Eisenbahnnetz werden besonders hoch belastete Teile als Verdichtungsbereiche ausgeschieden. Sie befinden sich meist im Umkreis grösserer Knotenbahnhöfe. Inwieweit Zulaufstrecken zu einem Verdichtungsbereich zu schlagen sind, ist abhängig von der Belastung von Weichennestern durch Abkreuzungen. Insbesondere Weichennester, in welchen zwei oder mehrere Hauptlinien ausserhalb des Knotenbahnhofes zusammenlaufen, benötigen eine optimale Bewirtschaftung und sollen daher verpulst werden. Der Verdichtungsbereich grenzt sich an den sogenannten Portalen von den anschliessenden Ausgleichsbereichen ab.

4.2.2 Verpulste Weichennester

Innerhalb eines Verdichtungsbereiches werden alle Weichennester verpulst, auf welchen regelmässig Abkreuzungen stattfinden. Im PULS-Raster für den Regelfall mit uneingeschränkt nutzbarer Infrastruktur nicht zu verpulsten sind insbesondere Spurwechsel, welche nur im Falle von Unterhaltsarbeiten oder Störungen verwendet werden. Verpulste Weichennester werden als Pulszonen bezeichnet.

Da die Fahrstrassenreservation im Eisenbahnbetrieb stets von Hauptsignal zu Hauptsignal erfolgt, müssen verpulste Weichennester vollständig innerhalb eines solchen Blockabschnittes liegen. Hauptsignal-Standorte innerhalb eines Weichennestes erfordern eine Aufteilung. Zwei in einem Blockabschnitt liegende Weichennester müssen gemeinsam verpulst werden. Die

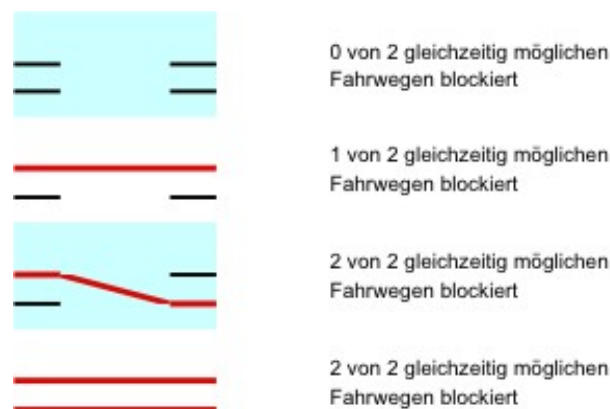
Signale sind jedoch mehrheitlich so angeordnet, dass nur ein Weichennest dazwischen liegt, da andere Formen auch bei nicht verpulster Bewirtschaftung hinderlich sind.

4.2.3 Margen

In Verdichtungsbereichen wird grundsätzlich auf Reserven in den Fahrzeiten verzichtet. Die im herkömmlichen Verfahren der Fahrplankonstruktion oftmals im Knotenbereich ausgewiesenen Fahrzeitreserven werden vor die Portalgrenzen verschoben. Jeder Zug erhält eine Trasse zugewiesen, die ungehinderte Fahrt durch den Verdichtungsbereich ermöglicht. Bremsmanöver aufgrund Warnung zeigender Vorsignale werden systematisch vermieden, da sie eine grosse Kapazitätseinbusse bedeuten. Die Fahrten müssen allerdings in einem eng eingegrenzten Zeitfenster stattfinden, um keine anderen Züge zu tangieren. Die Triebfahrzeugführer sind nicht imstande, mit ihrem Zug exakt einer idealen Zeit-Weg-Linie zu folgen. Um die beherrschbare Varianz abzudecken, wird der minimalen Sperrzeit eine Sperrzeitmarge zugefügt.

Mit der Methode PULS wird die Permutation von Zügen ein einfach zu handhabendes Instrument der Disposition und die sich daraus ergebenden Reserven werden in vollem Umfang verfügbar. Die Belegungen von verschiedenen Zügen können flexibel abgetauscht werden. Um diesen Freiheitsgrad tatsächlich ausnützen zu können, ist allerdings ein gewisser Teil der potentiellen Fahrmöglichkeiten durch ein jeweiliges Weichennest freizuhalten. Da die Fahrzeitreserve auf den Ausgleichsstrecken ausgewiesen wird, können rechtzeitig verkehrende Züge bereits einen früheren Puls erreichen, was eine Flexibilität auch ohne Verspätung abgetauschter Züge ermöglicht. Der Anteil nicht belegter Fahrmöglichkeiten je Pulszone wird Erholungsmarge genannt.

Abbildung 13 Erholungsmarge



4.2.4 Zug-/fahrwegspezifische Sperrzeitentreppen

Zur Erstellung eines PULS-Rasters sind Sperrzeitentreppen für sämtliche verkehrenden Züge notwendig. Die Einflüsse auf die Elemente Sperrzeit und Fahrzeit, welche in einer Sperrzeitentreppe zusammengefasst sind, können vier Faktoren zugeordnet werden:

- Zuglänge (Verzögerung der Gleisfreimeldung)
- Beschleunigung (Traktion, Zuggewicht)
- Signalstandorte (Vorsignalabstand / Reservationszeitpunkt)
- Fahrweg (Geschwindigkeitsrestriktion)

4.2.5 Pulsdauer

Die Länge eines Pulses bemisst sich aus der Menge der regelmässig verkehrenden Züge. Für die Mehrheit der Züge soll die Sperrzeit für alle Blockabschnitte innerhalb der Pulsdauer liegen. Die Pulsdauer ist grundsätzlich in allen Weichennestern eines Verdichtungsgebietes gleich lang. Ausnahmen sind bei betrieblich wenig abhängigen Anlageteilen möglich. In einzelnen Pulszonen kann auch eine grössere Anzahl von Zügen eine erhöhte Sperrzeit aufweisen, trotzdem wird eine kurze Pulsdauer gewählt, um eine dichte Zugfolge in den übrigen Weichennestern zu ermöglichen. Die langen Sperrzeiten erfordern bei der späteren Belegung aus der heutigen Planung bekannte Strategien wie Splitting oder Bevorzugung von bestimmten Zugsabfolgen.

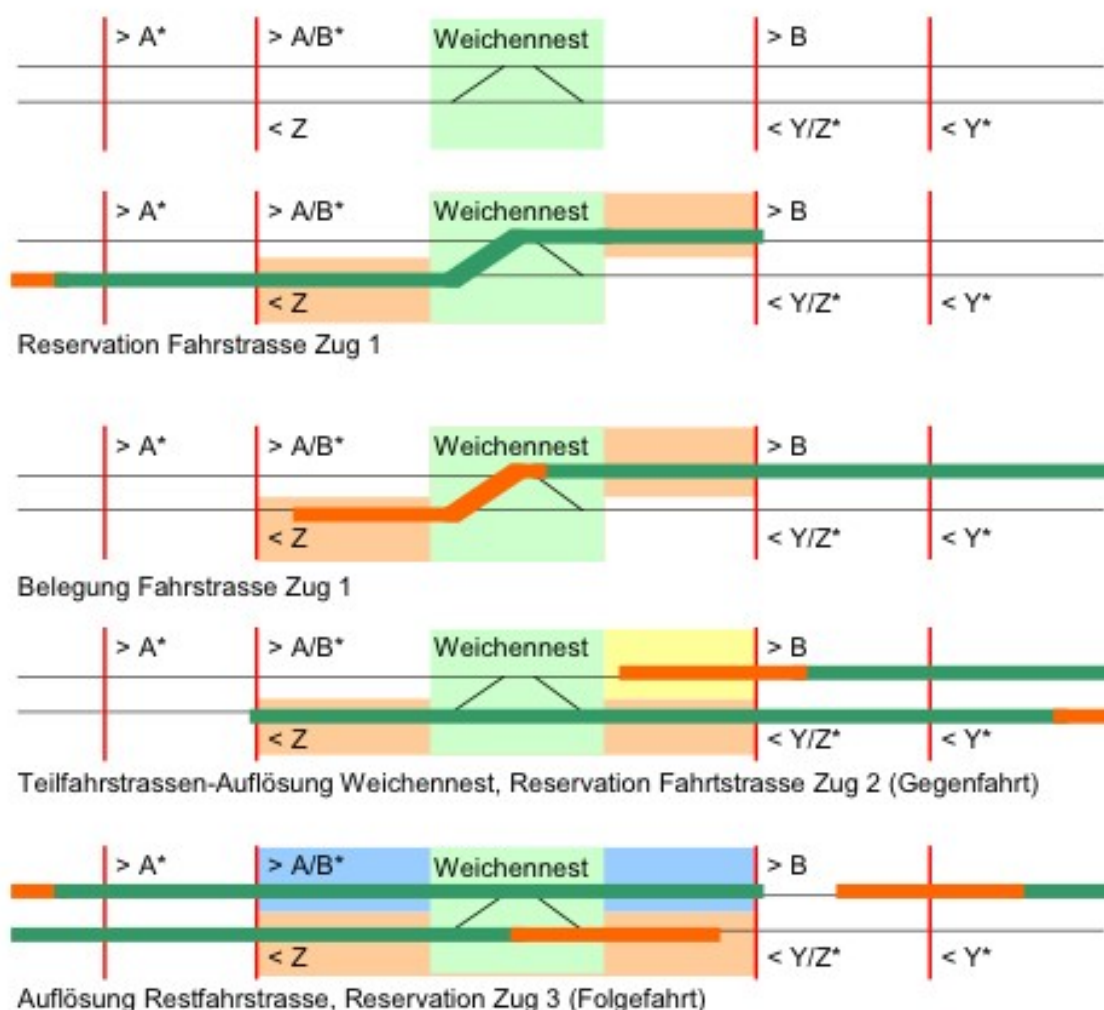
4.2.6 Pulsphasen

Bei der Festlegung der Pulsdauer werden die Beziehungen von Folgefahrten in beiden Richtungen unabhängig betrachtet. Mit den Pulsphasen wird die zeitliche Lage beider Richtungen aufeinander abgestimmt. Eine hohe Effizienz der Verpulsung ist dank der Ausnutzung der Teilfahrstrassenauflösung (TFA) möglich, da dadurch eine Verflechtung von Gegenfahrten in gewissen Weichennestern möglich wird. Die Effizienz einer Verpulsung besteht darin, dass in benachbarten Pulsen möglichst alle vorkommenden Abfolgen von Gegenfahrten zugelassen werden können. Einige Einschränkungen (Restriktionen) sind jedoch nicht zu vermeiden.

Effekt der Teilfahrstrassen-Auflösung

Die Reservation von Fahrstrassen erfolgt bei der Eisenbahn stets von Hauptsignal zu Hauptsignal. Die Freigabe nach Durchfahrt des Zuges kann hingegen selektiv erfolgen, falls entsprechende Gleisfreimelde-Einrichtungen vorhanden sind. Sie sind unmittelbar nach Weichen angeordnet, um nach deren Freigabe sogleich eine Fahrt über den anderen Strang der Weiche zu ermöglichen. Die Abbildung 14 zeigt den für die Verpulsung nutzbaren Effekt der TFA in einem zeitlichen Ablauf. Die Grossbuchstaben bezeichnen Signale (Vorsignale mit Stern), gelb vermerkt die belegte Restfahrstrasse des ersten Zuges, welche eine neue Fahrstrasse für eine Folgefahrt (blau) vorerst verhindert, während eine Fahrstrasse für eine Gegenfahrt bereits einlaufen kann. Nach Freigabe des Weichennestes durch die erste Fahrt wäre auch eine Folgefahrt mit Splitting auf das Nachbargleis möglich.

Abbildung 14 Effekt der Teilfahrstrassenauflösung (TFA)



Verflechtung von Gegenfahrten

Mit der Verflechtung von Gegenfahrten wird die Möglichkeit ausgenutzt, dass die Sperrzeiten der beiden Richtungen im Rahmen der durch selektive Gleisfreimeldung gewonnenen Zeitdauer überlappen können. Die bei der Definition der Pulsphasen vorzunehmende Koordination der beiden Richtungen erhält dadurch beträchtlich mehr Spielraum. Dieser kann zur höherwertigen Verpulsung benachbarter Weichennester eingesetzt werden. Im PULS-Raster kann die Verflechtung von Gegenfahrten gehandhabt werden, indem die Sperrzeit der Züge der einen Richtung systematisch gegen Ende des jeweiligen Pulses liegt.

Abbildung 15 Verflechtung von Gegenfahrten

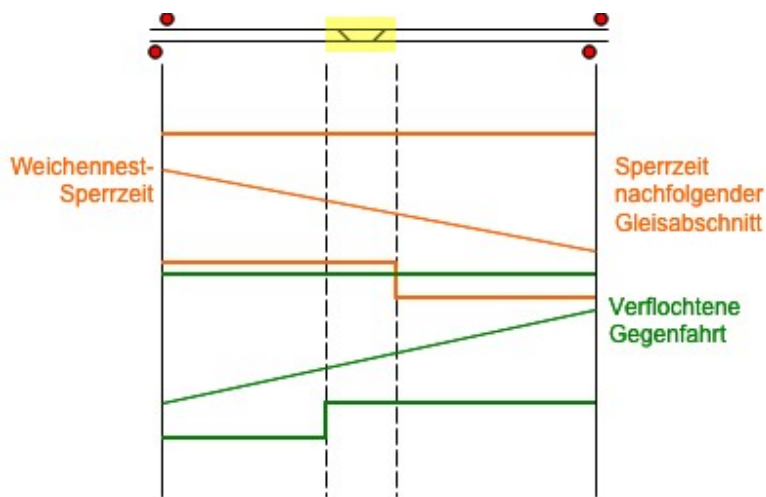
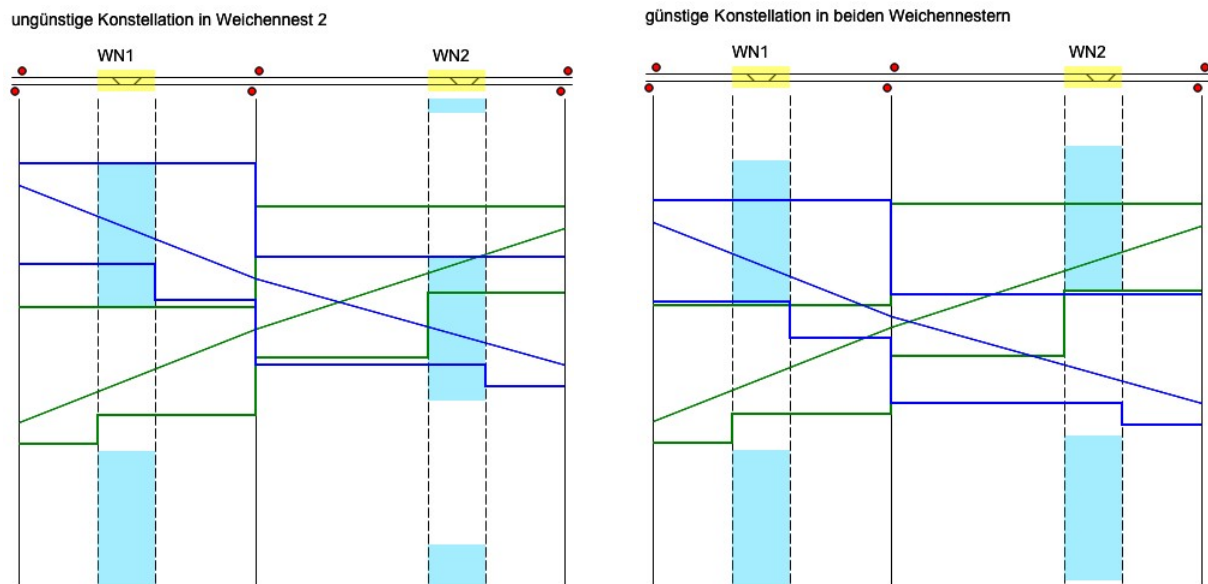


Abbildung 16 PULS-Effizienzsteigerung mit Verflechtung von Gegenfahrten



Die Verflechtung von Gegenfahrten kann auf zwei Arten erfolgen, indem entweder die Weichennestsperrzeit der einen Richtung (z.B. Einfahrt) dicht auf die der andern (Ausfahrt) folgt oder umgekehrt.

Pulsarten

Mit verschiedenen Pulsarten wird insbesondere das Mass der vorhandenen Restriktionen für Gegenfahrten und der relative Sperrzeitbeginn der beiden Richtungen bezeichnet. Die vorteilhaftesten Fälle sind die Arten, bei welchen alle Gegenfahrten im Nachbarpuls möglich sind. Bei diesen bestehen keine Restriktionen. Beim Vollpuls beginnt die Belegung der meisten Züge in beiden Richtungen am Pulsanfang, bei der Verflechtung von Gegenfahrten ist die Sperrzeit der einen Richtung gegen Ende des jeweiligen Pulses hin verschoben. Bei Weichennestern mit Verflechtung von Gegenfahrten entstehen Zeiträume, welche durch keine Zugfahrt erreicht werden können. Diese sind jedoch aufgrund längerer Sperrzeiten in den umliegenden Weichennestern der Kapazität nicht abträglich. Bei mehreren verpulsten Weichennestern in einem Verdichtungsbereich ist aufgrund der Koppelung durch die Fahrzeit der Züge zwischen den Weichennestern nicht bei allen eine ideale Pulsart zu erreichen. In einigen Weichennestern müssen Restriktionen in Kauf genommen werden. Wie viele Zugkombinationen von Restriktionen betroffen sind, ist die entscheidende Grösse für die Qualität eines PULS-Rasters. Eine langsamere Fahrordnung für die Züge zwischen zwei Weichennestern, um trotz

ungünstiger Fahrzeiten eine Verpulsung ohne Restriktionen zu erreichen, ist meist nicht möglich, da die Sperrzeiten über mehrere Weichennester hinweg verlängert werden. Richtungspulse haben gegenüber dem Verzicht auf eine Verpulsung der betreffenden Weichennester den Vorteil der guten Übersichtlichkeit bei der Bewirtschaftung, hingegen keinen direkten Nutzen bei der Kapazitätsausnutzung. Bei Richtungspulsen erfordert jeder Wechsel von einer zur andern Fahrtrichtung einen zusätzlichen Puls, der umgekehrte Fahrtrichtungswechsel geschieht ohne Pulsverlust. Mit Richtungspulsen können alle bekannten Fälle von Weichennestern abgebildet werden.

Tabelle 3 Verpulsungsarten von Weichennestern

Gegenfahrten im Nachbarpuls möglich	Sperrzeitbeginn gleichzeitig	Sperrzeitbeginn versetzt
alle	Vollpuls	Verflechtung von Gegenfahrten
teilweise	Vollpuls mit teilweise überlangen Sperrzeiten	Verflechtung von Gegenfahrten mit fallspezifischen Restriktionen
keine	Richtungspuls (selten)	Richtungspuls

In einem Verdichtungsbereich befinden sich unterschiedliche Arten von Weichennestern, die sich strukturell für gewisse Pulsarten besonders eignen. Grosse Weichennester, insbesondere die Weichenköpfe von zentralen Bahnhöfen, wo zudem langsam gefahren wird, bedürfen eines Vollpulses. Bei einfachen Weichennestern wie Spurwechseln oder topologisch einfach gestalteten Verzweigungen kann dank kurzen homogenen Sperrzeiten ein grosser Spielraum für die Verflechtung von Gegenfahrten ausgenützt werden.

Performance

Die Leistungsfähigkeit eines PULS-Rasters zeichnet sich durch die Möglichkeit einer dichten Packung über den ganzen Verdichtungsbereich aus. Die Anzahl von Restriktionen, welche die Nutzung gewisser Pulse nicht zulassen, ist soweit als möglich zu reduzieren. Zur Bewertung und dem Vergleich verschiedener PULS-Raster kann eine Performance berechnet werden. Die Definition der Performance lautet:

Anteil der Kombinationen jeweils zweier Zugfahrten, welche in benachbarten Pulsen konfliktbehaftete Fahrstrassen verwenden können

Die Performance kann entweder je Weichennest gerechnet und anschliessend über den ganzen Verdichtungsbereich addiert werden oder über alle Weichennester gemeinsam errechnet werden. In letzterem Fall wird die unterschiedliche Zugtypenzahl je Weichennest berücksichtigt. Um die Zahl der effektiv fahrenden Züge nach Zugstypen zu erfassen, müssen des Weiteren die Zugstypen nach ihrer Häufigkeit gewichtet werden.

Bei der Performanceberechnung je Weichennest haben solche mit Richtungspuls die Performance 0, Weichennester mit Vollpuls oder Verflechtung von Gegenfahrten ohne Restriktionen haben die Performance 1. Die Performance der ungünstigen Konstellation im Beispiel von Abbildung 16 (ohne Verflechtung von Gegenfahrten) beträgt demnach im WN1 1 und im WN2 0, die der günstigen Konstellation in beiden Weichennestern 1. Für die Performanceberechnung des im Kapitel Konzeptidee verwendeten Beispiels ergeben sich die Werte für das Weichennest 4 gemäss Tabelle 4. In den Weichennestern 1 bis 3 beträgt die Performance 1.

Tabelle 4 Beispielrechnung zu Abbildung 12 (Konzeptidee), Weichennest 4

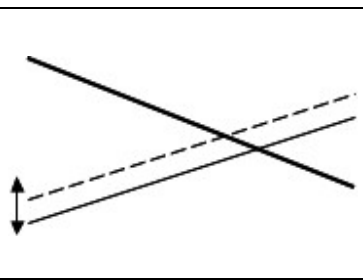
	Zug 2. Puls	rot	dunkelgrün	orange	gelb	hellgrün
Zug 1. Puls						
rot		1	1	1	1	1
dunkelgrün		1	1	1	1	1
orange		0	1	1	1	1
gelb		0	1	1	1	1
hellgrün		1	1	1	1	1

Die Performance für das WN 4 beträgt demnach $23/25 = 0.92$, für den gesamten Verdichtungsbereich 3.92

4.2.7 PULS-Raster-Optimierung

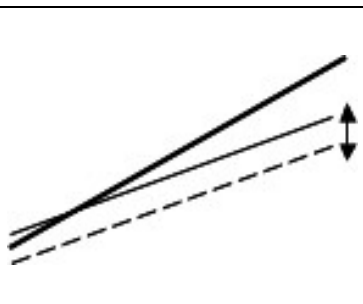
Die Erzeugung eines PULS-Rasters mit maximaler Performance bedeutet einigen Aufwand, da mehrere Parameter variiert werden können. Zum einen kann der Grad der Verflechtung von Gegenfahrten verändert werden, zum andern können insbesondere Züge mit kurzen Sperrzeiten innerhalb eines gewissen Spielraumes verschoben werden, und weiter können besonders beschleunigungsstarke Züge gedrosselt werden, um eine homogene Pulsausnutzung zu erreichen. Ziel ist, die Restriktionen zu minimieren um die Performance zu steigern.

Optimierung Verflechtung von Gegenfahrten



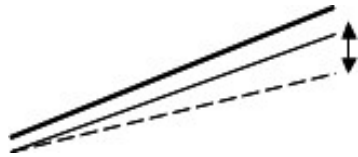
In jeweils einer Richtung sind die Zugfahrten bei der Bestimmung der Pulsdauer grundsätzlich in ihrer Lage definiert, variabel ist jedoch die gegenseitige Lage der beiden Richtungen. Indem das Zugsbündel der einen Richtung relativ zur anderen verschoben wird, können verschiedene Pulsarten in den Weichennestern auftreten. Da die Sperrzeiten der Bündel nicht verändert werden können, geht eine optimale Verpulsung eines Weichennestes oft zu Lasten von anderen. Ziel der Optimierung ist eine gesamthaft besonders vorteilhafte Lage, wobei besonders hoch belastete Weichennester einen gewissen Vorrang für eine hochwertige Verpulsung zugesprochen erhalten sollen.

Sperrzeitentreppen-Koordination



Schwerfällige Züge mit langen Sperrzeiten brauchen in den meisten Pulszonen annähernd die ganze Pulslänge, während kurze, flinke Züge nur einen Teil benötigen. Für Pulszonen mit Restriktionen kann es sich als Vorteil erweisen, wenn die Züge einer Richtung ihre Sperrzeiten soweit als möglich am Rand der Pulse haben, um möglichst wenige Restriktionen zu erzeugen. Inwieweit diesem Kriterium gefolgt werden kann, hängt von den Anforderungen der übrigen Pulszonen sowie vom vorhandenen Spielraum in den anderen Pulszonen ab.

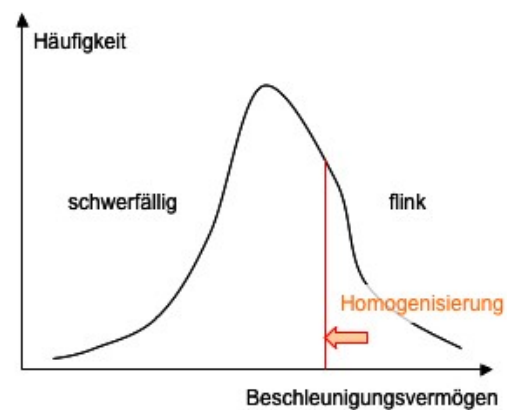
Homogenisierung



Besonders gut beschleunigende Züge liegen im Vergleich zu den andern entweder vor oder nach der Beschleunigungsphase beträchtlich abseits vom übrigen Zugsbündel. Die Einbindung in eine sinnvolle gemeinsame Abfolge von Pulsen

ist meist nicht möglich. Die Effekte des Beschleunigungsunterschiedes zeigen sich auch im heutigen Betrieb. Bei der PULS-Raster-Erstellung kann jedoch der tatsächliche Bedarf für eine Homogenisierung festgestellt werden. Die Drosselung beschränkt sich auf kurze Abschnitte innerhalb des Verdichtungsbereiches. Die flinken Züge werden den schwerfälligeren angepasst.

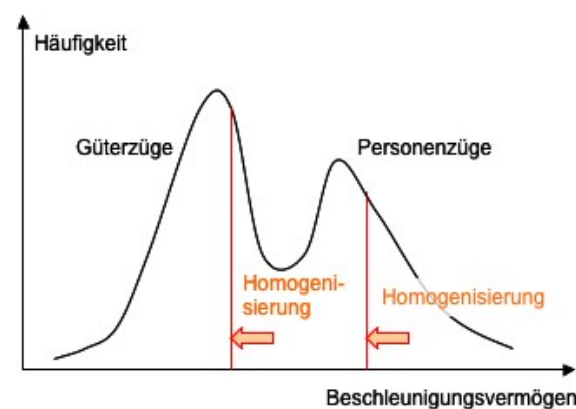
Abbildung 17 Homogenisierung



Die Homogenisierung flinker Züge führt nicht in jedem Fall zu einer höheren Performance. Es ist vorstellbar, dass flinke Züge eben durch ihre stark abweichende Fahrlage in einer Pulszone keine Restriktionen auslösen, während schwerfällige Zugstypen Restriktionen verursachen. Die ungünstigen Auswirkungen unterschiedlicher Fahrlagen auf die Zugfolge ist dagegen stets zu bedenken.

In Verdichtungsbereichen mit ausgeprägtem Güterverkehrsaufkommen zeigt die Grafik der Häufigkeitsverteilung des Beschleunigungsvermögens eine ‚Kamelhöcker‘-Form. Infolge des allgemeinen Geschwindigkeitsunterschiedes zum Personenverkehr ergibt sich eine ebensolche Verteilung auch bei den Geschwindigkeiten, welche ebenfalls eine Auswirkung auf die Erstellung des PULS-Rasters hat.

Abbildung 18 Homogenisierung ‚Kamelhöcker‘

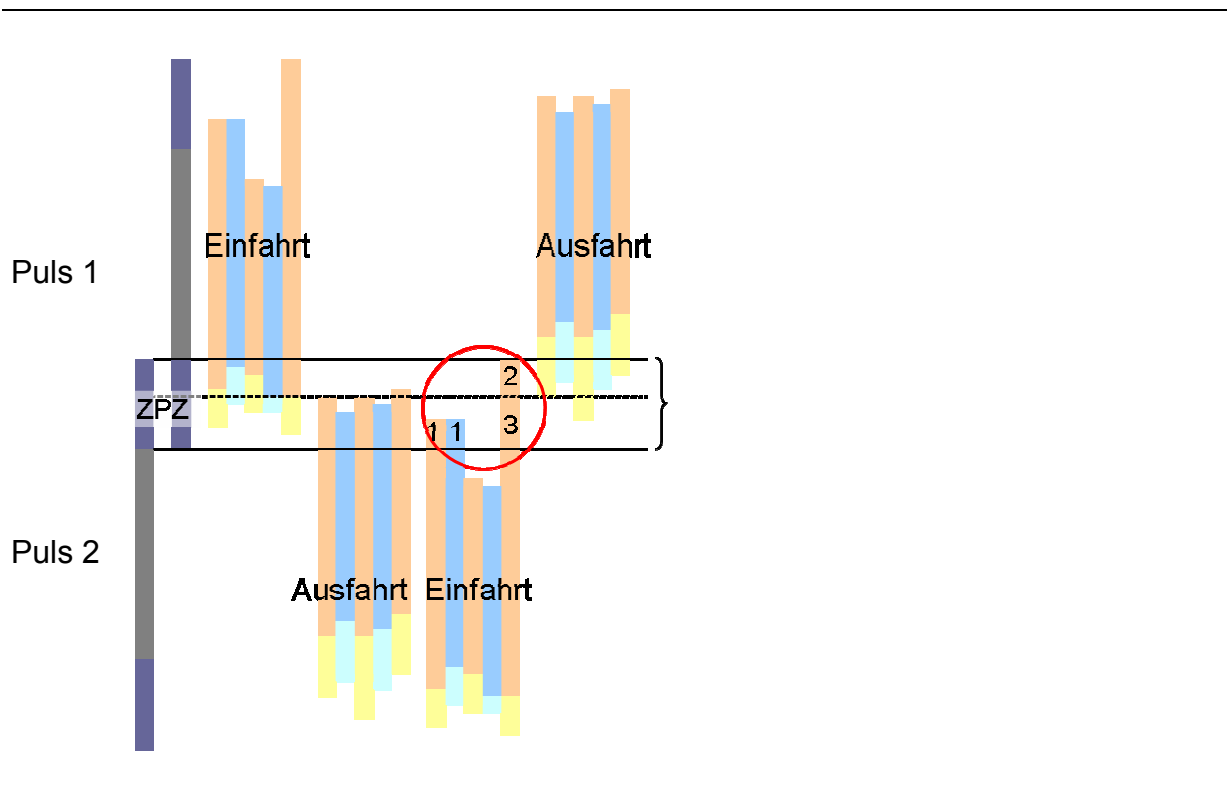


4.2.8 Restriktionen

Durch die Optimierung des PULS-Rasters können die Einschränkungen für Fahrtenabfolgen in Nachbarpulsen minimiert werden. Trotzdem bleiben mehrere Kombinationen unmöglich. Es muss sichergestellt werden, dass keine Belegung für Züge vorgenommen wird, die mit einer Belegung in einem Nachbarpuls nicht vereinbar ist. Die entsprechenden Restriktionen definieren die nicht zugelassenen Kombinationen anhand der Eigenschaften der beiden Züge (Zuglänge, Beschleunigung, Signalstandorte, Fahrweg). Sämtliche Restriktionen eines Verdichtungsgebietes werden in einer Tabelle zusammengestellt. Dabei werden die aufgrund von verschiedenen Kombinationen von Eigenschaften entstandenen Restriktionen nach Möglichkeit aggregiert, um bei der Belegung eine einfache Handhabung sicherzustellen. Aus Gründen der Topologie nicht mögliche Koinzidenzen können entfernt werden.

Der Zeitbereich der maximalen Überschneidung der Nutzungen von Nachbarpulsen (von der ersten Reservation des zweiten Zugbündels bis zur letzten Freigabe des ersten Zugbündels) wird als Zwischenpuls-Zeitscheibe (ZPZ) verwaltet. Die zug-/fahrwegspezifischen Eigenschaften eines Zuges verursachen einen bestimmten Bedarf in der vorangehenden ZPZ oder in der nachfolgenden oder gar in beiden. Meist sind aber für den Reservations- bzw. Freigabe-

Abbildung 19 Nutzung der Zwischenpuls-Zeitscheibe (ZPZ)

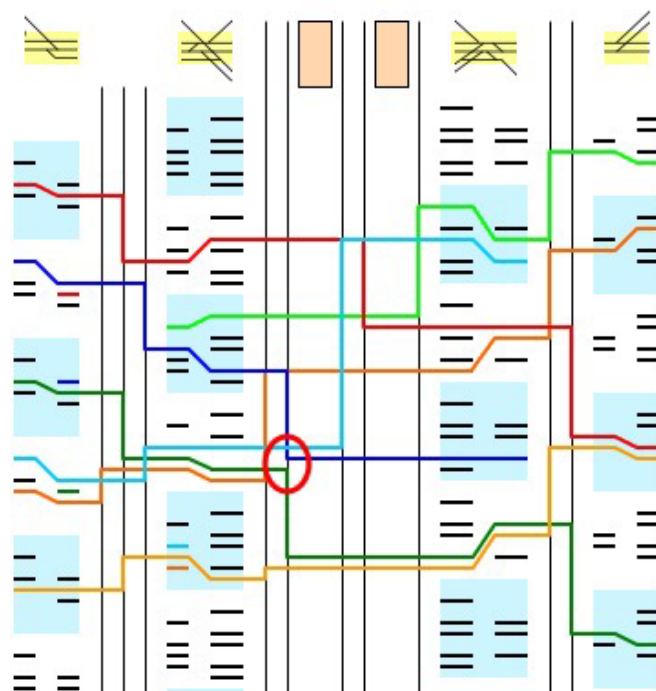


zeitpunkt nur ein oder zwei zug-/fahrwegspezifische Faktoren massgebend. In der Abbildung 19 sind die Sperrzeiten von verschiedenen Zugfahrten dargestellt. Die hellen Bereiche bezeichnen die Belegung des Gleisabschnittes nach dem Weichennest. Die Markierung zeigt die Nutzung der ZPZ durch Züge der Richtung 'Einfahrt' bei der Reservation (Sperrzeitanfang). Die Ziffern ordnen den Bedarf den verschiedenen zug-/fahrwegspezifischen Faktoren zu. Die 1 bezeichnet beispielsweise den Effekt einer langen Vorsignaldistanz, die 2 die Verwendung eines Fahrweges mit Geschwindigkeitsbeschränkung und die 3 eine lange Vorsignaldistanz einer anderen Zufahrtsstrecke.

In einer Fallunterscheidung wird eruiert, ob der Bedarf in der ZPZ von jeweils zwei Gruppen aggregierter Zugstypen die Länge der ZPZ übersteigt oder nicht oder ob ein Maximalwert der zug-/fahrwegspezifischen Eigenschaften mit kontinuierlichen Werten (Zuglänge, Beschleunigungsvermögen) festzusetzen ist. Es sind sechs Abfolgen der Nutzung von Pulszonen in benachbarten Pulsen zu betrachten. Für jede Richtung die Folgefahrt, die Folgefahrt mit Splitten und die Gegenfahrt.

4.3 Belegung (grafisch)

Abbildung 20 Belegung



Das PULS-Raster definiert die exakte Lage sämtlicher Züge im Puls, indem jedem Zug eine individuell optimale Fahrordnung zugeteilt wird. Deshalb ist bei der Belegung nur noch der Puls, in welchem ein Zug verkehren soll zu wählen.

Das grafische Layout ist eine Kombination des grafischen Fahrplanes mit dem Gleisbelegungsplan. Die Planung in der kombinierten Form ermöglicht eine gute Erfassbarkeit der Abhängigkeiten zwischen den Belegungen einzelner Gleisabschnitte (Strecke und Perrongleise).

In jedem Puls wird die für die Bele-

gung relevante Topologie schematisch in Form der an das Weichennest anschliessenden Gleisabschnitte dargestellt. Dies ermöglicht das intuitive Erkennen von Konflikten in Weichennestern.

Die Regeln für den Belegungsvorgang lauten:

1. In den Weichennestern dürfen sich keine Fahrlinien kreuzen oder sich überlagern
2. Es ist zu prüfen, ob für gewünschte gleichzeitige Fahrten durch ein Weichennest unabhängige Fahrstrassen zur Verfügung stehen (Ausschlussmatrix)
3. Sich schneidende Linien im Bereich der Gleisabschnitte sind zugelassen
4. Die gleichzeitige Belegung von Gleisabschnitten ist in folgenden Fällen möglich
 - Doppelbelegung von Perrongleisen
 - Mehrfachbelegungen von Streckengleisen, falls dies die Blockteilung erlaubt (dabei ist auf die Reihenfolge der Züge zu achten)
5. Bei Perrongleisen ist darauf zu achten, dass einfahrende Züge nur Pulse benutzen, welche nicht mit Pulsen des gegenüberliegenden Weichenkopfes überlappen, falls in überlappenden eine Ausfahrt stattfindet

Bei jedem Belegungsvorgang ist darauf zu achten, dass keine Restriktion missachtet wird. In einer rein grafischen Applikation können mit dem Einfügen eines Zuges sogleich alle Restriktionen für die Nachbarpulse vor und nach dem neu eingelegten Zug angezeigt werden. In Abbildung 20 deutet die rote Markierung auf einen Konflikt hin. Bei diesem wird die Regel 5 verletzt.

4.4 Betriebsführung

Die Übersichtlichkeit des PULS-Rasters bei der Belegung ist sehr gut. Einfache Dispositionen können theoretisch von Hand vorgenommen werden. Verspätungen können in Form von Einbruchsverspätungen oder innerhalb des Verdichtungsbereiches auftretenden Störungen vorkommen. Bei Einbruchsverspätungen wird dem Zug eine neue Pulsabfolge zugeteilt. Die Fahrwege von anderen Zügen können flexibel angepasst werden. Ist das Einlegen des verspäteten Zuges in die gewünschte Pulsabfolge nicht möglich, muss er einer späteren Pulsabfolge zugewiesen werden oder ein pünktlich verkehrender Zug muss verschoben werden. Bei Störungen innerhalb des Verdichtungsbereiches ist zu unterscheiden zwischen einzelne Zugfahrten betreffende Störungen und Fahrwegeinschränkungen. Störungen einzelner Zugfahrten sind beispielsweise Verzögerungen bei der Abfahrt oder Fahrzeugdefekte. Die Züge geraten aus-

serhalb der Bandbreite der Fahrgenauigkeitsmarge und blockieren dadurch Pulse, die sie nicht tangieren sollten. Diese Pulse müssen kurzfristig für andere Zugfahrten gesperrt werden. Im Falle von Fahrwegeinschränkungen ist die Erstellung eines neuen PULS-Rasters erforderlich, da beispielsweise die zugrunde liegenden Fahrzeiten nicht mehr zutreffen oder im Regelfall ungenutzte Spurwechsel kapazitätsbestimmend werden.

Sind die Anpassungen im Fahrplan vorgenommen und neue Pulsabfolgen für betroffene Züge belegt worden, besteht wieder ein konfliktfreier Planfall, der unter den neuen Umständen zur Ausführung kommen soll.

4.5 Automatisierungsmöglichkeiten

4.5.1 PULS-Raster-Erstellung

Die Erzeugung eines PULS-Rasters ist ein aufwändiges Verfahren. Das Optimierungsproblem wird mit Vorteil einem Rechner übertragen, indem ein umgrenzter Lösungsraum bezüglich Verflechtung von Gegenfahrten, Sperrzeitenkoordination und Homogenisierung systematisch nach dem Optimum mit möglichst wenigen resultierenden Restriktionen abgesucht wird.

4.5.2 Belegung

Beim Einsatz des Rechners bei der Belegung sind drei Stufen zu unterscheiden:

Grafische Darstellung	Ermöglicht rationelle manuelle Handhabung. Insbesondere das Kennzeichnen der Restriktionen erleichtert die Fahrplankonstruktion.
Konflikterkennung	Die präzisen Fahrlagen der einzelnen Züge sind hinterlegt, all-fällige Konflikte werden angezeigt.
Routenfindung	Das System findet selbständig Routen durch das PULS-Raster, es werden Optimierungsmöglichkeiten vorgeschlagen oder gar ein Fahrplangefüge für ein vorgegebenes Angebotsraster entwickelt. Der Disposition werden aktualisierte Szenarien vorgeschlagen.

5 Methodenübersicht

Die kapazitätsrelevanten Knoten eines Eisenbahnnetzes bestehen zumeist aus mehreren nahe beieinander liegenden Fahrstrassenknoten im Bereich um einen grossen Bahnhof. Sie haben sehr unterschiedliche Formen und Ausdehnungen. Im Minimum umfasst ein Knoten die Bahnsteiggleise des zentralen Bahnhofes sowie die beiden angrenzenden Weichenköpfe. Etliche Methoden basieren auf einer zweistufigen Struktur betreffend Infrastrukturabstraktion. Die untere Ebene besteht stets aus einem fahrweggenauen Fahrplangefüge in den einzelnen Fahrstrassenknoten, welches aufgrund eines exakten Infrastruktur-Abbildes erstellt wird. Die Betrachtungsstufe der oberen Ebene entspricht den jeweiligen Bedürfnissen. Beim niederländischen Instrument DONS erfolgt eine Netzbetrachtung, welche in der engen Vermaschung des Netzes begründet ist. Niederländische Knoten verfügen zudem meist über unabhängige Streckenführungen für die verschiedenen Richtungen unmittelbar ab den Weichenköpfen. Das Instrument CAPRES / AFAIG eignet sich insbesondere für die Betrachtung von Korridoren, wie sie im Güterverkehr vorkommen. Langläufige Güterzüge werden in ein vorgegebenes Fahrplangefüge des Personenverkehrs eingefügt. Die Betrachtung von Verdichtungsbereichen beim Verfahren nach Burkolter wiederum entspricht der typischen schweizerischen Knotenform mit einigen Kilometern ausserhalb liegenden Verzweigungen und Spurreduktionen mit starkem Einfluss auf die Kapazität. Für die Ortung von zusätzlich nutzbarer Kapazität im Netz ist somit in der Schweiz die Analyse auf Stufe Verdichtungsbereich besonders zweckmässig. Die meist stark auf gewachsenen Strukturen basierenden Anlagen bergen etliche topologische Erschwernisse für die Bewirtschaftung. Um konkrete Kapazitätsaussagen machen zu können, müssen sie auf Stufe Fahrstrassenknoten verifiziert werden. Die Fahrstrassenknoten erlauben oft nur ausgewählte Kombinationen von gleichzeitig verwendeten Fahrwegen.

Im heutzutage angewandten Verfahren der Fahrplankonstruktion fehlt jedoch die Stufe Verdichtungsbereich vollständig. Sie wird teilweise durch den sehr guten Kenntnisstand der örtlichen Planer kompensiert. Ein hilfreiches Mittel zur Gewährleistung der Machbarkeit und zur Sicherstellung der geforderten Zuverlässigkeit ist die Überprüfung der komplexen Abhängigkeiten in einem Verdichtungsbereich mit Simulationsverfahren.

Einen grundsätzlich vom heutigen Vorgehen zu unterscheidenden Ansatz verfolgt das von Burkolter vorgeschlagene Verfahren sowie die Methode PULS. Beiden Verfahren ist gemeinsam, dass sie einen exakten Fahrplan erzeugen, der nicht nur produzierbar ist, sondern von Grund auf konfliktfrei. Das Verfahren Burkolter sucht den kapazitätsoptimalen Fahrplan in

einem zeitlichen Kontinuum, wodurch der Freiheitsgrad und damit der Lösungsraum sehr gross wird. Die Anwendungsbeispiele können nur mit stark vereinfachenden Annahmen durchgeführt werden. So würde die Anwendung von präzisen Sperrzeitentrepfen und anderen Parametern des realen Systems eine Rechenleistung erfordern, die weit über dem heutzutage Machbaren liegt. Die Zugfolgezeit wird für alle Zugkombinationen bei 90 Sekunden angenommen und alle Züge haben dasselbe Fahrprofil. Das grundlegende Prinzip der Methode PULS ist die nötige Eingrenzung der Lösungsmenge bei der Fahrplankonstruktion. Mit den vorgestellten Prozessen wird auf effiziente Teilmengen des Lösungsraumes fokussiert.

Herrmann zeigt in seiner Dissertation auf, dass die Folgeverspätungen geringer ausfallen, wenn verspätete Züge koordiniert an den Portalen des Verdichtungsgebietes eintreffen. Die Züge werden verzögert, dass sie ähnlich wie in der Methode PULS zu diskreten Zeiten verkehren.

Im operativen Betrieb kommen je nach Planungsansatz grundsätzlich unterschiedliche Methoden zum Zuge. Ist der geplante Fahrplan produzierbar, aber mit Konflikten behaftet, indem

Tabelle 5 Planungs- und Betriebsformen

Planung	Betrieb	Verfahren
produzierbar	ereignisgesteuert (Flussmethode)	Manuell, Simulation
konfliktfrei	zeitgesteuert	Burkolter, Methode PULS

beispielsweise im Planfall zwei Züge ein Fahrwegelement gleichzeitig beanspruchen, so erfolgt der Betrieb nach der Flussmethode. Es gilt entweder das Prinzip, dass die Züge ausschliesslich aufgrund der Reihenfolge ihres Erscheinens im Zulauf auf den Konfliktpunkt mit einer Fahrstrasse bedient werden oder dass gewisse Prioritätsregeln in die Disposition mit einbezogen werden. Die Optimierung des Betriebsablaufes erfolgt bei der Flussmethode zeitlich und örtlich begrenzt. Die Züge bewegen sich ähnlich wie Wasser in einem Leitungsnetz. Die Lokführer erhalten erst kurz vor einem Konfliktpunkt durch ein Warnung zeigendes Vorseignal Kenntnis von einem Hindernis und müssen abrupt reagieren. Anhand ihrer Erfahrung versuchen sie die geeignete Fahrweise für nachfolgende Streckenabschnitte zu wählen. Auch der Fahrdienstleiter ist nur begrenzt über die Lage informiert. Die individuelle Fahrweise der Lokführer erschwert zudem die Vorausberechnung zukünftiger Betriebszustände.

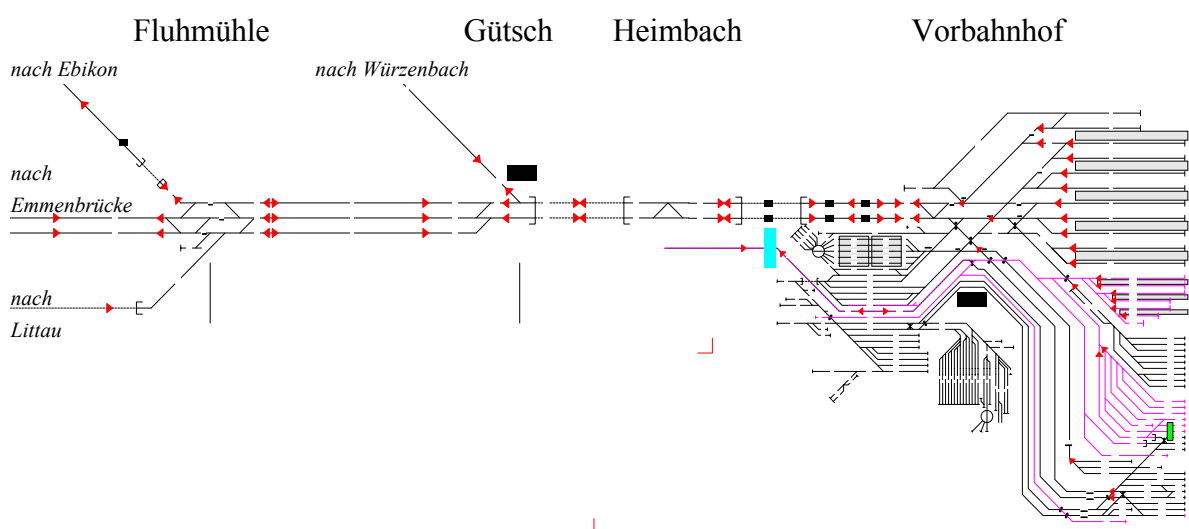
Wird bei der Planung jedoch bereits ein konfliktfreier Fahrplan erzeugt, so ist für dessen Durchführbarkeit entscheidend, dass es auch im Falle von Abweichungen nicht zu Konfliktsituationen kommt, da andernfalls der Betrieb sogleich in die Flussmethode abgeleitet würde. Die Abweichungen müssen sofort mit den übrigen Fahrten abgeglichen und ein neuer konfliktfreier Fahrplan erzeugt werden. Dies erfordert eine rasche Reaktion und entsprechend einfache Regeln für die Neuplanung.

Die Kombination von konfliktfreier Planung mit ereignisgesteuertem Betrieb schränkt den Spielraum unnötig ein, der durch die Zeitsteuerung zustande kommt und macht die Flussmethode ineffizient. Ein zeitgesteuerter Betrieb auf Grundlage eines nicht konfliktfreien Fahrplanes ist nicht möglich. Mit der Simulation von Fahrplangefügen und Verspätungsszenarien lässt sich die Beherrschbarkeit von produzierbaren Betriebsprogrammen mit der Flussmethode überprüfen. Bei konfliktfreier Planung erübrigt sich eine Simulation.

6 Kapazitätsanalyse Knoten Luzern

Der Raum Luzern ist einer der bedeutenden Engpässe im Schweizer Bahnnetz. Auf einer vergleichsweise kleinen Anlage findet eine grosse Anzahl Zugfahrten statt. Der zentrale Bahnhof des Verdichtungsgebietes ist der Kopfbahnhof Luzern mit 10 Normalspur-Perrongleisen. Nur zwei Normalspurgleise bilden den Zulauf. Einige Kilometer ausserhalb des Bahnhofes zweigen drei Einspurstrecken von der Doppelspur Richtung Emmenbrücke – Olten ab. Die Einspurstrecke nach Würzenbach – Küssnacht ist nur an ein Gleis der Doppelspur angeschlossen. Der Wechsel auf das andere Gleis muss beim benachbarten Spurwechsel Heimbach erfolgen. Vor den beiden beieinander liegenden Abzweigungen in Richtung Littau – Wolhusen und Ebikon – Zug befindet sich ein kurzer dreispuriger Abschnitt. Es handelt sich dabei um den Bahnhof Gütsch mit einer historisch bedingt bahnhoftypischen Sicherungsanlage, welche das Wenden von Zügen zulässt, jedoch einem dichten Verkehr in heutiger Form hinderlich ist. Die Weichen der Abzweigung Richtung Littau sowie eine weitere Weichenverbindung haben eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 60km/h anstatt der für die übrigen Zufahrten geltenden 80km/h. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Vorbahnhof Luzern benötigen Rangierfahrten von den Hallengleisen in die Abstellanlage mehrere Manöver, ebenso ist das Depot von der Zufahrtsstrecke nur mit einer Spitzkehre auf einem Hallengleis zu erreichen.

Abbildung 21 Gleisschema Luzern



Quelle: SBB

Die Anlage Luzern eignet sich insofern für eine beispielhafte Untersuchung, als dass auf kleinem Raum etliche für schweizerische Verdichtungsgebiete typische ungünstige Konstellationen auftreten, wie sie oben erwähnt sind.

6.1 Untersuchte Betriebsprogramme und angewandte Verfahren

In der Kapazitätsanalyse für den Knoten Luzern wird die Leistungsfähigkeit der Methode PULS untersucht. Als Referenzwerte dienen vergleichbare Betriebsprogramme, welche mit der Simulationsapplikation OpenTrack entwickelt werden. Eine Simulation dient grundsätzlich nur der Überprüfung von Machbarkeit und Stabilität manuell oder andersartig konstruierter Fahrplangefüge. Für den Zweck der Kapazitätsanalyse wird jedoch sogleich mit dem Instrument der Simulation iterativ ein Betriebsprogramm erzeugt. Als Basis eines Teils der untersuchten Betriebsprogramme dient der bestehende Fahrplan. Er stellt den bisher einzigen im Alltagsbetrieb verifizierten Grenzwert der Kapazität dar. Die untersuchten Betriebsprogramme entsprechen den in Kapitel 2 erwähnten Vorgehensweisen der Kapazitätsermittlung mit den entsprechenden Kennwerten. Hinzu kommen weitere Betriebsprogramme, die interessante Aussagen zur Kapazität des untersuchten Verdichtungsraumes erlauben.

- Heutiges Angebot (Abbildbarkeit mit den untersuchten Methoden)
- Sättigung (maximale Zugzahl in bestimmtem Zeitintervall)
- Komprimieren (minimale Laufzeit für bestimmtes Betriebsprogramm)
- Maximale Kapazität mit systematisiertem Angebot bzw. einheitlichen Zügen

6.2 Bestehender Fahrplan

Die derzeitige Kapazitätsbemessung kann ausschliesslich auf der angewandten erfahrungsbasierten Fahrplankonstruktion basieren. Der Fahrplan gilt in der bestehenden Form als gesättigt. Der Kenntnisstand bezüglich Stabilität und die niedrige Planungsschärfe lassen keine zusätzliche zweckmässige Trasse zu. In den Spitzenzeiten morgens und abends werden zusätzlich Züge zum Grundtakt ermöglicht, in Anbetracht, dass sich das möglicherweise instabil werdende Gefüge in den Zwischenzeiten wieder einpendeln kann. Einige Konstellationen in diesem Fahrplangefüge erweisen sich als besonders instabil. Der räumlich eng eingegrenzte

Kreuzungsvorgang des RE Bern – Langnau – Luzern mit seinem Gegenzug im Bereich Gütsch (zwischen Fluhmühle und Heimbach) wird nur ausnahmsweise planmässig abgewickelt. Die im Planfall eng mit diesen RE verflochtenen Fahrten der IC Bern – Zofingen – Luzern und umgekehrt können im Verspätungsfalle der RE vereinfacht ohne Banalfahrten abgewickelt werden.

In das bestehende Fahrplangefüge kann nach Massgabe der Reaktionsmöglichkeiten auf Störungen keine zusätzliche hochwertige Personenverkehrs-Trasse eingefügt werden. Die Kapazitätsgrenze gilt als erreicht.

Tabelle 6 Ankünfte Personenverkehrszüge Normalspur 17:00 bis 18:00 Uhr (16 Fahrten)

Zeit	Typ	Zugnr.	Destination	Zulauf
17:03	RE	3327	Bern - Wolhusen	LIT
17:05	IC	2531	Bern – Zofingen – Sursee	EMM
17:08	S1	21163	Baar – Zug – Rotkreuz – Ebikon	EBI
17:13	IR	2181	Basel – Olten – Zofingen – Sursee	EMM
17:16	IR	2426	Romanshorn – St. Gallen – Arth-Goldau – Küssnacht	WUE
17:20	S6	21663	Schachen LU – Malters	LIT
17:25	IR	2355	Zürich – Zug	EBI
17:28	S9	21963	Lenzburg – Hochdorf – Emmenbrücke	EMM
17:35	IR	2935	Zürich – Zug	EBI
17:38	EC	252	Milano – Chiasso – Bellinzona – Arth-Golau	EBI
17:40	S8	21865	Olten – Sursee – Emmenbrücke	EMM
17:43	S6	21665	Langenthal – Wolhusen – Malters	LIT
17:45	S3	21366	Arth-Goldau – Küssnacht a. R. – Meggen	WUE
17:49	IR	2357	Zürich – Zug – Rotkreuz	EBI
17:54	RE	3581	Olten – Sursee – Emmenbrücke	EMM
17:58	S9	21965	Lenzburg – Hochdorf – Emmenbrücke	EMM

Tabelle 7 Abfahrten Personenverkehrszüge Normalspur 17:00 bis 18:00 Uhr (15 Fahrten)

Zeit	Typ	Zugnr.	Zulauf	Destination
17:00	S9	21966	EMM	Emmenbrücke – Hochdorf – Lenzburg
17:05	RE	3582	EMM	Emmenbrücke – Sursee – Olten
17:10	IR	2362	EBI	Zug – Zürich – Zürich Flughafen
17:12	S3	21367	WUE	Meggen – Küsnach a. R. – Arth-Goldau
17:15	S6	21656	LIT	Malters – Wolhusen – Langenthal
17:18	S8	21866	EMM	Emmenbrücke – Sursee – Olten
17:21	IR	2181	EBI	Arth-Goldau – Schwyz – Bellinzona – Locarno
17:30	S9	21970	EMM	Emmenbrücke – Hochdorf – Lenzburg
17:35	IR	2364	EBI	Rotkreuz – Zug – Zürich
17:37	S6	21670	LIT	Malters – Schachen LU
17:42	IR	2431	WUE	Küssnacht – Arth-Goldau – St. Gallen – Romanshorn
17:45	IC	252	EMM	Sursee – Zofingen – Bern
17:49	S1	21170	EBI	Ebikon – Rotkreuz – Zug – Baar
17:55	IR	2536	EMM	Sursee – Zofingen – Olten – Basel
17:57	RE	3338	LIT	Wolhusen – Bern

Tabelle 8 Zentralbahn 17:00 bis 18:00 Uhr (10 Fahrten)

Zeit	Typ	Zugnr.	Destination	Richtung
17:04	IR	2227	Interlaken Ost – Meiringen – Hergiswil	an
17:07	S5	21566	Horw – Hergiswil – Giswil	ab
17:11	S4	21468	Horw – Hergiswil – Stans	ab
17:19	S4	22465	Engelberg – Hergiswil – Horw	an
17:22	S5	21565	Giswil – Hergiswil – Horw	an
17:37	S5	21570	Horw – Hergiswil – Giswil	ab
17:41	S4	22470	Horw – Hergiswil – Engelberg	ab
17:49	S4	22467	Engelberg – Hergiswil – Horw	an
17:52	S5	21567	Giswil – Hergiswil – Horw	an
17:55	IR	2236	Hergiswil – Meiringen – Interlaken Ost	ab

Tabelle 9 Güterzüge / Lokzüge 17:00 bis 18:00 Uhr (3 Fahrten)

Zeit	Zugnr.	Zulauf	Destination	Richtung
17:11	92969	EBI	Rotkreuz (Lokzug)	an
17:30	72824	EMM	Wl	an
17:52	72983	WUE	Flüelen	ab

Tabelle 10 Rangierfahrten 17:00 bis 18:00 Uhr (18 Fahrten)

Zeit	Typ	Zugnr.	Richtung
17:05	Lok	2236	Gleisfeld – Halle (Zentralbahn)
17:05	Komp.	21981	Halle – Gleisfeld (Fluchtfahrt)
17:14	Lok	2181	Gleisfeld – Halle
17:16	Komp.	3327	Halle – Gleisfeld (Fluchtfahrt)
17:19	Lok	92969	Halle – Gleisfeld
17:20	Komp.	21970	Gleisfeld – Halle (Fluchtfahrt)
17:22	Lok	2181	Halle – Gleisfeld
17:32	Komp.	21170	Gleisfeld – Halle (Stärken)
17:39	Lok	252	Gleisfeld – Halle
17:39	Lok	2935	Gleisfeld – Halle
17:46	Komp.	21972	Gleisfeld – Halle (Stärken)
17:49	Komp.	3338	Gleisfeld – Halle (Fluchtfahrt)
17:49	Lok	72824	RB – Gleisfeld
17:50	Lok	252	Halle – Gleisfeld
17:50	Komp.	2935	Halle – Gleisfeld
17:57	Komp.	2935	Gleisfeld – RB
17:59	Lok	2935	Halle – Gleisfeld
17:59	Lok	2227	Gleisfeld – Halle (Zentralbahn)

Tabelle 11 Zugzahlen Verdichtungsbereich Luzern: Fahrplan 2005, 17:00 – 18:00 Uhr

Ankünfte Personenverkehr Normalspur	16
Abfahrten Personenverkehr Normalspur	15
Güterzüge / Lokzüge	3
Total Zugfahrten Normalspur	34
Ankünfte / Abfahrten Zentralbahn	10
Rangierfahrten	18
Total Fahrten	62

6.3 Methode PULS

Für die Fallstudie in Luzern ist in einem ersten Schritt ein auf die vorhandene Infrastruktur und die verkehrenden Zugstypen zugeschnittenes PULS-Raster zu erstellen. Das in dieser Arbeit verwendete PULS-Raster ist als Prototyp vollkommen von Hand entwickelt worden. Es beruht auf provisorisch erzeugten Sperrtreppen-Daten; der Effekt der Teilfahrstrassen-Auflösung wurde geschätzt.

6.3.1 Erstellung PULS-Raster

Verdichtungsbereich / Ausgleichsbereich

Die Ausdehnung des Verdichtungsbereiches wird gemäss Abbildung 21 gewählt. Dieser umschliesst die Streckenteile, die mehrere Hauptlinien vereinigen. In diesem Bereich ergeben sich umfangreiche Abhängigkeiten; die Züge fahren auf allen Gleisen regelmässig in beide Richtungen und Massnahmen zur Umgehung von Konfliktsituationen wirken sich auf andere Weichenregionen des Verdichtungsbereiches aus. Die anschliessenden Einspurstrecken können zweckmässig über richtungsspezifische Belegungen weiterer Pulse bewirtschaftet werden. Die Abzweigung Hübeli zwischen Emmenbrücke und Rothenburg Dorf wird nicht verpulst, da stündlich nur zwei Abkreuzungen stattfinden und die Auslastung der Doppelspur an der Abzweigstelle genügend weit von der Sättigung entfernt ist.

Verpulste Weichennester

Alle vier Weichenregionen innerhalb des Verdichtungsbereiches werden verpulst, da in allen regelmässig konfliktbehaftete Fahrtenfolgen stattfinden müssen. Die Hauptsignalstandorte grenzen jeweils ein Weichennest vom benachbarten ab. Lediglich zwischen den Weichennestern Heimbach und Vorbahnhof befinden sich zusätzliche Blockstellen.

Margen

Die Fahrgenauigkeitsmarge wird auf 15 Sekunden festgelegt. Sie repräsentiert eine Grösse, bei der davon ausgegangen wird, dass sie zumindest innerhalb des kurzen Abschnittes des Verdichtungsbereiches eingehalten werden kann. Die verbleibenden Erholungsmargen werden als resultierende Grösse von Belegungen ausgewiesen.

Pulsdauer

Die Pulsdauer wird aufgrund der Zugfolgezeit auf 120 Sekunden festgelegt.

Pulsphasen

Tabelle 12 Fünf ausgewählte Zug-/Fahrwegkombinationen

Zulauf	Lok	Anzahl Wagen	Wagenbauart
1 Ebikon	460	11	Dosto
2 Ebikon			Triebzug RABe 523 (Flirt)
3 Littau	465	7	EW III
4 Würzenbach	420	5	EW II
5 Emmenbrücke	460	8	Dosto

Die Datengrundlage bilden 5 ausgewählte Zug-/Fahrwegkombinationen je Richtung (Tabelle 12) sowie für die Ausfahrt über einen Fahrweg Richtung Littau von drei bis elf Wagen verschiedener Bauart abgestufte Kompositionen. Der Fahrweg führt in den Weichennestern Gütsch und Fluhmühle über Weichenverbindungen, auf welchen die Geschwindigkeit auf 60km/h limitiert ist. In allen Daten sind die Teilfahrstrassenauflösung sowie Fahrgenauigkeitsmargen nicht enthalten.

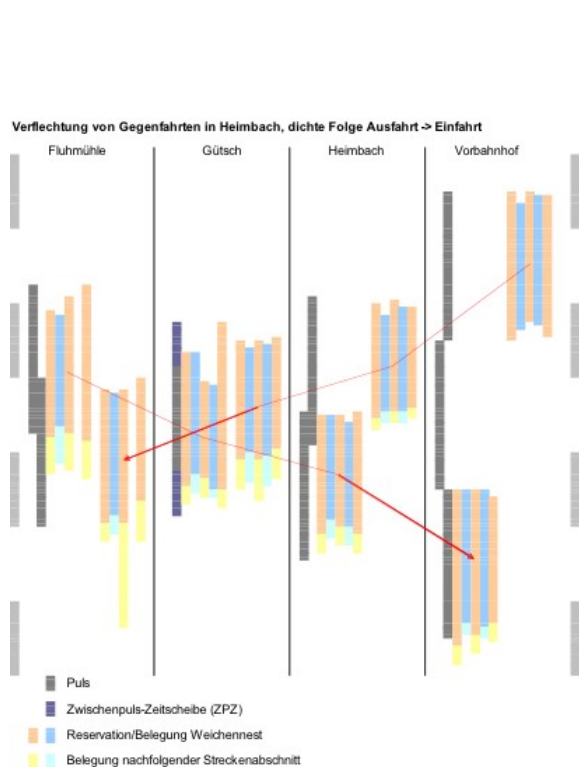
Die Weichennester haben folgende Eigenschaften

- Vorbahnhof:
- lang
 - langsam befahrbar
 - heute: Splitten der Einfahrten nach Weichen 26 und 32
- Heimbach:
- kurz
 - homogene Sperrzeiten
- Gütsch:
- teilweise lange Vorsignalabstände
 - Weichenverbindung mit Maximalgeschwindigkeit 60km/h
- Fluhmühle
- lange Gleisabschnitte nach Weichennest

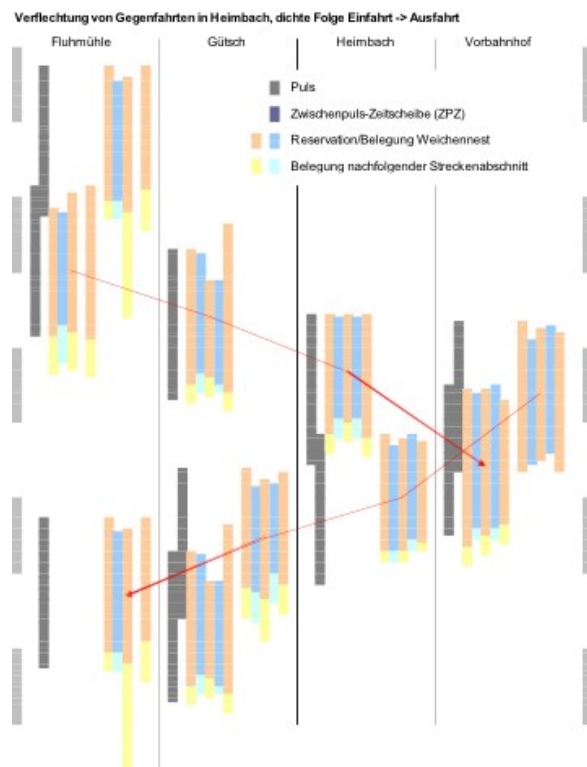
Das Weichennest Heimbach erlaubt als einziges eine bedeutende Verflechtung von Gegenfahrten. Entsprechend sind zwei prinzipiell unterschiedliche PULS-Raster möglich: entweder mit dichter Folge Ausfahrt - Einfahrt oder Einfahrt - Ausfahrt im Weichennest Heimbach. Abbildung 22 zeigt die beiden Varianten mit den Sperrzeiten der 5 Referenzzüge je Richtung über alle Weichennester des Verdichtungsgebietes. Die flinken Züge werden bei der Ausfahrt homogenisiert, indem sie bis zum Signal 94R bzw. 94S mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40km/h belegt werden.

Abbildung 22 PULS-Effizienzsteigerung mit Verflechtung von Gegenfahrten

Abfolge Ausfahrt - Einfahrt



Abfolge Einfahrt - Ausfahrt



Anhand der Darstellungen in Abbildung 22 kann die jeweilige Performance abgeschätzt werden (Tabelle 13). Es zeigt sich, dass eine Verflechtung Ausfahrt - Einfahrt im Weichennest Heimbach besonders vorteilhaft ist. Es wird deshalb ein entsprechendes PULS-Raster weiterverfolgt.

Tabelle 13 Performance-Vergleich (grobe Schätzung)

1. Zug	Fluhmühle	Gütsch	Heimbach	Vorbahnhof	Performance
Ausfahrt - Einfahrt	0	0.85	0.95	0.95	2.75
Einfahrt - Ausfahrt	0.6	0.1	0.95	0	1.65

Restriktionen

Für das Weichennest Gütsch ergeben sich umfangreiche Restriktionen. Sie sind in Abbildung 23 zusammengestellt. Nur wenige, einfach strukturierte Restriktionen sind in den Weichennestern Heimbach und Vorbahnhof zu beachten. Die Restriktionen in Gütsch sind in die Fälle Folgefahrten Einfahrt, Folgefahrten Einfahrt mit Splitten, Folgefahrten Ausfahrt, Folgefahrten Ausfahrt mit Splitten, Gegenfahrten Einfahrt - Ausfahrt sowie Gegenfahrten Ausfahrt - Einfahrt unterteilt. Da das Weichennest Fluhmühle bei Einfahrten stets Splitten erfordert, ist der Fall Folgefahrten Einfahrt mit Splitten in Gütsch inexistent. Gegenfahrten Ausfahrt - Einfahrt sind ohne Einschränkungen möglich. Bei den übrigen Kombinationen ist entweder das Sperrzeitende des ersten Zuges oder der Sperrzeitanfang des zweiten Zuges oder gar beide von der Zuglänge abhängig. Daraus resultieren abgestufte Restriktionen, die als maximale Länge in Form von Anzahl Wagen angegeben werden.

Abbildung 23 Restriktionen Weichennest Gütsch

Einschränkungen Einfahrt -> Einfahrt

1. Zug	2. Zug	von Ebikon	von Emmenbr. G60
Gütsch 80 12 + 1.25/W	12	15	6
Gütsch 60 18 + 1.25/W	10 Wagen	7 Wagen	alle
	5 Wagen	2 Wagen	10 Wagen

~~Einschränkungen Einfahrt -> Einfahrt mit Splitten
(kommt wegen Splitting in Fluhmühle nicht vor)~~

1. Zug	2. Zug	von Ebikon	von Emmenbr. G60
Gütsch 80 ab 50m 1.25/W	12	15	6
Gütsch 60 ab 50m 1.25/W +6s	inexistent	inexistent	alle
	alle	alle	inexistent

Einschränkungen Einfahrt -> Ausfahrt

1. Zug	2. Zug	40km/h->94R	RADN	10 Dosto	11 Dosto
Gütsch 80 ab 50m 1.25/W	11+1.25/W	14+ 1.25/W	24	21	
Gütsch 60 ab 50m 1.25/W +6s	alle	Σ: 15 Wagen	alle	alle	
	Σ: 17 Wagen	Σ: 15 Wagen	6 Wagen	9 Wagen	

Einfahrt
Ausfahrt

Einschränkungen Ausfahrt -> Ausfahrt

1. Zug	2. Zug	40km/h->94R	RADN	Dosto
allgemein 10	11+1.25/W	14+ 1.25/W	24 / 21	
Gütsch 60 25	alle	10 Wagen	kein	
10 Dosto 14	kein	kein	kein	
11 Dosto 19	9 Wagen	6 Wagen	nein	
	4 Wagen	kein	nein	

Einschränkungen Ausfahrt -> Ausfahrt mit Splitten

1. Zug	2. Zug	40km/h->94R	RADN	Dosto
allgemein -	11+1.25/W	14+ 1.25/W	24 / 21	
G60 / 10 Dosto 4	alle	alle	alle	
G60 / 11 Dosto 9	alle	alle	nein	
	alle	10 Wagen	nein	

Einschränkungen Ausfahrt -> Einfahrt

1. Zug	2. Zug
	keine Einschränkungen

Lesebeispiel Abbildung 23

Vorgenommene Belegung: - Ausfahrt IR
- Richtung Emmenbrücke
- 8 Wagen -> Fahrt gemäss RADN (keine Homogenisierung)
- nicht über die auf 60km/h beschränkte Weichenverbindung

Restriktionen Vorpuls (eingelegter Zug als 2. Zug)	für Einfahrten
	- über 60km/h-Weichenverbindung maximal 7 Wagen - sonst keine Einschränkungen
	für Ausfahrten ohne Splitten
	- maximal 10 Wagen - kein Dosto mit 10 oder mehr Wagen (Fahrt über 60km/h-Weichenverbindung bedeutet Splitten)
	für Ausfahrten mit Splitten
	- kein Dosto mit 11 Wagen über 60km/h-Weichenverbindung
Restriktionen Folgepuls (eingelegter Zug als 1. Zug)	für Einfahrten
	- keine Einschränkungen
	für Ausfahrten ohne Splitten
	- nach RADN fahrende Züge maximal 10 Wagen - kein Dosto mit 10 und mehr Wagen
	für Ausfahrten mit Splitten
	- keine Einschränkungen

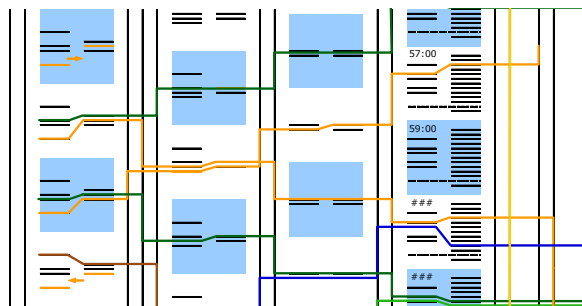
Unterschiedliche Fahrordnungen für gleiche Zug-/Fahrwegkombination

Die Kreuzung des RegioExpress Bern – Luzern mit seinem Gegenzug zwischen Fluhmühle und Heimbach kann aufgrund des Richtungspulses in Fluhmühle auf dem erstellten PULS-Raster nicht gemäss bestehendem Fahrplan abgebildet werden. Zumindest einer der beiden Züge bremst im heutigen Betrieb auf ein geschlossenes Signal, was der Strategie der Methode PULS widerspricht. Soll die aktuelle Fahrlage erhalten bleiben, muss von diesem Prinzip in diesem speziellen Fall abgewichen werden. Der ausfahrende RE verlangsamt seine Fahrt auf

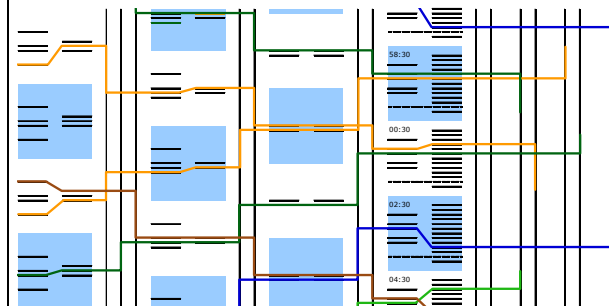
das Weichennest Fluhmühle hin (Ausfahrtsignal Bahnhof Gütsch) und beansprucht deshalb das äussere Gleis (Gleis 3) für einen zusätzlichen Puls (Abbildung 24). Inwieweit sich das Bremsmanöver auf die Sperrzeit im Weichennest Gütsch auswirkt, ist genau zu prüfen und es sind allenfalls entsprechende Restriktionen abzuleiten. In der Abfolge Ausfahrt – Einfahrt besteht jedoch eine gewisse Reserve. Bei einer anderen Konstellation der beiden Züge entfällt diese Sonderfahrordnung.

Abbildung 24 Kreuzung RE von/nach Bern

zwischen Fluhmühle und Heimbach
gedrosselte Fahrordnung



zwischen Gütsch und Vorbahnhof
normale Fahrordnung



Für die Reservation des Weichennestes Gütsch sind zwei Vorsignalgruppen massgebend, die bedeutend weiter als die Länge des Bremsweges entfernten Vorsignale für die Zufahrten Emmenbrücke und Ebikon sowie deren Wiederholungssignale, welche für die Zufahrt Littau mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 60km/h massgebend und in entsprechender Bremswegdistanz angeordnet sind. Im heutigen Betrieb ergeben sich bei dichter Zugfolge oft Fahrten am geschlossenen ersten Vorsignal vorbei. Mit der entsprechenden Bremsung bis zum inzwischen geöffneten Wiederholungssignal lassen sich kürzere Zugfolgezeiten für die anschließenden Blockabschnitte erreichen als bei Vorbeifahrt am offenen ersten Vorsignal. Wird dieser Effekt bei der Methode PULS nicht angewandt, lässt sich die Zugfolge von 120 Sekunden nur für Folgefahrten erster Zug von Littau, zweiter Zug von Emmenbrücke oder Ebikon her realisieren. Da der Anteil der Zufahrt Littau von allen Zügen klein ist, ist eine solche Einbusse nicht tolerierbar. Um nicht die Pulsdauer erhöhen zu müssen, soll das bestehende Regime in der Methode PULS abgebildet werden. Dies geschieht durch eine generelle Homogenisierung der Einfahrt im Bereich des Weichennestes Gütsch auf 60km/h oder die Bereitstellung zweier Fahrordnungen. Die nicht homogenisierte Fahrordnung kann in letzterem Falle vergeben werden, wenn im Vorpuls keine Belegung vorgenommen wird. Sie verursacht beträchtliche Restriktionen auf diesen. Das Regime mit zwei Fahrordnungen soll nur zur Anwendung kommen, falls Einschränkungen der Permutation ausgeschlossen werden können.

Güterzüge mit trägerer Fahrdynamik als die langen Reisezüge sind bei der Erstellung des PULS-Rasters nicht berücksichtigt worden. Sie können nur mit grösseren Restriktionen durch den Verdichtungsbereich geschleust werden. Mit verschiedenen vorgehaltenen Fahrordnungen kann erreicht werden, dass möglichst nur Restriktionen entstehen, welche die benachbarten Züge der aktuellen Belegung nicht tangieren. Die Reservation des Weichennestes Vorbahnhof für eine Ausfahrt kann beispielsweise unmittelbar nach Freigabe der Weichen 11 / 13 einer Flirt-Einfahrt erfolgen. In Heimbach kann die aufgrund der Verflechtung von Gegenfahrten ansonsten unnutzbare Zeit ausgenützt werden. In Gütsch und Fluhmühle ist möglicherweise eine Passage ohne überlange Sperrzeit zu erreichen. Aufgrund von Anpassungen der Reisezugsbelegungen kann hingegen eine spätere Reservation des Vorbahnhofes aktuell werden, was aber grössere Restriktionen in den Folgepulsen verursacht.

6.3.2 Belegung

Für die von der Kapazitätsanalyse vorgesehenen Betriebsprogramme werden auf dem vorgängig erstellten PULS-Raster entsprechende Belegungen vorgenommen. Für die manuelle Belegung wird eigens eine grafische Oberfläche erzeugt. Dieses provisorische Instrument wird nur im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Es handelt sich dabei um eine Excel-Datei, wobei das PULS-Raster als Grundlage durch Farbgebungen von Zellen und Rahmen dargestellt ist und die Belegungen mittels des Zeichnungswerkzeuges ‚Polylinie‘ eingefügt werden. Eine leistungsfähigere Version steht bei den SBB in Arbeit. Sie umfasst eine eigenständige Software-Plattform.

Bei der Darstellung der Belegung wird auf das Aufführen der je Zug verursachten Restriktionen für die Nachbarpulse verzichtet. Die vorgenommenen Belegungen wurden jeweils manuell auf sämtliche Restriktionen überprüft. Vergleiche die Zusammenstellung für das Weichennest Gütsch in Abbildung 23.

Betriebsprogramm 'Heutiges Angebot'

Der Fahrplan 2005 wird möglichst ähnlich abgebildet. Es sind als Folge des PULS-Rasters Verschiebungen im Minutenbereich nötig. Die Fahrwege und Gleisbelegungen stimmen weitgehend mit der Praxis überein.

Betriebsprogramm 'Sättigung'

Zusätzlich zum heutigen Angebot werden weitere Züge ins Fahrplangefüge eingelegt. Die Fahrplanzeiten der bestehenden Züge werden dabei nicht verändert, hingegen die verwendeten Fahrwege. Auch Konflikte bei der Gleisbelegung im Bahnhof Luzern werden falls notwendig durch umfangreiche Rochaden gelöst.

Betriebsprogramm 'Komprimieren'

Der bestehende Fahrplan wird soweit als möglich komprimiert. Die Fahrten werden zeitlich um so viele Pulse vorverschoben, als dies aufgrund der zuvor verkehrenden Züge möglich ist. Es werden jedoch keine Züge in ihrer Reihenfolge abgetauscht. Auch in diesem Falle werden Anpassungen an benutzten Fahrwegen und an der Gleisbelegung im Bahnhof Luzern vorgenommen.

Betriebsprogramm 'Durchschnittlicher Zugtyp Lok mit 8 Wagen'

Für Züge mit acht Wagen ergeben sich wenige Restriktionen im Verdichtungsbereich Luzern. Das PULS-Raster ist für solche Züge besonders geeignet. In einem theoretischen Betriebsprogramm wird die maximale Kapazität evaluiert. Durch die Standardisierung werden keine Rangierfahrten benötigt. Auf Trassen für Güterzüge wird verzichtet. Die Strecken nach Littau und Ebikon werden fünfmal pro Stunde und Richtung bedient, nach Emmenbrücke zehnmal. Es ergibt sich dadurch ein Takt von 12 Minuten. Auf der Strecke nach Würzenbach fahren in eine Richtung drei, in die entgegengesetzte zwei Züge je Stunde (24-Minuten-Takt). Die Anzahl möglicher Züge ist stark vom Anteil der Züge auf den Einspurstrecken abhängig.

Betriebsprogramm 'Systematisiertes Angebot'

Dieses Betriebsprogramm strebt eine hohe Kapazitätsauslastung an, indem das Angebot systematisiert wird. Von der Zufahrt Emmenbrücke her verkehrt alle 6 bis 8 Minuten ein Zug, auf der Zufahrt Ebikon werden jeweils ein S-Bahn-Zug und ein IC gebündelt und von Littau her gilt ein Halbstundenrhythmus sowohl für die RE als auch die S-Bahn-Züge. Die Linie nach Meggen (Würzenbach) wird halbstündlich bedient. Das Betriebsprogramm ermöglicht deutlich kürzere Standzeiten im Bahnhof Luzern, wodurch etliche Probleme der Gleisbelegung umgangen werden können. Auf Rangierfahrten zum Stärken oder Schwächen von Zügen sowie auf aufwändig zu zerlegende Einsatzzüge wird verzichtet. Das Betriebsprogramm wird mit den heute üblichen, unterschiedlichen Kompositionen abgewickelt. Es zeigt sich, dass der

einmal pro Stunde verkehrende Schnellzug Basel – Gotthard und umgekehrt als Sonderfall im sonst systematischen Fahrplan ein S-Bahn-Zugpaar Ebikon – Luzern verhindert, da er eben diese Trasse benötigt. Ebenso ist ersichtlich, dass die Bedienung der Linie nach Meggen kapazitätshinderlich ist.

6.3.3 Stabilität

Die Methode PULS zeigt die Abhängigkeiten im Fahrplangefüge sehr gut auf. Bei allfälligen Verspätungen kann eine alternative Belegung vorgenommen werden. Die Züge können soweit als möglich über andere Fahrwege aneinander vorbei geführt werden. Falls neben dem verspäteten weitere Züge verzögert werden müssen, sind die Einflüsse kaskadenartig weiterverfolgbar. Da verschiedene Lösungen für einen Verspätungsfall denkbar sind, können gezielt weniger sensiblen Zügen Folgeverspätungen angelastet werden, um besonders heikle Züge zu schützen. Das Betriebsprogramm 'Stabilität' behandelt Beispielfälle von Verspätungen im Betriebsprogramm 'Heutiges Angebot'. In den Tabellen 14 und 15 sind die Anpassungen am Betriebsprogramm (Neuplanung) zusammengestellt.

Tabelle 14 Primärverspätungen im Betriebsprogramm 'Heutiges Angebot' (Beispiel)

Zeit	Verspätung	Typ	Zugnr.	Destination	Zulauf
17:03	4 min	RE	3327	Bern - Wolhusen	LIT
17:38	2 min	EC	252	Milano – Bellinzona – Arth-Golau	EBI
17:42	4 min	IR	2431	Küssnacht – Arth-Goldau – Romanshorn	WUE

Tabelle 15 Sekundärverspätungen / Fahrwegänderungen zu Tabelle 14

Zeit	Typ	Zugnr.	Destination	Zulauf	Verspätung	Fahrweg- änderung
16:57	RE	3338	Wolhusen – Bern	LIT	4 min	nein
17:00	S9	21966	Emmenbrücke – Lenzburg	EMM	2 min	ja
17:05	RE	3582	Emmenbrücke – Olten	EMM	2 min	ja
17:08	S1	21163	Baar – Rotkreuz – Ebikon	EBI	2 min	nein
17:11		92969	Rotkreuz (Lokzug)	EBI	-	ja
17:13	IR	2181	Basel – Olten – Sursee	EMM	-	ja
17:40	S8	21865	Olten – Emmenbrücke	EMM	- 2 min	nein
17:49		3338	Gleisfeld – Halle (Fluchtfahrt)		2 min	nein
17:49	S1	21170	Ebikon – Rotkreuz – Baar	EBI	-	ja
17:50	Lok	252	Rangierfahrt Halle – Gleisfeld		- 2 min	nein
17:54	RE	3581	Olten – Emmenbrücke	EMM	2 min	ja

6.4 Simulation

Für die Simulation von verschiedenen Betriebsprogrammen wurde die Applikation Open-Track verwendet. Diese ermöglicht die Simulation von Eisenbahnnetzen auf einem detaillierten Abbild der Infrastruktur unter Verwendung der technischen Eigenschaften des eingesetzten Rollmaterials. Sie wurde am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme an der ETH Zürich entwickelt. Die verwendeten Einstellungen sind den Abbildungen 23 und 24 zu entnehmen.

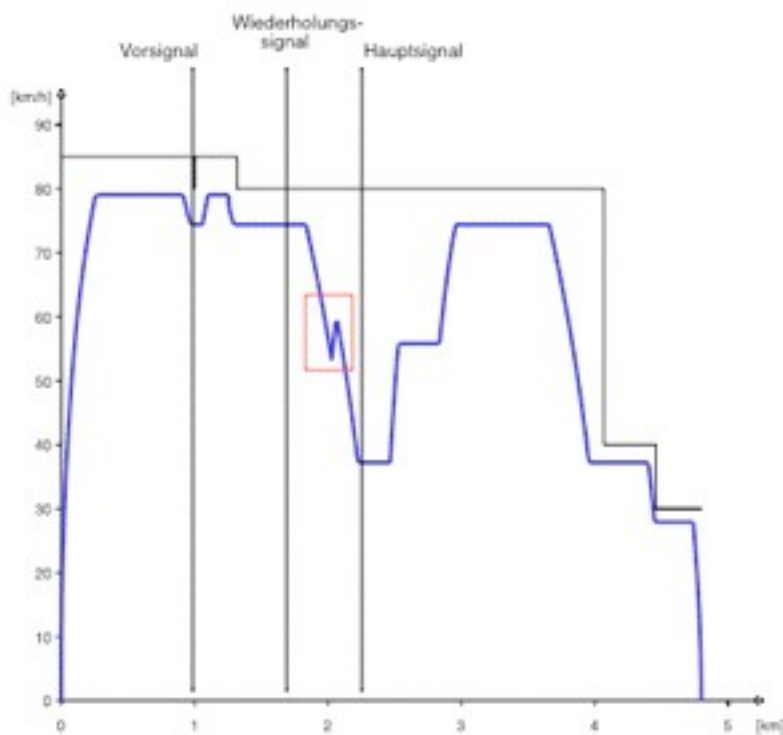
Abbildung 25 Einstellungen Preferences – verwendete Dateien



Quelle: OpenTrack (Screenshot)

Die Simulation mit OpenTrack beinhaltet einige Elemente, die ein präzises Abbild des effektiven Betriebes nicht zulassen. Der Aufenthalt eines eingefahrenen Zuges bis zu seiner Abfahrt ist nur begrenzt abbildbar, da sich technische Probleme bei der Verwaltung der Zugnummern (Train ID) ergeben. Für eine konsistente Gleisbelegung wäre dies jedoch notwendig. Die abfahrenden Züge müssen im Bahnhof Luzern erzeugt werden. Sie werden beim Ausfahrtsignal aufgestellt und fahren nicht von ihrer realen Position am Prellbock ab. Umfangreichere Manöver wie Lokwechsel an nicht verpendelten Zügen (Gotthardzüge) können nicht realitätsnah dargestellt werden, da gleichzeitig drei Objekte an einem Perron aufgestellt sind (abgehängte Lok, Komposition, beizustellende Lok). Des Weiteren fahren die Züge der Simulation mit spätem Bremsensatz auf geschlossene Signale zu. Trotz Warnung zeigendem Vorsignal wird einer vom Hauptsignal zurückgerechneten, straffen Bremskurve gefolgt. Dies ent-

Abbildung 26 Später Bremsensatz

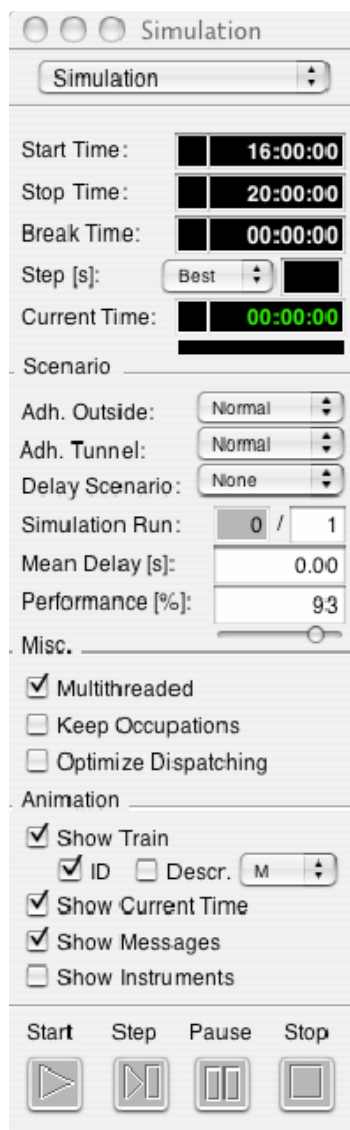


Quelle: OpenTrack

spricht nicht der Praxis. Die Abbildung 26 veranschaulicht die Einfahrt eines Flirt von Emmenbrücke im Blockabstand nach einem Flirt aus Ebikon mit Vorbeifahrt an geschlossenem Vor- und Wiederholungssignal. Das rote Rechteck zeigt, dass der Blockabschnitt Ausfahrt

Bahnhof Gütsch (ab markiertem Hauptsignal) eine kürzere Zugfolgezeit ermöglicht als der nachfolgende Blockabschnitt Heimbach. Der Zug könnte nach einer kurzen Bremsung auf ca. 55km/h bereits wieder beschleunigen, muss jedoch kurz darauf bis zur Freigabe des Blockabschnittes Heimbach durch den vorausfahrenden Zug seine Geschwindigkeit auf 40km/h drosseln. Eine beträchtliche Überschätzung der Leistung ergibt sich dadurch, dass die Reservation der Fahrstrasse unmittelbar bei Abfahrt der Züge im Bahnhof erfolgt. Im Rahmen der Optimierung des Abfahrtsprozesses ist eine Karenz von 12 Sekunden vorgesehen. Derzeit ist die Zeitspanne zwischen Einlaufen der Fahrstrasse und Abfahrt teilweise viel grösser.

Abbildung 27 Simulation



Quelle: OpenTrack

Betriebsprogramm 'Heutiges Angebot'

Preferences gemäss Abbildung 25

Bei der Simulation des heutigen Angebotes und den davon ausgehenden Betriebsprogrammen 'Sättigung' und 'Kompromieren' sind die Abfahrtszeiten gemäss Fahrplan festgelegt. Die Ankunftszeiten sind leicht variabel.

Betriebsprogramm 'Sättigung'

Set <Luzern_heute_gesättigt> mit <L-satt.courses> und <L-satt.timetable>

Das heutige Betriebsprogramm wird unverändert belassen. In bestehende Lücken im Fahrplangefüge werden zusätzliche Züge ('Extrazüge') eingefügt. Für alle Extrazüge wird der Zugtyp NPZ 5-teilig eingesetzt. Da der Überblick über Abhängigkeiten bei der Fahrwegbenutzung nur eingeschränkt möglich ist, werden keine umfangreichen Fahrwegänderungen der bestehenden Züge vorgenommen. Dank solcher wären möglicherweise einige wenige weitere Züge durchzubringen. Ebenso wird auf eine exakte Gleisbelegung für die Extrazüge im Bahnhof Luzern verzichtet, da die Auswirkungen notwendiger umfangreicher Rochaden nicht ersichtlich sind.

Betriebsprogramm 'Komprimieren'

Set <Luzern_heute_komprimiert> mit <L-komp.courses> und <L-komp.timetable>

Das heutige Betriebsprogramm wird soweit als möglich auf eine kürzere Zeitdauer als den geplanten Stundenrhythmus komprimiert. Die Zugfahrten werden zeitlich dichtestmöglich aneinander geschoben, ohne jedoch Änderungen in der Reihenfolge vorzunehmen. Insbesondere wird die bezüglich Richtung wechselweise Benützung der Einspur am Rotsee beibehalten. Mit einer Bündelung würden sich Fahrlagen um zehn Minuten und mehr verändern, was nicht mehr mit dem heutigen Angebot vereinbar wäre. Auch bei dieser Simulation werden nur begrenzt Fahrweganpassungen vorgenommen. Die Gleisbelegung in Luzern wird hingegen berücksichtigt, die Aufenthaltszeiten werden jedoch entsprechend verkürzt.

Betriebsprogramm 'FLIRT'

Set <Luzern_Flirt > mit <L-flirt.courses> und <L-flirt.timetable>

In diesem Betriebsprogramm wird der gesamte Verkehr nur mit dem besonders flinken Zugstyp FLIRT (hohe Beschleunigung, kurze Zuglänge) abgewickelt. Diese Variante soll die maximale Kapazität des Verdichtungsgebietes ausloten. Beim untersuchten Betriebsprogramm handelt es sich um ein einigermaßen sinnvolles Angebot. Zwar wird auf die Bedienung der Strecke nach Würzenbach verzichtet, auf den anderen Zulaufstrecken ergibt sich ein Rhythmus von 7.5 Minuten, welcher sich aus der Länge der Einspurabschnitte Rotsee und Zimmereggstunnel ergibt. Von und nach Emmenbrücke verkehren zwei Züge innerhalb einer Taktfrequenz. Im Bahnhof Luzern ist eine mögliche Gleisbelegung hinterlegt. Obwohl je Destination nur ein Gleis benützt wird, können im effektiven Betrieb jeweils die Gleispaare 3/4, 5/6 und 8/9 verwendet werden. Auf dem Gleis 7 ist eine Kurzwende nötig. Ein Betriebsprogramm mit noch weitergehender Abstraktion, um eine noch höhere Kapazität zu erhalten, führt letztendlich zu einer Betrachtung der Streckenkapazität einer Doppelspur. Bei einer Zugfolgezeit für FLIRT von rund 60 Sekunden bei der Ausfahrt und 90 Sekunden bei der Einfahrt resultiert ein für die Stichlinie massgebender Wert von 80 Zügen je Stunde. Das simulierte Betriebsprogramm erreicht 64 Züge je Stunde und somit durchschnittlich 112.5 Sekunden Zugfolgezeit.

Betriebsprogramm 'Durchschnittlicher Zugtyp Lok mit 8 Wagen'

Set <Luzern_durchschnitt> mit <L-durchschnitt.courses> und <L-durchschnitt.timetable>

Bei diesem Betriebsprogramm werden einheitliche Züge aus einer Lok und 8 Wagen eingesetzt. Es stellt einen gut vergleichbaren Referenzwert zur Methode PULS zur Verfügung. Auf Güterzüge wird bei diesem standardisierten Fahrplan verzichtet. Ansonsten werden die Strecken Richtung Littau und Ebikon sechsmal, Richtung Emmenbrücke zwölfmal und Richtung Würzenbach dreimal je Stunde und Richtung bedient. Die Taktzeit beträgt demnach 10 Minuten. Im Bahnhof Luzern wird die Gleisbelegung beachtet, wobei Durchbindungen Emmenbrücke – Luzern – Ebikon und zurück notwendig sind, da nur die Züge von/nach Ebikon eine alleinige Fahrstrasse im Vorbahnhof erhalten. Die durchgebundenen Züge verkehren auf den peripheren Gleisen 11 und 2. Den andern Destinationen werden die Gleise 3 (Emmenbrücke), 5/6 (Würzenbach) und 7 (Littau) zugeteilt.

Stabilität

Bei Verspätungen ist eine flexible Disposition notwendig. Insbesondere in der sehr variabel genutzten Anlage des Verdichtungsgebietes Luzern verursachen einzelne Zugverspätungen rasch viele Verzögerungen der übrigen Züge durch Signalhalte. Die Erkennung optimaler Betriebsformen für den laufenden Betrieb ist in der Simulation nicht einfach. Die Umsetzung entsprechender Dispositionen ist aufwändig und muss durch Eingriffe in die laufende Simulation mittels der Funktion 'Change State' für Signale erfolgen. Auf diese Untersuchungen wird deshalb in dieser Arbeit verzichtet.

7 Bewertung der Methoden

7.1 Vergleich Kapazitätsanalyse Knoten Luzern

Tabelle 16 Vergleich Kapazitätsanalyse Knoten Luzern

17:00 – 18:00 [Züge/Stunde]	Fahrplan heute	gesättigt	nur Flirt	systema- tisiert	durch- schnittlich	komprimiert [Minuten]
PULS						54
Zugfahrten Normalspur	34	46	-	46	45	
Rangierfahrten	18	21	-	7	0	
OpenTrack						48
Zugfahrten Normalsspur	34	48	64	-	54	
Rangierfahrten	18	18	0	-	0	

Der heutige Fahrplan kann mit den untersuchten Methoden PULS und Simulation OpenTrack abgebildet werden.

Bei der Sättigung des bestehenden Fahrplanes mit zusätzlichen Zügen kommt die Eigenschaft der Methode PULS zum Tragen, für die vorhandenen Züge bereits besonders vorteilhafte Fahrlagen zu definieren. Weitere Züge passen in die Lücken des Fahrplangefüges, ohne dass grössere nicht nutzbare Zeiträume übrig bleiben. Ebenso begünstigt die Möglichkeit effizient Anpassungen an den zu verwendenden Fahrwegen vorzunehmen, freie Trassen durch den ganzen Verdichtungsbereich zu schaffen. Mit der Simulation sind dagegen trotz Verzicht auf eine Fahrgenauigkeitsmarge beim Betrieb nach der Flussmethode nur geringfügig mehr Züge planbar, da ungünstige Konstellationen in einzelnen Bereichen des Verdichtungsbereiches durchgehende Trassen verunmöglichen.

Durch Komprimieren des bestehenden Fahrplanes kann die Zykluszeit mit der Methode PULS auf 54 Minuten verkürzt werden, mit der Simulations-Methode jedoch auf 48 Minuten.

Bei der Simulation ist wiederum keine Fahrgenauigkeitsmarge enthalten. Werden für einen Vergleich zur ungefähren Zugfolgezeit von 120 Sekunden jeweils 15 Sekunden hinzugeschlagen, erhöht sich die Zykluszeit um 12,5% auf ebenfalls 54 Minuten. Es zeigt sich, dass bei der Methode PULS durch die starre Pulsdauer, welche für alle Zugtypen einen genügend grossen Platzhalter bereitstellt, über den gesamten Verdichtungsbereich nur wenig Kapazität verloren geht.

Das Betriebsprogramm, welches ausschliesslich mit dem flinken Zugtyp FLIRT abgewickelt wird, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht mit der Methode PULS abgebildet werden, da die kurzen Sperrzeiten ein dafür optimiertes PULS-Raster erfordern. Der Vergleichswert unter Berücksichtigung der Fahrgenauigkeitsmarge beträgt rund 54 Züge je Stunde.

Das mit der Methode PULS erstellte Betriebsprogramm 'Systematisiertes Angebot' zeigt auf, dass unter Einbezug von Güterzügen bei einem aus Perspektive des Marktes sinnvollen Angebot die Kapazitätsgrenze bei rund 46 Zügen je Stunde liegt. Bei Verzicht auf Güterzüge kann die Zugzahl auf etwa 48 Züge gesteigert werden. Eine weitere Erhöhung ergäbe sich durch den Verzicht auf die Bedienung der Meggener Linie (Würzenbach) wie beim Betriebsprogramm FLIRT der Simulations-Methode.

Beim Betriebsprogramm mit einem durchschnittlichen Zugtyp mit acht Wagen ergibt sich für die Methode PULS auch nach Korrektur der simulierten Zugzahl auf 48 Züge/Stunde aufgrund der Fahrgenauigkeitsmarge eine um drei Züge niedrigere Leistung. Dies ist auf den hohen Anteil von Zügen, welche die Einspurstrecken nach Littau und Ebikon befahren, zurückzuführen. Der Richtungspuls in Fluhmühle reduziert den Spielraum stark. Wird nur die reine Sperrzeit ohne Fahrgenauigkeitsmarge berücksichtigt, wie dies bei der Simulation der Fall ist, so ist die dichte Folge Einfahrt – Ausfahrt auf konfliktbehafteten Fahrwegen möglich.

7.2 SWOT-Analyse für Methode PULS

Tabelle 17 SWOT-Analyse

Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
hohe betrieblich beherrschbare Kapazität	zuverlässiger Informationsfluss notwendig
rasches Auffinden guter Lösungen für ein Fahrplangefüge	beschränkte Abbildbarkeit bestehender Fahrpläne
Permutation als Freiheitsgrad	Fahrgenauigkeitsmarge für jeden einzelnen Zug
rasche Neuplanung im Störfall möglich	geringfügige Kapazitätseinbusse infolge starrer Rasterung
fahrplantechnische Flexibilität bei Angebotsplanung gewährleistet	
Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
klare Definition der Möglichkeiten einer Infrastruktur	technische Risiken des zeitgesteuerten Betriebes
Quantifizierbarkeit des Nutzens von Infrastrukturausbauten	
Vorgabe von Kriterien für Bau von kapazitätsoptimalen Infrastrukturen	

Die Stärken ergeben sich insbesondere durch die Fokussierung auf besonders gute Lösungen für Fahrplangefüge sowie die bestechend einfache Handhabung der Belegung im Verdichtungsbereich durch die Kombination mit der Stufe Fahrstrassenknoten.

Unter der fahrplantechnischen Flexibilität bei der Angebotsplanung ist zu verstehen, dass der Planer nicht nur Kriterien der Angebotsgestaltung unmittelbar in die Bewirtschaftung eines Verdichtungsbereiches einfließen lässt, sondern auch umgekehrt Eigenschaften des Netzes und der Infrastruktur gezielt in einer angepassten Angebotsgestaltung umsetzt. Das in der Schweiz praktizierte Knotensystem nutzt die fahrplantechnische Flexibilität stark. Ausser nachfrageorientierten Kriterien bestimmen auch produktionsorientierte das Angebot. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Haltepolitik oder Durchbindungen rekursiv vom Fahrplangefüge abhängig sind (z.B. Verzicht auf ICN-Halt Lenzburg im Fahrplan 2005, Verknüpfung von S-Bahn-Linien). Sogar die Korridorbildung wird teilweise vom Fahrplangefüge abhängig gemacht (Zürich – Lausanne via Bern oder Biel). Diese wichtigen Elemente bei der Fahrplan-

planung bleiben mit der Methode PULS ganz in der Hand des Planers. Durch die einfache Begreifbarkeit von Abhängigkeiten im Fahrplangefüge werden Optimierungen erwähnter Art sogar begünstigt.

Der zeitgesteuerte Betrieb erfordert einen umfassenderen und sehr zuverlässigen Informationsfluss. Auch die Fahrt im Ausgleichsbereich muss zeitgesteuert erfolgen. Das entsprechende Instrument namens Flex-Fahrplan sowie weitere notwendige Elemente wie der genaue Abfahrtsprozess im Bahnhof sind bei den SBB in Arbeit.

Die Fahrzeitreserven werden aus dem Verdichtungsbereich herausgehalten. Die Züge fahren ohne Behinderung durch die Abfolge von Pulszonen. Um den zeitgesteuerten Betrieb zu ermöglichen, ist jedoch eine Fahrgenauigkeitsmarge nötig, die für jeden Zug einen erhöhten Zeitbedarf bedeutet. Die Bündelung der Züge mit minimaler Zugfolgezeit und die Anordnung einer gemeinsamen Reserve ist nicht möglich. Die optimale Bündelung ist im ereignisgesteuerten Betrieb ebenfalls schwierig zu erreichen. Bei der Methode PULS werden die Reserven präzise in zwei Formen ausgewiesen. Je Zug eine Fahrgenauigkeitsmarge, die der zuverlässig realisierbaren Bündelung entspricht sowie eine von allen Zügen nutzbare Erholungsmarge.

7.3 Anwendungsbereich Methode PULS

Die Methode PULS kommt zur Anwendung, wo die Lösungsfindung im Zeitkontinuum nicht zu bewältigen ist. Die typischen Fälle ergeben sich aus folgenden Bedürfnissen zur Eingrenzung der Lösungsmenge:

- Koordination paralleler Fahrten in grossen Einzel-Weichennestern (Beispiel: Aarau Ost)
- Bewirtschaftung von Weichenköpfen von zentralen Bahnhöfen mit Restriktionen aus der Gleisbelegung (Beispiel: Winterthur)
- Erfassen umfangreicher Abhängigkeiten zwischen Weichennestern auf Anlagen mit teilweise eingeschränkten Fahrwegbeziehungen (Beispiele: Luzern, St. Gallen)
- Effiziente Nutzung Wechselbetrieb (Beispiele: Luzern, Lausanne – Renens)

Weitere Netzteile können mit der Methode PULS bewirtschaftet werden, um die Neuplanung im Falle von Verspätungen zu rationalisieren. Zu diesen Anlagen gehört beispielsweise Pfäf-

fikon SZ. Aus Gründen der Kapazitätsbewirtschaftung und der Eingrenzung der Lösungsmenge ist die Anwendung der Methode PULS jedoch nicht nötig. Nicht geeignet sind unabhängige Weichennester, in welchen gleichförmige Abkreuzungen stattfinden. Diese können auch bei dichtem Verkehr gemäss ihrem individuellen Sperrzeitbedarf im Zeitkontinuum geplant werden. Ein Beispiel dazu ist die Verzweigung Daillens an der Strecke Lausanne – Yverdon. Ebenso überflüssig ist die Methode PULS bei reinen Ein- und Ausfädelungsweichennestern, beispielsweise Mattstetten.

Zwischen den Verdichtungsbereichen liegt im Normalfall ein längerer Streckenabschnitt, welcher im Zeitkontinuum bewirtschaftet wird. In diesen Bereichen werden auch die Reserven ausgewiesen. Verspätete Züge können einen oder mehrere Pulse aufholen, da ihre Plantrasse vor Eintritt in den nächsten Verdichtungsbereich eine Fahrordnung mit reduzierter Geschwindigkeit vorsieht. Bis zu einem gewissen Zeitpunkt kann auch noch ein früherer Puls als der geplante erreicht werden. Liegt nur ein kurzer Streckenabschnitt, etwa 5 bis 10 Kilometer, mit zwei oder mehreren Blockabschnitten zwischen zwei verpulsten Weichennestern, kann keine für die Verspätungsaufholung nutzbare Fahrzeitreserve zugegeben werden. Die Erstellung des PULS-Rasters kann je Verdichtungs-Teilbereich separat erfolgen, anschliessend werden die beiden 'kurzgekuppelten' Verdichtungs-Teilbereiche durch angepasste Fahrordnungen miteinander verbunden. Halte innerhalb von Verdichtungsbereichen werden durch die Anpassung der Haltezeit eingepasst.

7.4 Ausblick

Die Methode PULS ist ein effizientes Mittel, in hochbelasteten Bereichen von Eisenbahnnetzen eine hohe Leistungsfähigkeit zu ermöglichen. Die Verdichtungsbereiche können derart bewirtschaftet werden, dass ein bestimmtes Stabilitätsmass auch bei hoher Auslastung gewährleistet werden kann. Die beide Schritte Erstellung PULS-Raster und Belegung können automatisiert werden. Für die Erstellung PULS-Raster ist die Automatisierung in Form einer Applikation, welche in einem eng umgrenzten Lösungsraum nach dem Optimum sucht, bei den SBB in Arbeit. Für die Unterstützung durch den Rechner bei der Belegung kann möglicherweise auf die von Burkolter vorgeschlagene Struktur der Petri Netze zurückgegriffen werden. Der Fokus auf eine kleine, effiziente Lösungsmenge durch die Methode PULS löst das Problem des von Burkolter vorgeschlagenen Ansatzes mit der nicht beherrschbaren Lösungsmenge bei Verwendung von realistischen Daten bezüglich Zugfolgezeit, Fahrprofil etc. Die kreisförmigen Elemente im Petri Netz entsprechen prinzipiell einem Topologieelement, die durch das Netz wandernden Punkte (,Token') repräsentieren die Belegungen durch Züge.

8 Literatur

- Ambre, R. (2005), Capacity Studies on Transportation Network, IIT Bombay
- Burkolter, D. (2005), Capacity of Railways in Station Areas using Petri Nets, Dissertation, ETH Zürich
- Delorme, X. (2003), Modélisation et résolution de problèmes liés à l'exploitation d'infrastructures ferroviaires, Dissertation, Université de Valenciennes
- Duden (2003), Deutsches Universalwörterbuch, 5. Auflage, Dudenverlag
- Forsgren, M. (2003), Computation of Capacity on Railway Networks, Masterarbeit, KTH, Schweden
- Gröger, T. A. (2002), Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung, Dissertation, RWTH Aachen
- Herrmann (2005), Stability of Timetables and Train Routings through Station Regions, Dissertation, ETH Zürich
- Hürlimann, D. (2005), OpenTrack, Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen, Benutzerhandbuch zu Software-Applikation, IVT, ETH Zürich
- Lucchini, L., Curchod, A. (2001), Computer-aided system for the analysis of railway network capacity, General Description of the Model, LITEP, EPF Lausanne
- Lucchini, L., Curchod, A., Rivier, R. (2001), Transalpine Rail Network: A Capacity Assessment Model (CAPRES), LITEP, EPF Lausanne
- Mito, Y., Shinbunsha, K., Leave on time, Ausführungen zur besonders hohen Pünktlichkeit der Japanischen Eisenbahnen
- Muthmann, T. (2004), Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Steckendurchsatzleistung, Dissertation, TU Darmstadt
- Pachl, J. (2004) Systemtechnik des Schienenverkehrs, 4. Auflage, Teubner Verlag
- SMA und Partner (2005), Konzeptionelle Angebotsplanung, Produkteinformation Applikation Viriato
- Vakhtel, S. (2002) Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen, Dissertation, RWTH Aachen
- Weidmann, U. (2004), Betriebsplanung im Eisenbahnverkehr, Skript PB 2, IVT, ETH Zürich

Zwaneveld, P. J., Kroon, L. G., van Hoesel, S. P.M. (1997), Routing trains through a railway station based on a Node Packing model

9 Glossar

Puls	zeitlich und örtlich definiertes Element des PULS-Rasters. Die zeitliche Dauer (Pulsdauer) liegt im Bereich der Zugfolgezeit, die örtliche Ausdehnung umfasst prinzipiell einen Blockabschnitt, welcher ein Weichennest beinhaltet.
Nachbarpuls	zeitlich vorhergehender oder nachfolgender Puls in derselben Pulszone.
Pulszone	Weichennest bzw. Blockabschnitt, welcher in Pulsen bewirtschaftet wird.
Weichennest	Bereich einer Eisenbahnanlage, welcher durch mehrere Weichenverbindungen zahlreiche verschiedene Fahrwege zulässt. Vor allem in diesen Bereichen ergeben sich die Konflikte zwischen Zugfahrten.
Pulsphase	zeitliche Lage der Pulse einer Pulszone in Relation zu den Pulsen der anderen Pulszonen eines Verdichtungsbereiches.
Pulsabfolge	Reihe von Pulsen in den verschiedenen Pulszonen, die eine durchgängige Zugfahrt durch den Verdichtungsbereich ermöglicht.
Folgefahrt	Zugfahrt in dieselbe Richtung wie die vorangehende in kurzem zeitlichem Abstand.
Gegenfahrt	Zugfahrt in der entgegengesetzten Richtung wie die vorangehende in kurzem zeitlichem Abstand.
Splitting	Für Folgefahrten Benutzung eines anderen Streckengleises nach dem Weichennest, da die Sperrzeit des vorangehenden Zuges für den Gleisabschnitt nach dem Weichennest die sonst im Verdichtungsbereich realisierbare Zugfolgezeit übersteigt.
Zugtyp	Zugfahrt mit bestimmten Eigenschaften bezüglich Länge und Beschleunigung sowie über bestimmten Fahrweg mit entsprechenden Signalstandorten und Geschwindigkeitsbeschränkungen

Anhänge

A 1 Kontakte SBB

Die vorliegende Diplomarbeit ist in enger Zusammenarbeit mit den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) entstanden. Die Arbeitsgruppe ‚PULS 90‘ ist in der Abteilung Technologie- und Innovationsmanagement bei der Division Infrastruktur der SBB angesiedelt. Der Autor hat in einem Praktikum bei ‚PULS 90‘ an der Methode PULS mitgearbeitet und einen vertieften Einblick erhalten. Insbesondere die praktische Anwendung in Luzern ist im Rahmen des Praktikums entstanden.

Während des Praktikums, aber auch in Begleitung dieser Arbeit, hat Herr Dr. Felix Laube, Leiter des Projekts Methode PULS, das grundlegende Konzept erläutert und unzählige Anregungen betreffend die detaillierte Umsetzung gegeben. Die fachliche Diskussion zur Methode PULS hat ebenso mit Herrn Dr. Raimond Wüst stattgefunden. Die für den Anwendungsfall Luzern in dieser Arbeit verwendeten Sperrzeitendaten sind übernommen worden. Herr Thomas Graffanino, Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe ‚PULS 90‘ hat sie als provisorische Grundlage für die Entwicklung eines PULS-Rasters erzeugt. Das Gleisschema Luzern in Abbildung 21 ist von Herrn Heinz Egli erstellt. Er ist Koordinator für die Methode PULS bei der Abteilung Trassenmanagement in Luzern.

Die Ausführungen zur manuellen bzw. rechnergestützten Planung, welche derzeit bei den SBB zur Anwendung kommt, sind anhand eines Interviews mit Herrn Michael Fankhauser entstanden. Er ist Verantwortlicher für das Trassenmanagement im Raum Luzern.

A 2 Kapazitätsanalyse Luzern: Betriebsprogramme

Betriebsprogramm 'Fahrplan heute'

Betriebsprogramm 'Sättigung'

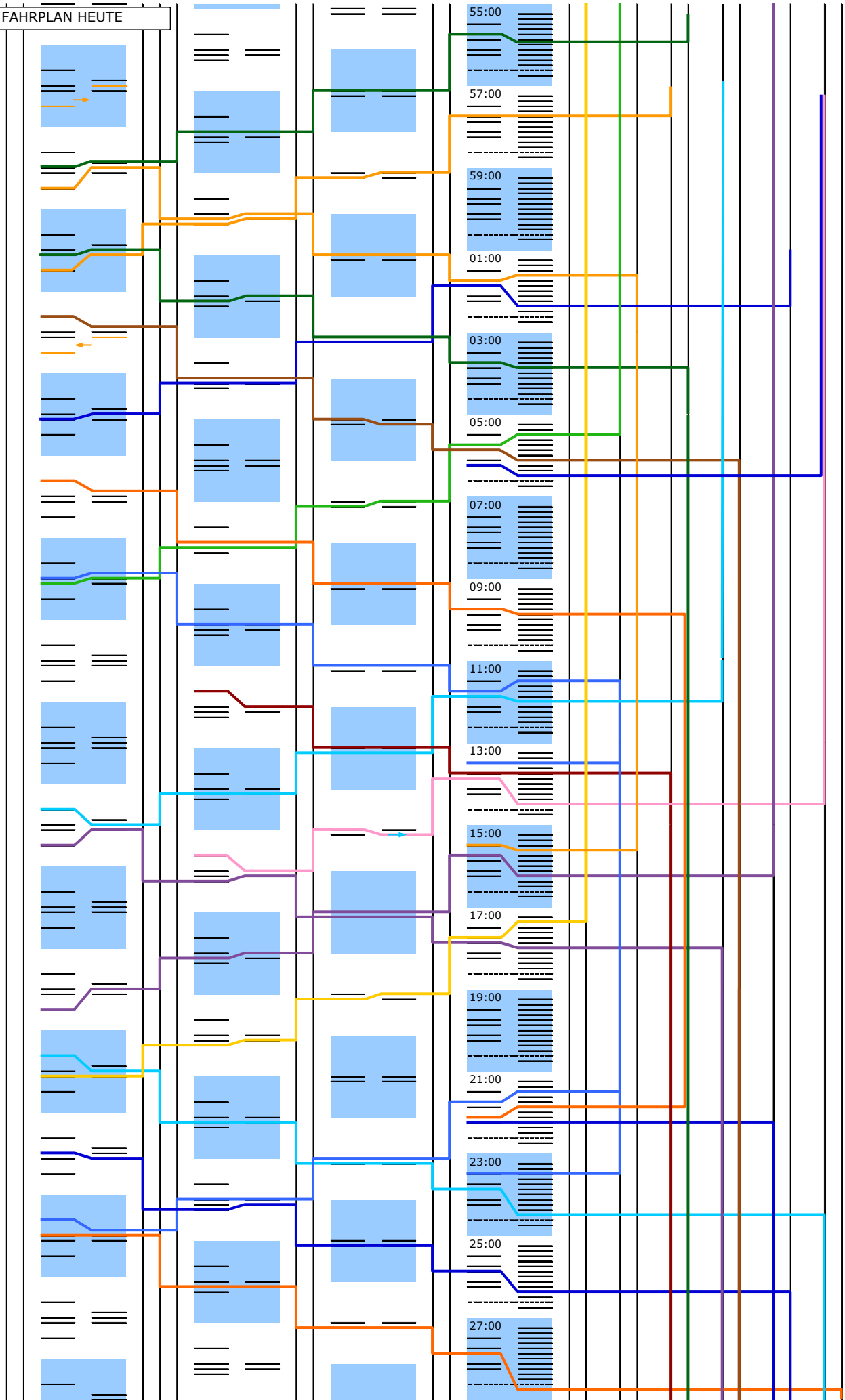
Betriebsprogramm 'Komprimieren'

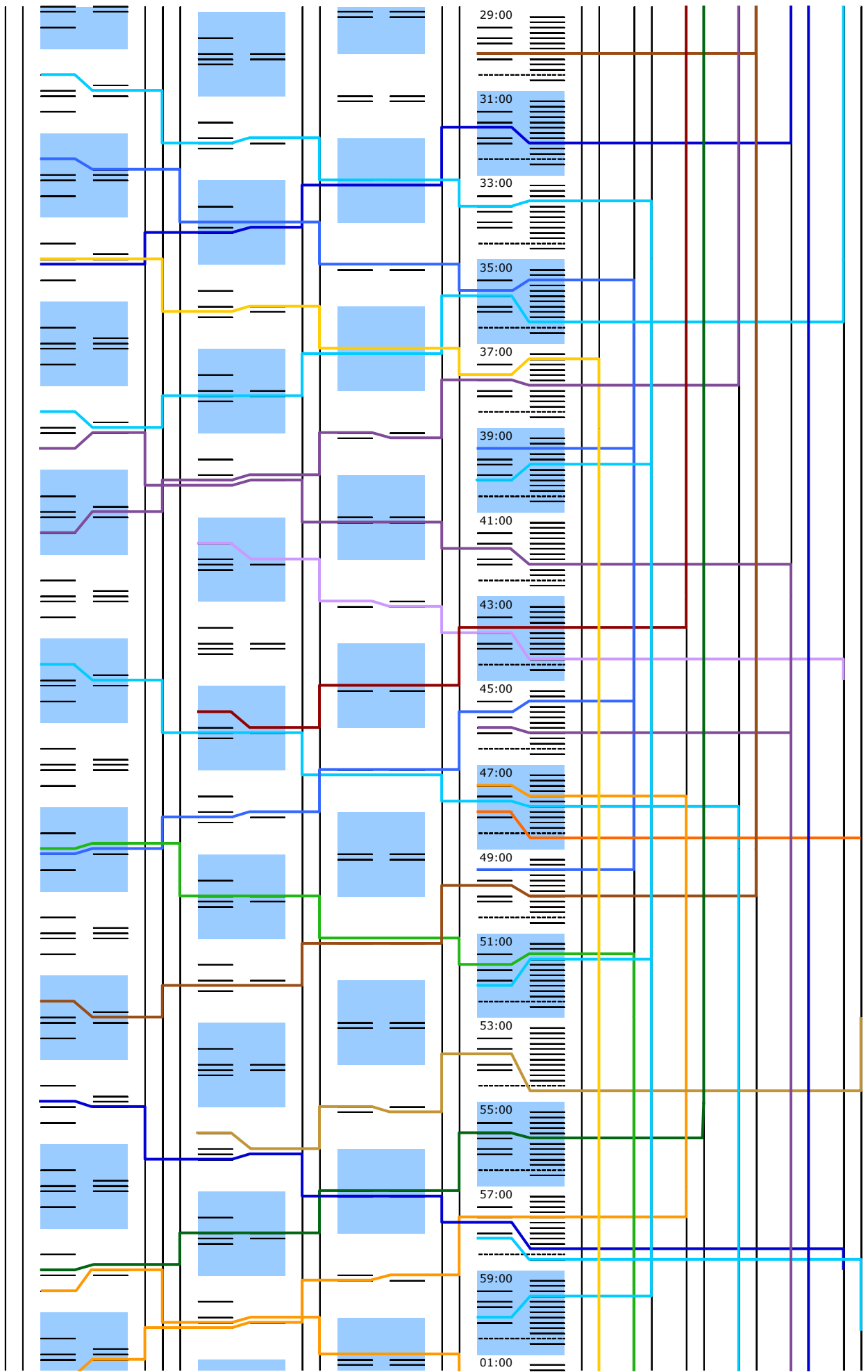
Betriebsprogramm 'Durchschnittlicher Zugtyp Lok mit 8 Wagen'

Betriebsprogramm 'Systematisiertes Angebot'

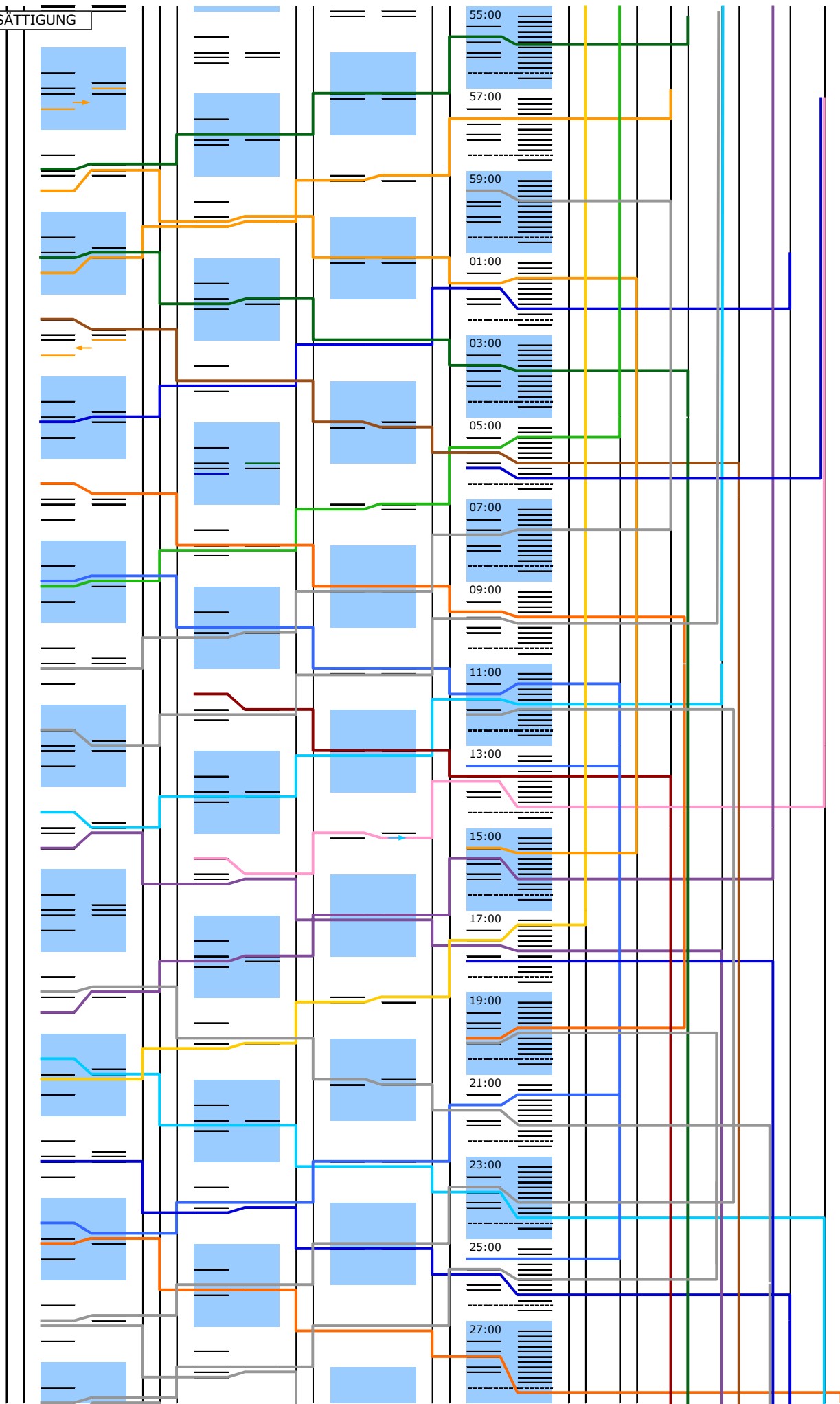
Betriebsprogramm 'Stabilität'

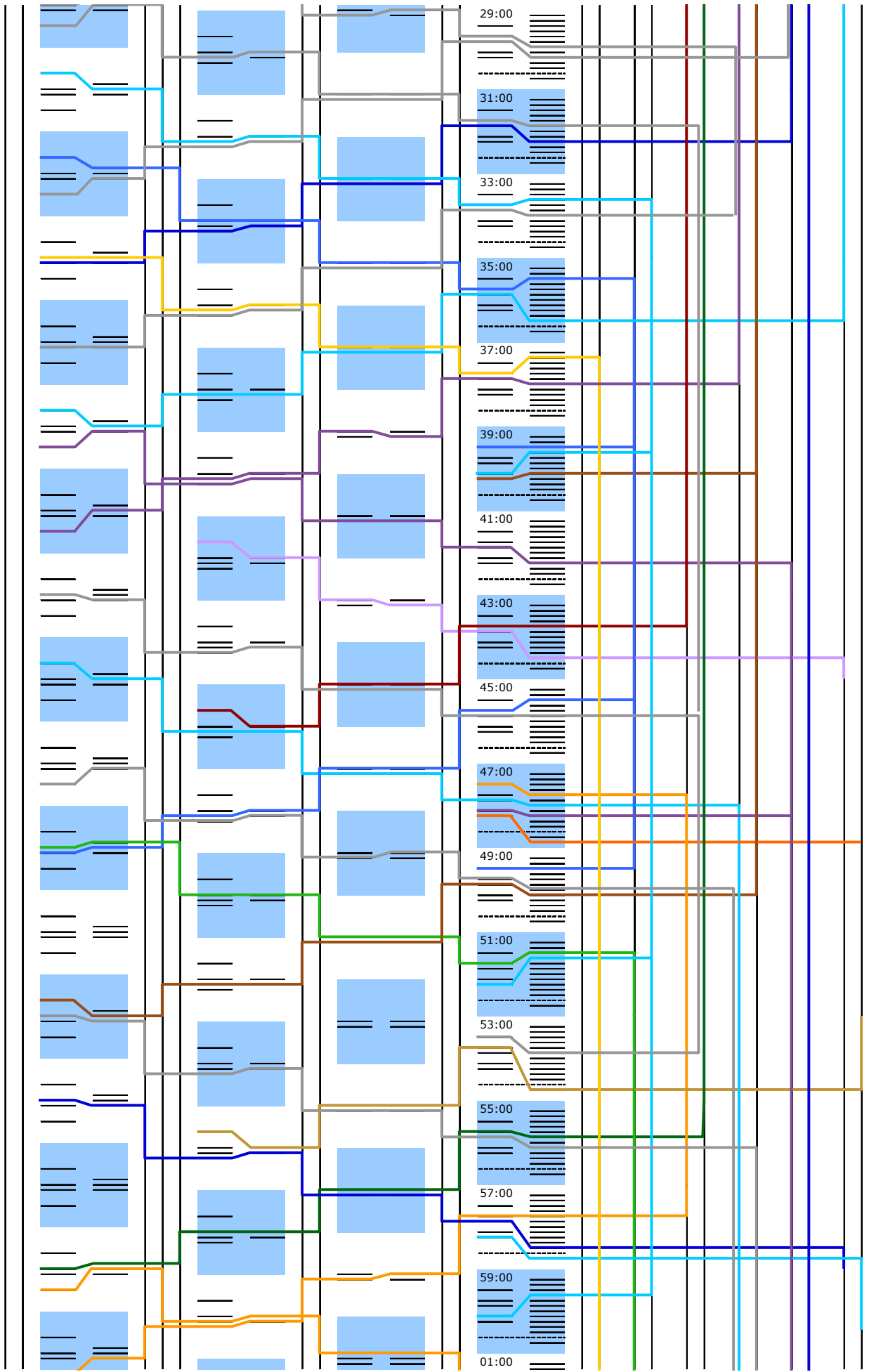
FAHRPLAN HEUTE



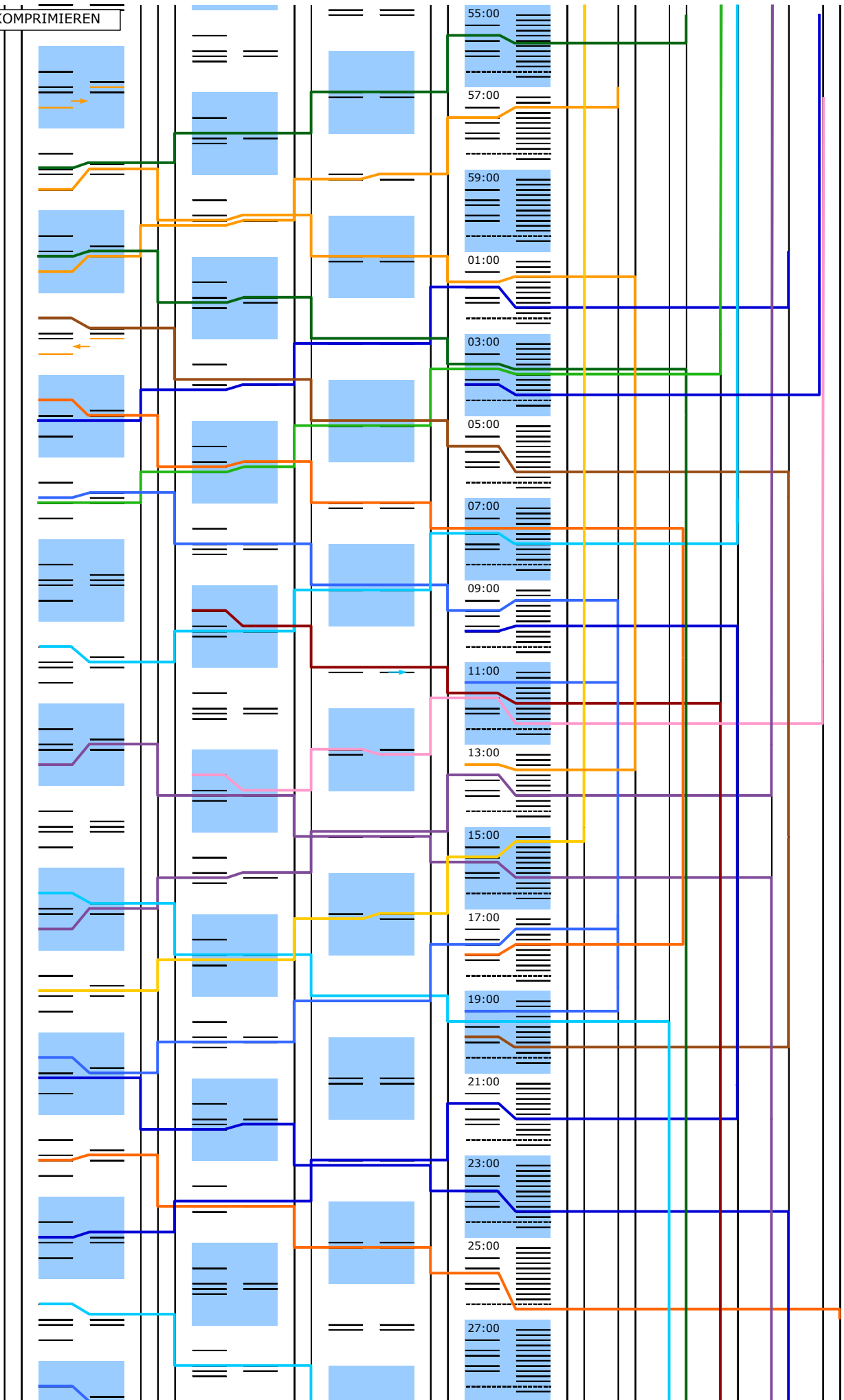


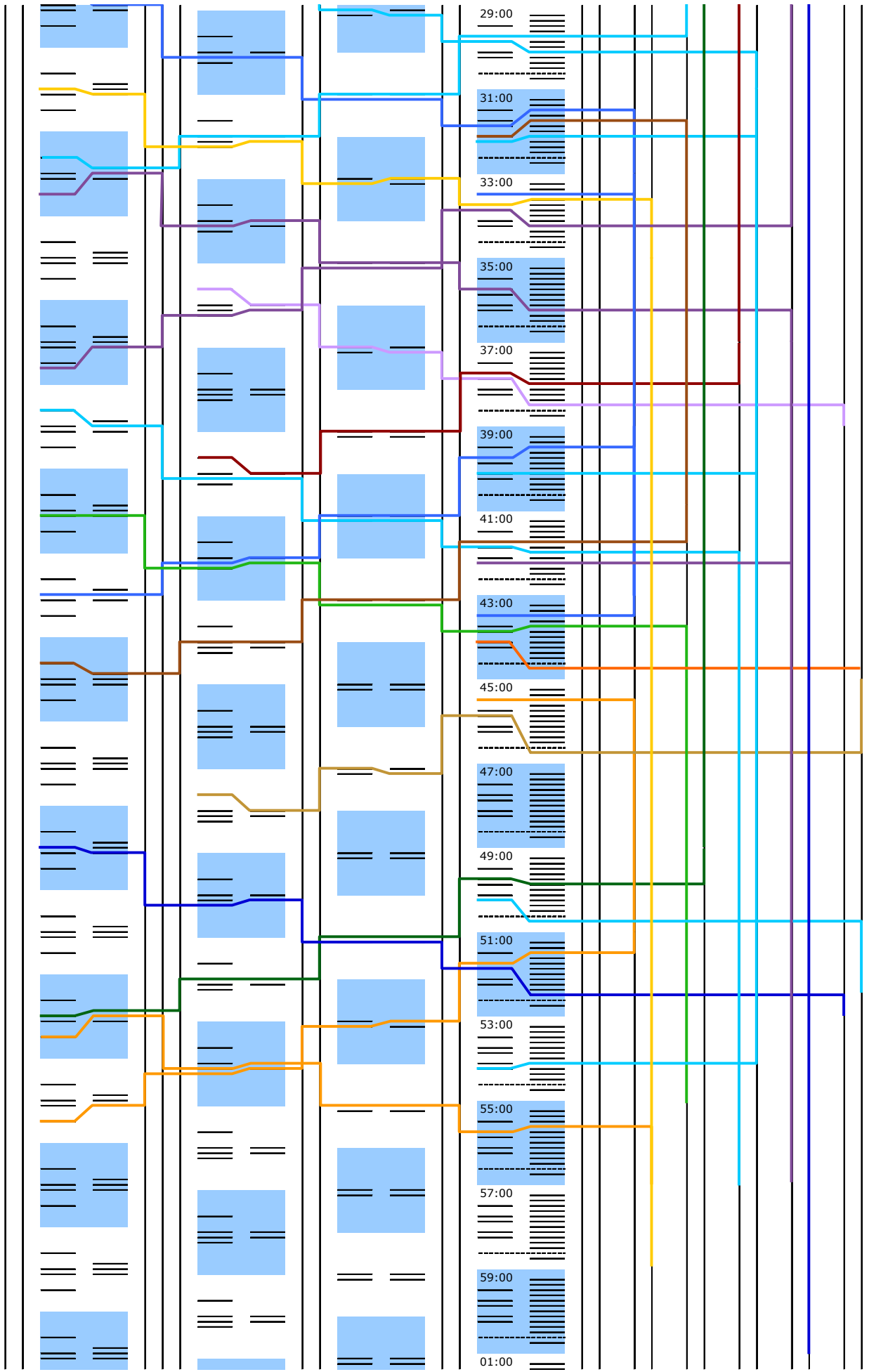
SÄTTIGUNG



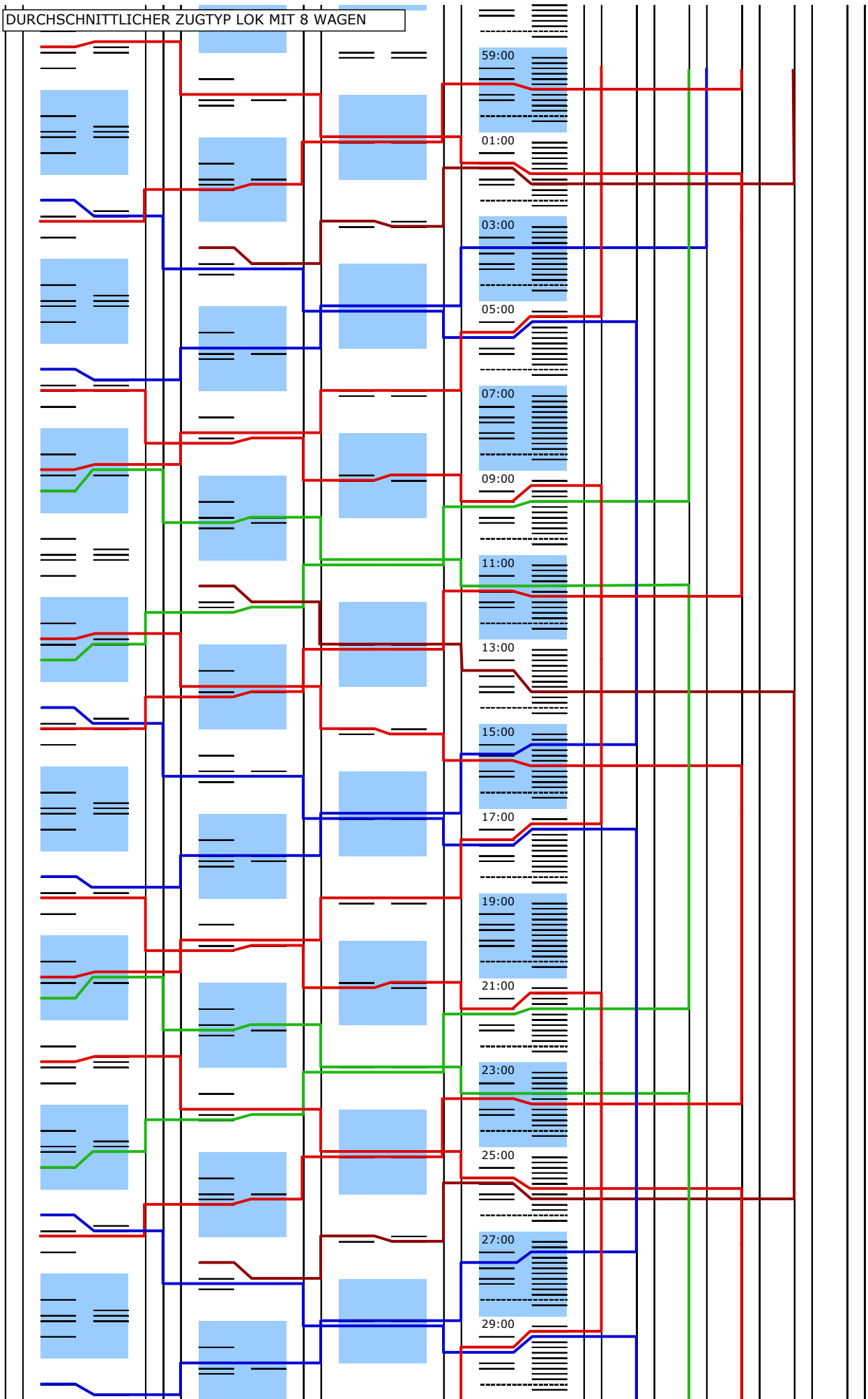


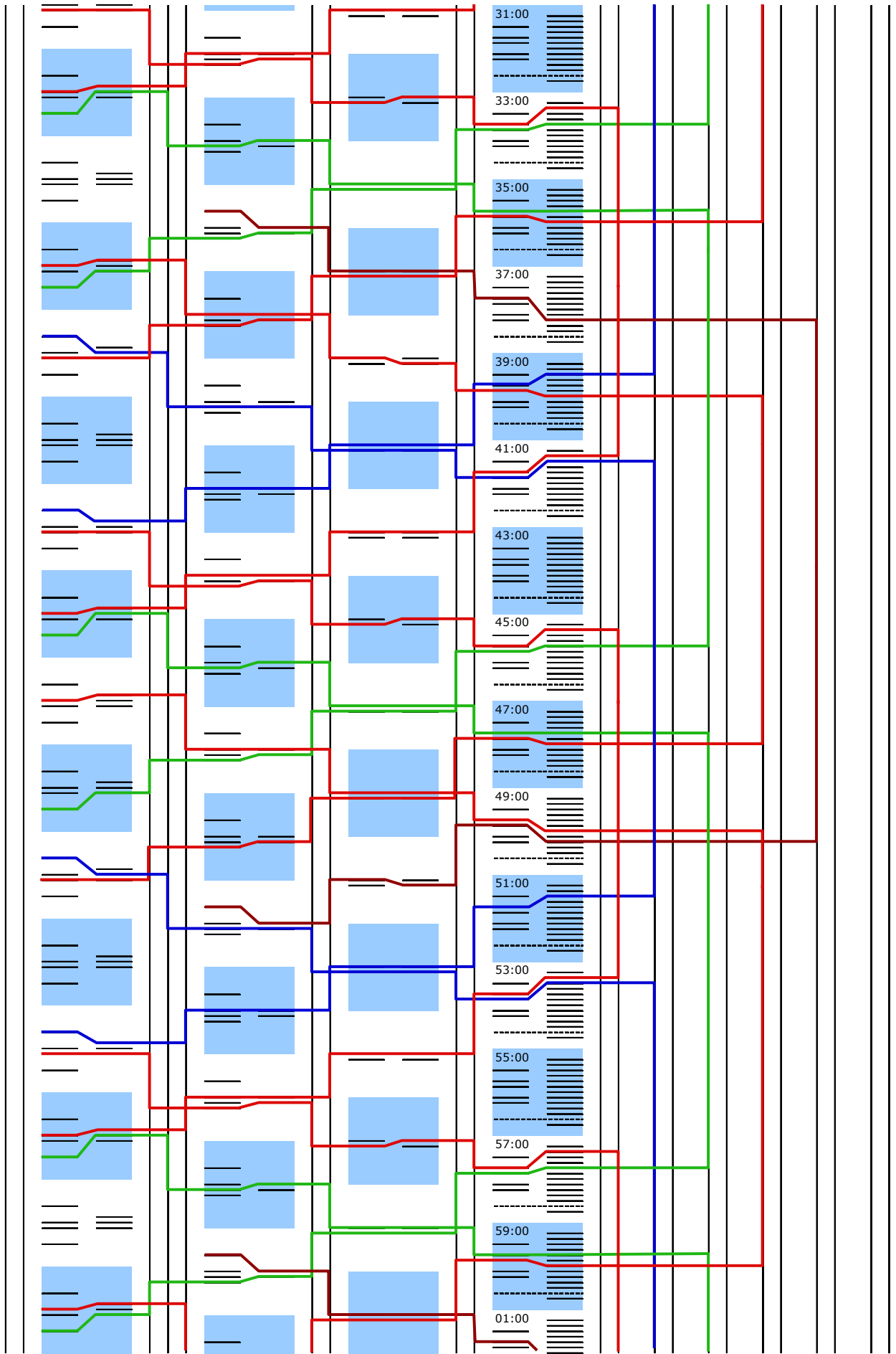
KOMPRIMIEREN



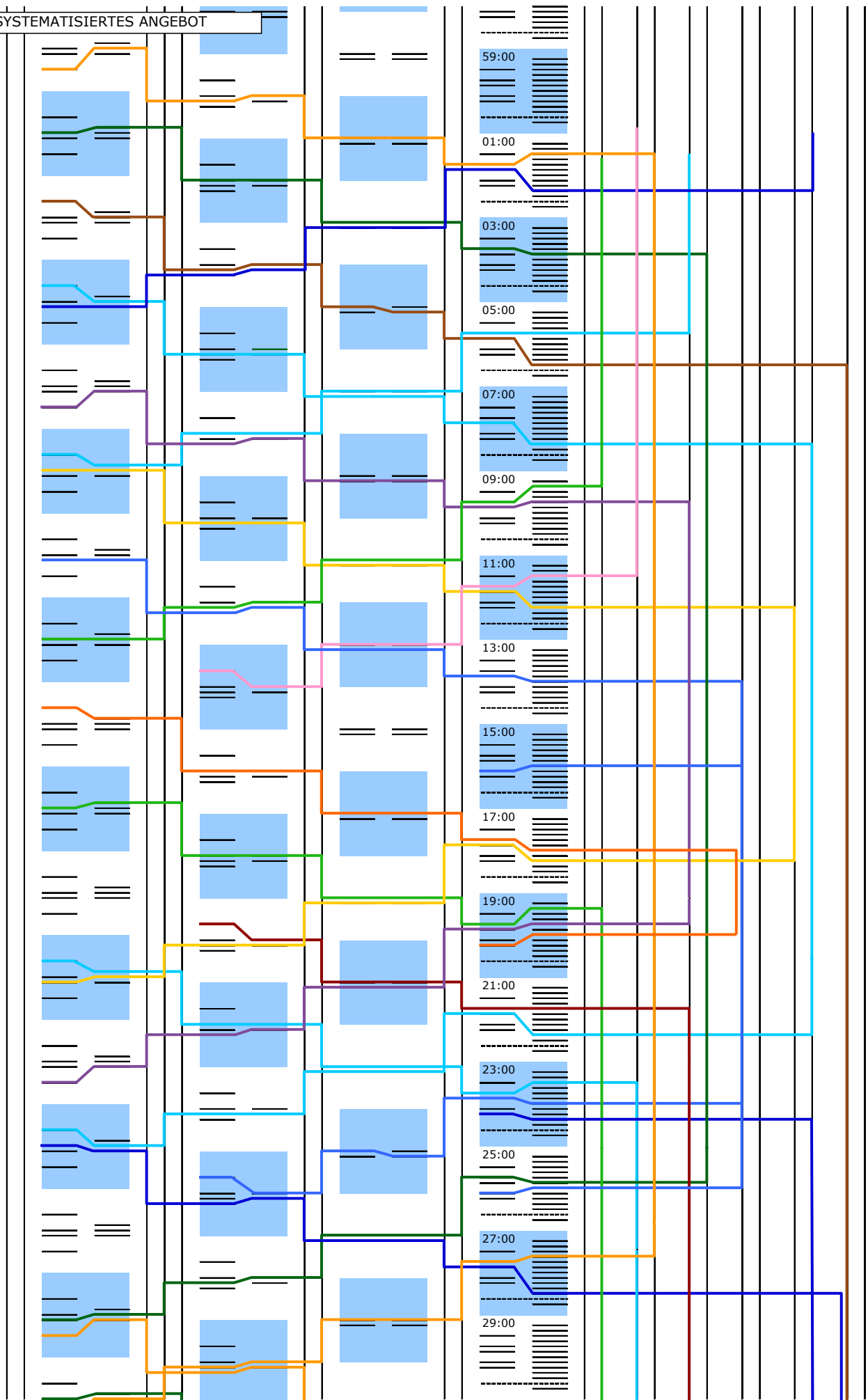


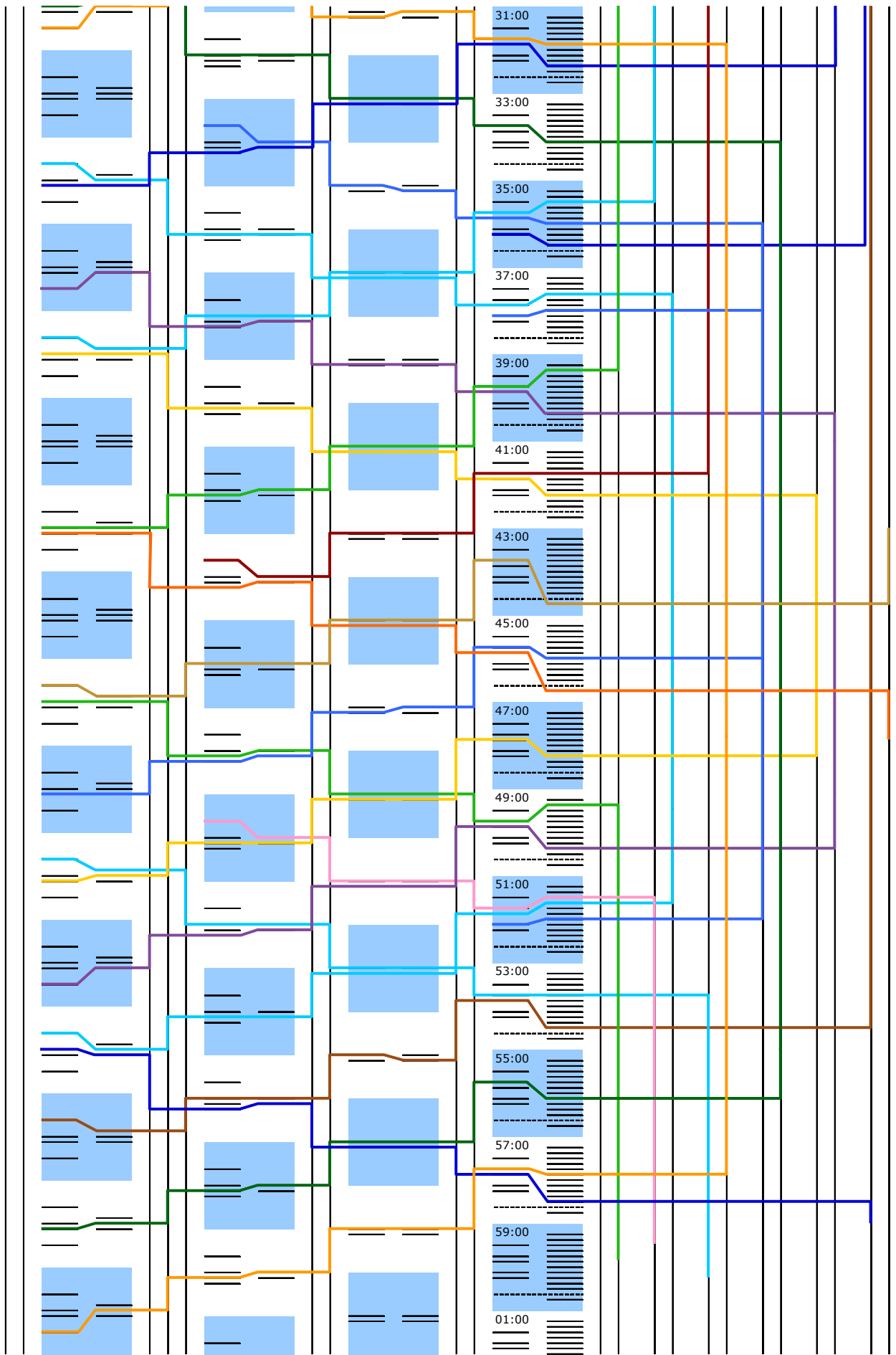
DURCHSCHNITTLICHER ZUGTYP LOK MIT 8 WAGEN



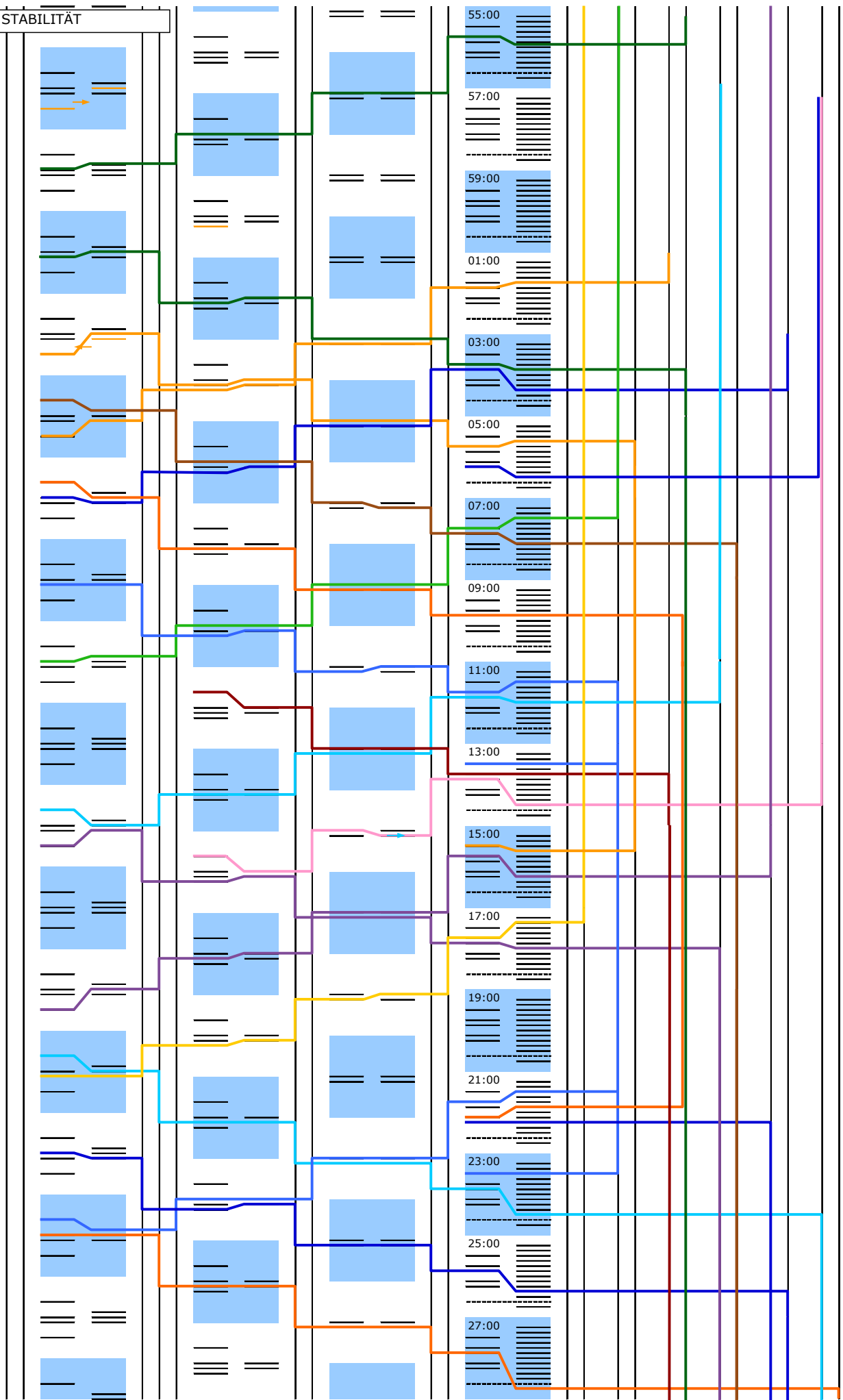


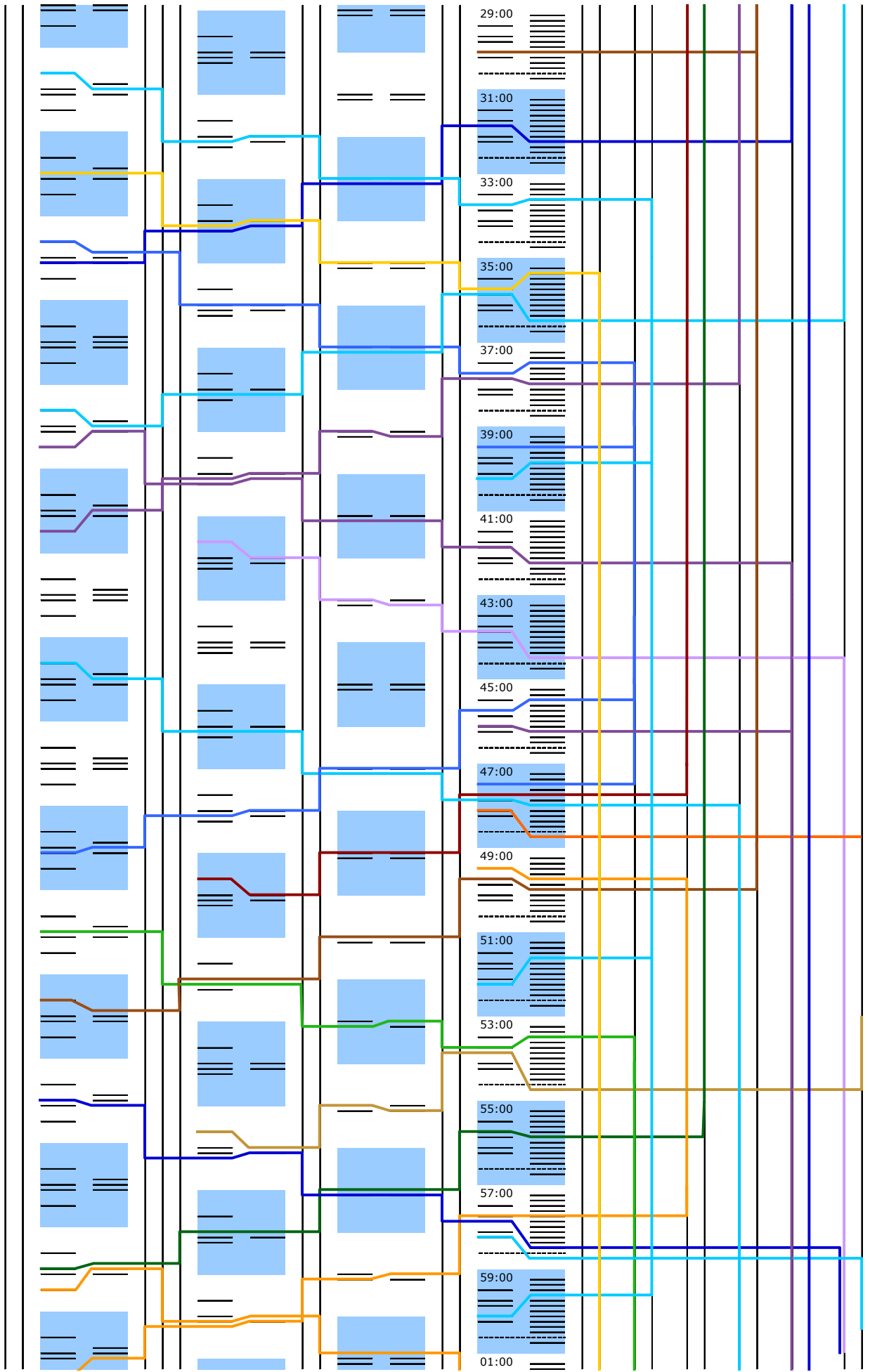
SYSTEMATISIERTES ANGEBOT





STABILITÄT





A 3 Gleisschema Luzern

Verdichtungsbereich

