



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht, Anhang 2 26. November 2009

Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement

Simulationen

Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung:

Simulationen

Informationen zu diesem Dokument

Das vorliegende Dokument ist Teil des Schlussberichts zu der von *emkamatik* GmbH und weiteren Beteiligten erstellten BFE-Studie „Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement“ [1]. Es zeigt den Einfluss der optimierten Betriebsführung auf Energie- und Zeitverbrauch anhand von verschiedenen Simulationen.

1 Einführung

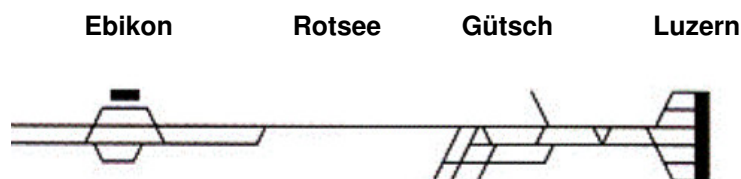
Basierend auf vorhandenen Daten und den Konzeptüberlegungen in [2] wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, um den Einfluss einer optimierten Betriebsführung auf den Energieverbrauch abzuschätzen. Neben dem Energieverbrauch wurde immer auch der Zeiteinfluss betrachtet. Beide Faktoren müssen wie in [2] dargestellt durch die Wahl einer entsprechenden Zielfunktion berücksichtigt und gewichtet werden. Die beiden Faktoren widersprechen sich im Sinn der optimierten Betriebsführung nicht, ist doch ein Zug ohne Beeinflussung auch energetisch günstiger als ein beeinflusster Zug. Für die Simulationen müssen aber die Trivillösungen für ein reines Energieoptimum (z.B. „Alle Züge fahren gar nicht“ ist immer energieoptimal) ausgeschieden werden.

In einem ersten Schritt werden zwei Einzelprobleme im Perimeter Luzern etwas genauer analysiert, und anschliessend anhand ausgewählter Beispiele in der Netzwerksimulation für das reduzierte Modellnetz Luzern die Zusammenhänge in einem komplexeren System dargestellt.

2 Konflikt am Rotsee

2.1 Situation

Am Rotsee, zwischen Ebikon und Gütsch auf der Strecke Rotkreuz – Luzern, befindet sich ein Einspurabschnitt, der auf dem folgenden, stark vereinfachten Gleisplan dargestellt ist:







Zugskreuzungen finden dabei planmässig auf Seite Ebikon kurz vor dem Einspurabschnitt statt. Das führt dazu, dass Züge in Richtung Luzern bei Verspätung des Gegenzuges vor dem Einspurabschnitt ihre Fahrt verringern oder gar anhalten müssen.

2.2 Simulationen

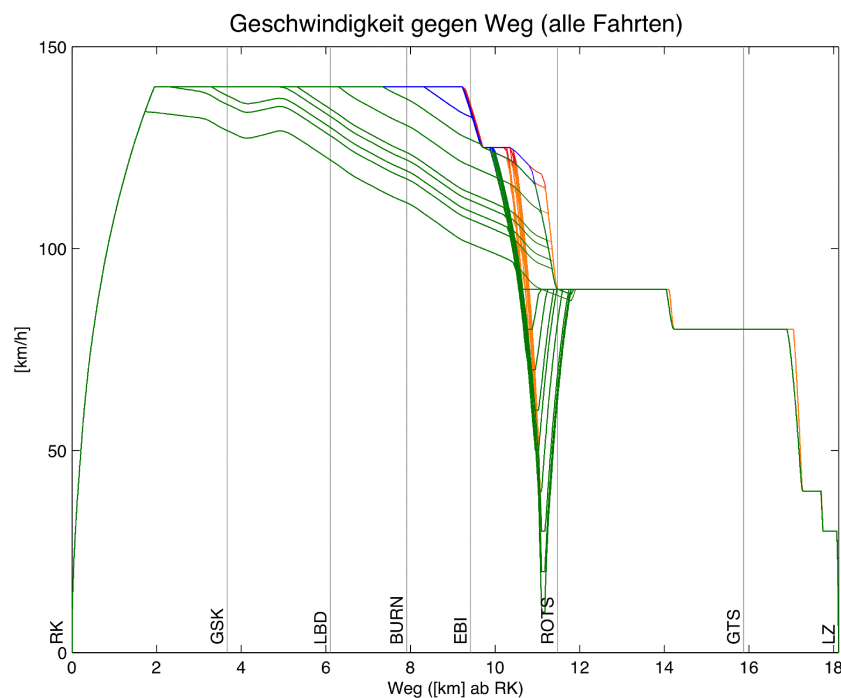
In der Simulation wurde nun untersucht, welchen Einfluss auf Fahrzeit und Energie die folgenden Parameter haben:

- Rechtzeitige Orientierung über die Zuglage von Seiten der Betriebsführung/Infrastruktur („Mit BF“ / „Ohne BF“)
- Bremsbedienung durch den Lokomotivführer („Mit pneum. Bremse“ / „Ohne pneum. Bremse“)

	„Ohne BF“	„Mit BF“
Mit pneum. Bremse		
Ohne pneum. Bremse		

Für die Simulationen wurde ein IC2000 bestehend aus einer Re 460 und 9 Wagen verwendet. Total wurden 200 verschiedene Parameterkombinationen simuliert, wobei für alle der vier oben gezeigten Fälle der Auflösungszeitpunkt des Konflikts (also die Durchfahrtszeit des Gegenzuges) variiert wurde.

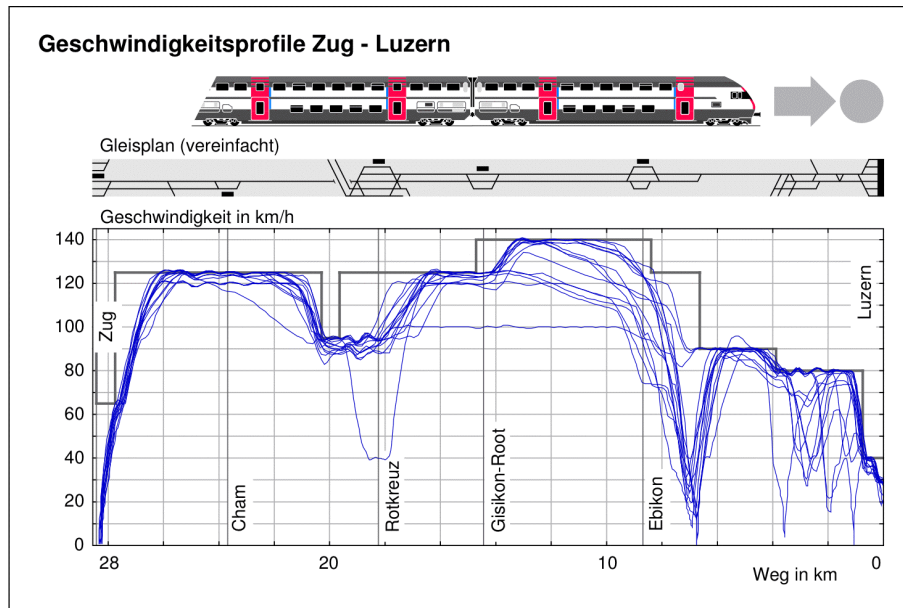
Damit ergeben sich die folgenden Verläufe der Geschwindigkeit gegen den Weg (die Farben entsprechen den vier Quadranten in der Tabelle oben):



2.3 Vergleich mit früheren Messungen

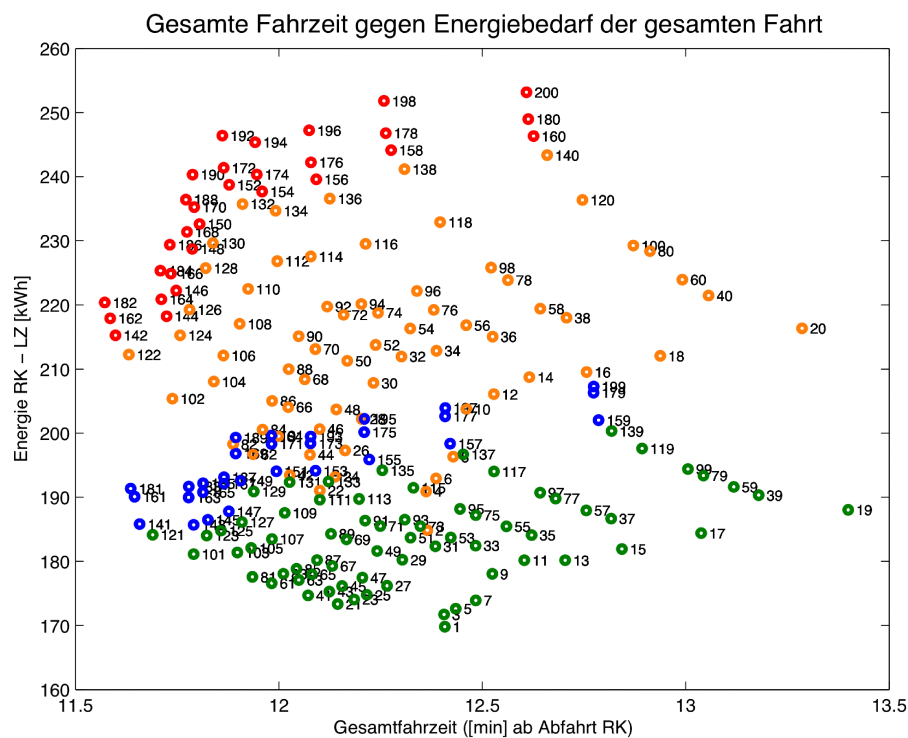
Die simulierten Fahrweisen können mit bereits früher publizierten Messungen [3] aus dem Winter des Jahres 2000 beigezogen verglichen werden. Es zeigt sich, dass die Trajektorien aus den Messungen und diejenigen der Simulationen durchaus vergleichbar sind, die Simulationen also die Realität abzubilden vermag.

Zu beachten ist, dass zum Zeitpunkt der Messungen zwischen Rotkreuz und Gisikon-Root die Maximalgeschwindigkeit noch auf 125 km/h begrenzt war, während heute (und in den Simulationen) 140 km/h erlaubt sind.



2.4 Energieverbrauch

Für alle simulierten Fahrweisen kann nun sowohl die Gesamtfahrzeit Rotkreuz – Luzern als auch der Energieverbrauch simuliert und dargestellt werden. Die Nummern sind die Identifikationsnummern der einzelnen Simulationen.

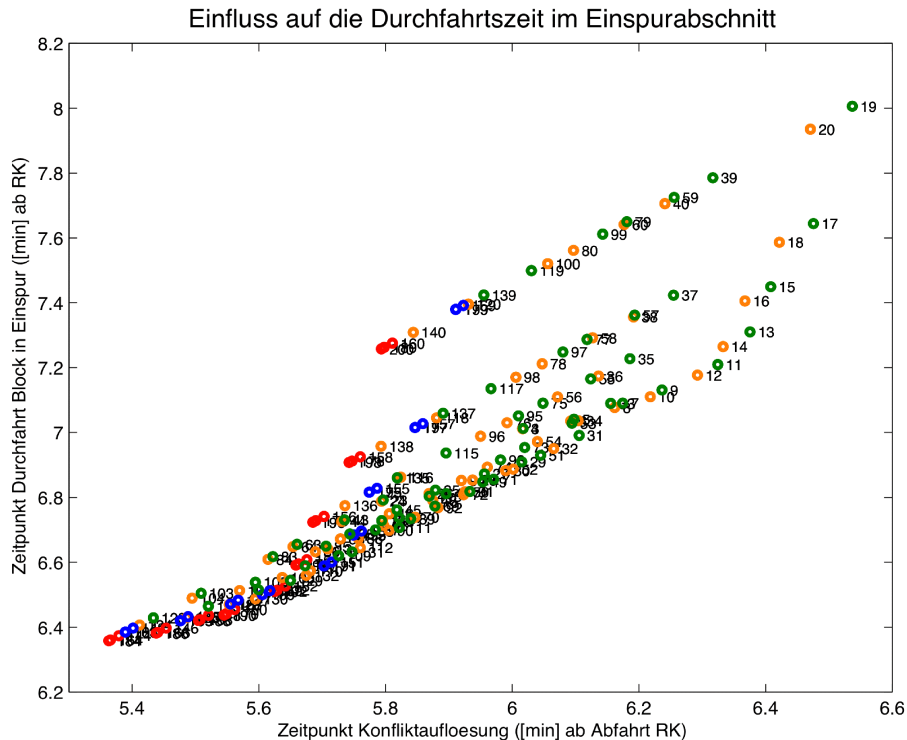


Es zeigen sich deutliche Häufungen von jeweils gleichfarbigen Punkten. Wie erwartet sind die roten Fälle („ohne Orientierung“ und gleichzeitig „mit pneumatischer Bremse“) aus Energiesicht am ungünstigsten. Die blauen Punkte zeigen, dass sich auch ohne Benutzung der pneumatischen Bremse vergleichbar tiefe Fahrzeiten erzielen lassen, bei deutlich tieferem Energieverbrauch. Ebenso kann durch Orientierung, ohne Änderung der Bremsbedienungen, ebenfalls ein tieferer Energieverbrauch erzielt werden.

Die tiefsten Verbrauchswerte werden allerdings bei Vororientierung durch die Betriebsführung und gleichzeitig richtiger Bremsbedienungen erzielt (grüne Punkte).

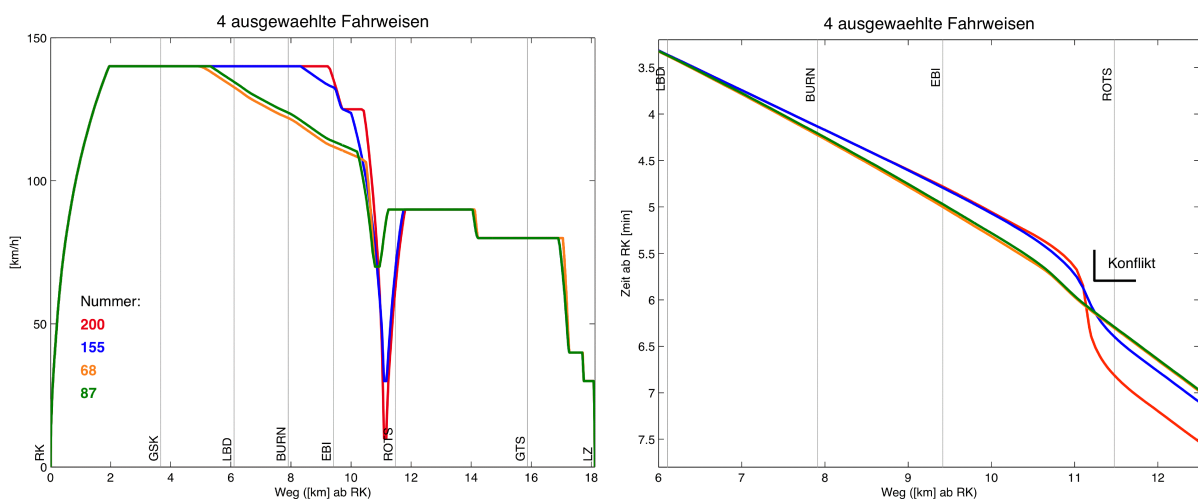
2.5 Zeitverlust am Konfliktpunkt

Neben der Gesamtfahrzeit Rotkreuz – Luzern ist für einen optimalen Betrieb auch die Ausnutzung des kritischen Netzteils, hier also des Einspurabschnitts, von Bedeutung. Das Diagramm zeigt für alle simulierten Fälle den Zeitpunkt der Durchfahrt beim ersten Blocksignal innerhalb des Einspurabschnitts am Rotsee (12.2 km ab Rotkreuz). An diesem Ort haben alle simulierten Fahrten wieder die Streckengeschwindigkeit erreicht.



2.6 Ausgewählte Einzelbeispiele

Für jeden der vier Fälle wurde ein Beispiel ausgewählt. Alle vier Beispiele haben denselben Zeitpunkt der Konfliktauflösung (Signal wechselt auf grün):



Es zeigt sich klar, dass eine Orientierung durch die Betriebsführung grundlegend mithilft, den Zeitverlust und auch den Energieverbrauch zu minimieren. Die beiden Varianten mit Orientierung sind dabei zeitlich identisch, unabhängig vom Einsatz der Bremse. Hingegen kann durch das Vermeiden der pneumatischen

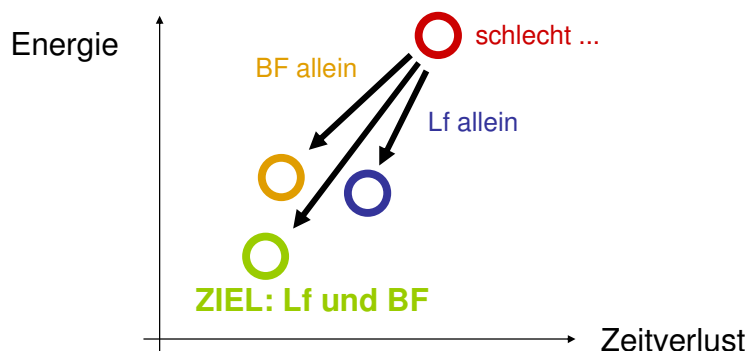
Bremse zusätzlich auch noch Energie eingespart werden. Ist auf dem Zug keine Information aus der Betriebsführung vorhanden, so ist die Fahrweise ohne Einsatz der pneumatischen Bremse sogar wesentlich besser für die Kapazität der Einspurstrecke.

Orientierung durch BF	Ohne	Ohne	Mit	Mit
Pneumatische Bremse	Mit	Ohne	Mit	Ohne
Fall-Nr.	200	155	68	87
Relativer Zeitverlust nach Konflikt	33 sec	8 sec	0 sec	0 sec
Energie gesamt	253 kWh	196 kWh	208 kWh	180 kWh

Die numerischen Werte sind in der Tabelle oben dargestellt. Für andere Fälle sind die prinzipiellen Verhältnisse untereinander gleich, die numerischen Daten sind etwas abweichend.

2.7 Folgerungen

Es braucht die Orientierung durch die Betriebsführung und die Schulung der Lokführer zu gleichen Teilen, um ein Optimum in Bezug auf Zeit und Energie zu erhalten. Das Prinzip lässt sich wie folgt darstellen:



3 Einfädeln der S1 am Gütsch

3.1 Situation

Im Bereich Fluhmühle / Gütsch vor der Einfahrt in den Bahnhof Luzern vereinigen sich vier Linien mit total fünf Streckengleisen auf 2 Gleise, welche die einzige Normalspur-Zufahrt zum Bahnhof Luzern bilden.

Die Züge im Zulauf zum Bahnhof Luzern müssen deshalb für einen möglichst reibungslosen Betrieb in diesem Bereich zwischen anderen ein- und ausfahrenden Zügen so optimal wie möglich „eingefädelt“ werden. Dies ist aber nicht in allen Fällen möglich, so dass immer wieder Züge von Warnung oder Halt zeigenden Signalen beeinflusst werden.

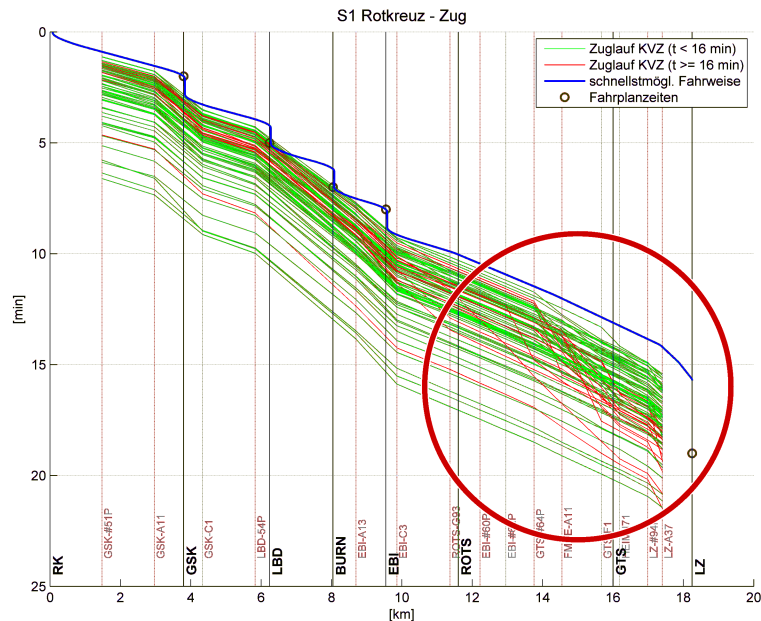
Am Beispiel der S1 von Zug nach Luzern soll der Einfluss der Signalstellungen an verschiedenen Orten und der Zeitpunkt des Nachschaltens auf den Energieverbrauch und die Fahrzeit der Züge analysiert werden.

3.2 Auswertung von KVZ-Daten

Die Grafik zeigt die Ist-Situation beispielhaft anhand von KVZ-Daten („Kennzahlen Verkehrszeiten Züge“), die auf Infrastrukturseite aufgezeichnet wurden. KVZ-Daten enthalten die Durchfahrtszeiten für jede Zugnummer an bestimmten Signalstandorten. Mit diesen Informationen lässt sich für einen bestimmten Zug eine grobe Weg-Zeit-Darstellung erstellen.

Die verwendeten Daten wurden vom 7. bis 11. Mai 2007 aufgezeichnet. Dargestellt sind alle Züge der S1 mit Abfahrtszeit in Rotkreuz zur Minute xx.49. (Die S1 mit Abfahrt in Rotkreuz um xx.16 fuhr im Fahrplan 2006 / 2007 nur bis Ebikon).

Die grünen Linien stellen Züge dar, die die Strecke Rotkreuz (Signalstandort „GSK-#51P“) bis Luzern (Signalstandort „LZ-A37“) in weniger als 16 Minuten zurückgelegt haben. Rote Linien zeigen solche, die 16 Minuten oder mehr benötigt haben. Diese sind mit einer grossen Wahrscheinlichkeit durch Signale beeinflusst worden. Es zeigt sich, dass der Ort der Beeinflussung unterschiedlich ist und kein einheitliches Muster erkennbar ist.



3.3 Simulationen

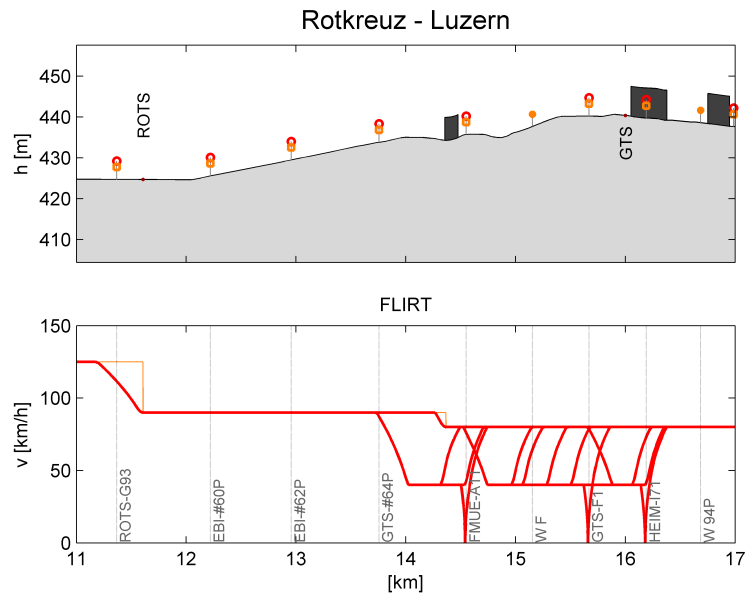
Für die Simulationen der S1 wurde eine einheitliche Fahrweise des Lokführers angenommen:

- Nur elektrische Bremsung
- Geschwindigkeitsreduktion auf 40 km/h bei Warnung zeigendem Signal mit halber Bremskraft (100 kN)
- Anhaltebremsung aus 40 km/h mit voller Bremskraft
- Beschleunigung auf die zulässige Streckengeschwindigkeit mit maximaler Zugkraft beim Nachschalten des Signals

Insgesamt wurden 13 verschiedene Fahrtrajektorien mit unterschiedlichem Ablauf simuliert. Diese unterteilen sich wie folgt:

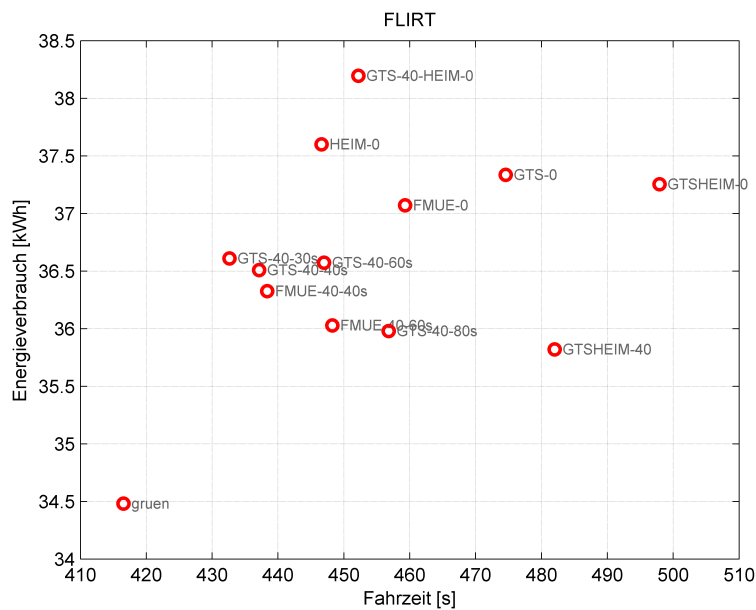
- Referenzfahrt: Durchfahrt ohne Beeinflussung
- 7 Fahrten mit Beeinflussung durch „Warnung“ zeigendes Vorsignal mit Geschwindigkeitsreduktion auf 40 km/h und Nachschalten des Hauptsignals (Code ...-40-...). Bei diesen Fahrten wurden zudem teilweise unterschiedliche Zeiten für das Nachschalten des Hauptsignals simuliert. (Code ...-40-nns, nn = Sekunden)
- 5 Fahrten mit Beeinflussung durch „Warnung“ zeigendes Vorsignal mit Geschwindigkeitsreduktion auf 40 km/h und anschliessendem Halt vor dem Hauptsignal (Code ...-0).

Bei den Fahrweisen, bei denen der Zug vor einem „Halt“ zeigenden Signal zum Stehen kommt, wurde angenommen, dass das Signal auf grün wechselt, sobald der Zug angehalten hat (Nur Zeitverzögerung durch Abbrems- und Beschleunigungsvorgang, keine zusätzliche Wartezeit vor dem Signal).



3.4 Energieverbrauch

Die Grafik zeigt Energieverbrauch und Fahrzeit für die 13 verschiedenen Fahrtrajektorien.



Prozentual liegen die Unterschiede des Energieverbrauchs bei rund 10 %, in absoluten Zahlen allerdings nur im Bereich von einigen wenigen kWh.

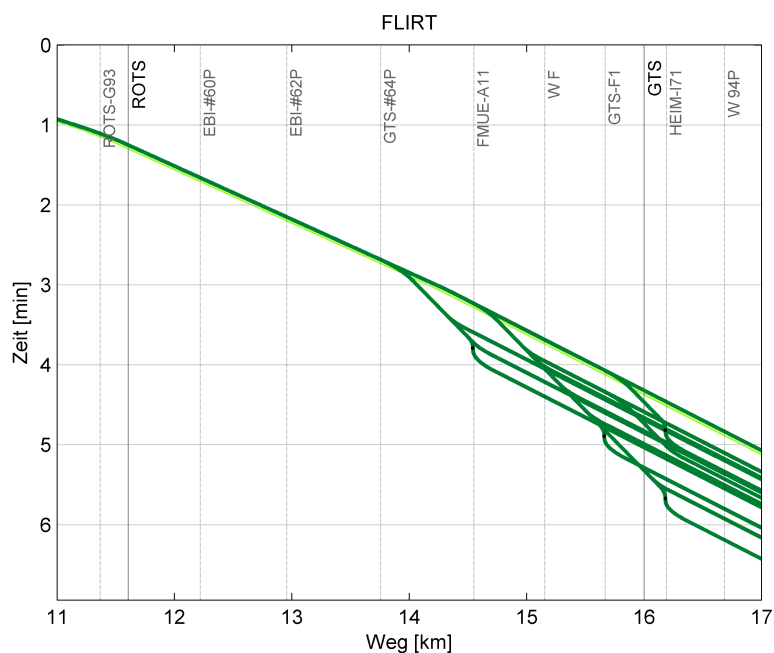
Innerhalb der Gruppen „Warnung und Nachschalten“ und „Halt“ ist dabei der Energieverbrauch nahezu konstant, unabhängig davon, wo und für wie lange mit reduzierter Geschwindigkeit gefahren wurde. Entscheidend für den Energieverbrauch sind also die Art der Beeinflussung und die daraus resultierende Anzahl Bremsungen und die entsprechenden Zielgeschwindigkeiten.

Für einen Vergleich sind auch die absoluten Zahlen interessant. Der Gesamtverbrauch des FLIRT für die Fahrt Ebikon – Luzern ist kleiner als der Unterschied der verschiedenen Fahrweisen des IC 2000 im vorhergehenden Kapitel!

Fall	Ebi - Lz [mm:ss]	Energie [kWh]	64P - FMUE-A [s]	FMUE-A - GTS-F [s]	GTS-F - HEIM-I [s]
gruen	06:56	34.5	33	50	23
FMUE-40-40s	07:18	36.3	54	50	23
FMUE-40-60s	07:28	36	62	52	23
FMUE-0	07:39	37.1	71	54	23
GTS-0	07:54	37.3	33	103	27
GTS-40-30s	07:12	36.6	33	66	23
GTS-40-40s	07:17	36.5	33	70	23
GTS-40-60s	07:26	36.6	33	80	23
GTS-40-80s	07:36	36	33	90	23
GTSHEIM-0	08:17	37.3	33	95	55
GTSHEIM-40	08:01	35.8	33	95	43
HEIM-0	07:26	37.6	33	50	49
GTS-40-HEIM-0	07:32	38.2	33	66	40

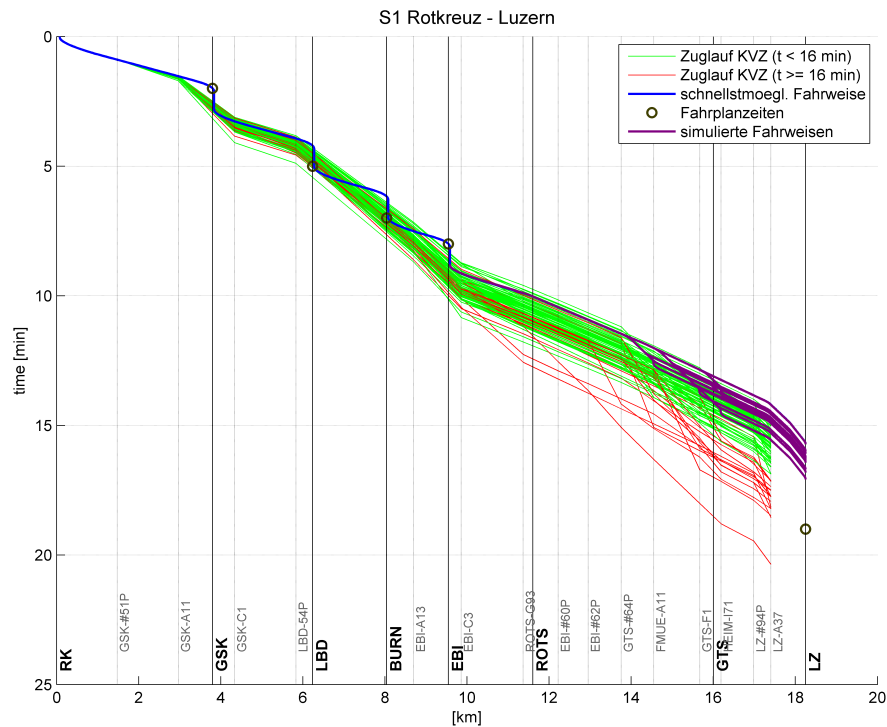
rot = Zug kommt vor dem Signal zum stehen

Die nachfolgende Grafik zeigt das Weg-Zeit Diagramm der simulierten Fahrweisen:



Zum Vergleich mit den realen Fahrweisen aus den KVZ-Daten wurden diese Fahrweisen im folgenden Plot über die entsprechenden KVZ-Trajektorien gelegt. Die KVZ-Daten wurden dafür „offsetkompensiert“, d.h. alle Verspätungen bei der Abfahrt Rotkreuz wurden auf null gesetzt, so wie wenn alle Züge zur exakt gleichen Zeit abfahren würden. Zu beachten ist, dass die KVZ-Daten ortsdiskret sind, also nur Stützpunkte an den jeweiligen Signalstandorten (hellgraue vertikale Linien) haben.

Es zeigt sich, dass die Verzögerungen der simulierten Fahrweisen im Bereich Gütsch in Realität oft weit übertroffen werden. Das bedeutet, dass diejenigen Züge mit Beeinflussungen in den meisten Fällen zum stehen kommen, und dann auch noch einige Zeit warten müssen (oder nahezu zum stehen kommen und mit sehr kleinen Geschwindigkeiten auf das Signal zuschleichen, was aber aus Energiesicht auf dasselbe hinausläuft).

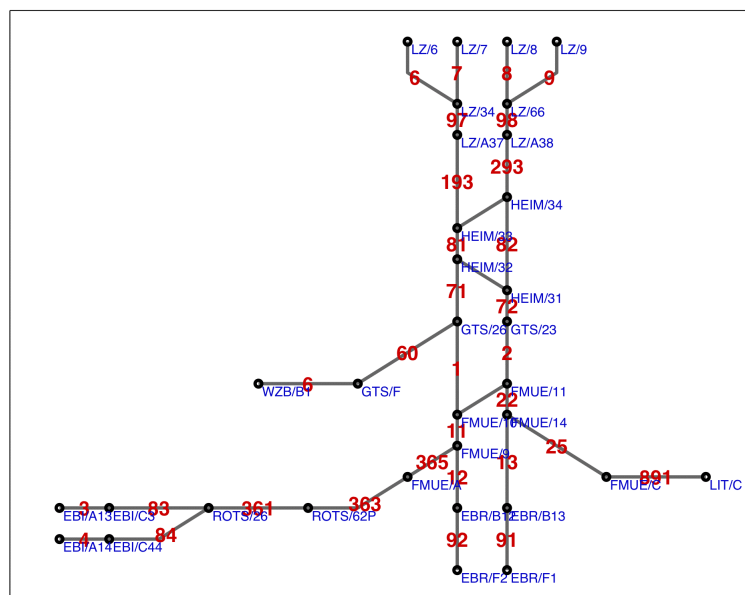


4 Netzwerksimulation „Luzern reduziert“

4.1 Situation

Zur Untersuchung von Betriebsfällen mit gegenseitiger Beeinflussung von Zügen wurde das „reduzierte Modellnetz Luzern“ definiert. Darin können die gegenseitigen Beeinflussungen sowie deren Auswirkung auf Fahrzeit und Energie simuliert werden. Konzept und Methodik dazu werden in [2] beschrieben.

Die Figur zeigt das Netz, das in der Grundstruktur und von der Ausdehnung her dem Knoten Luzern mit den angrenzenden Zufahrtsstrecken entspricht, in der Komplexität aber reduziert ist.



4.2 Gleichzeitige Einfahrt mit Konflikt

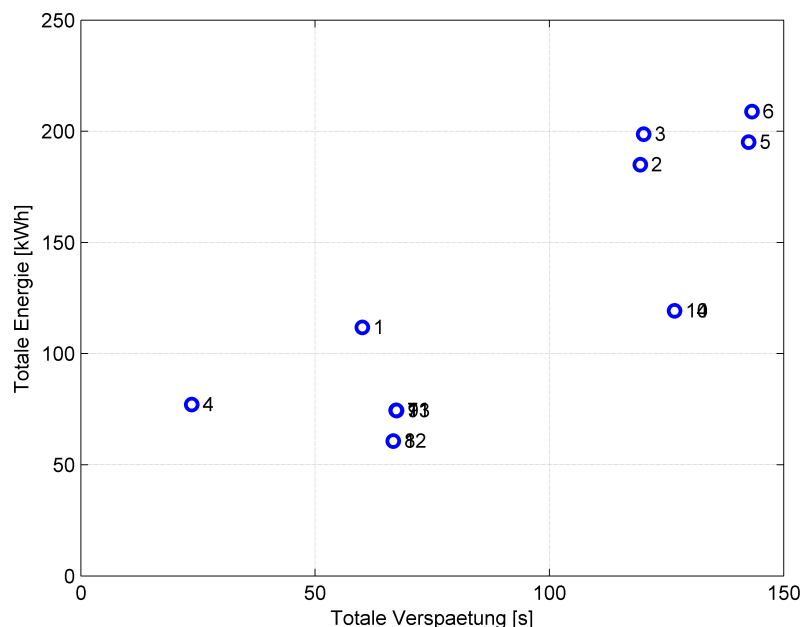
In einem ersten Beispiel soll mit zwei Zügen die grundlegende Funktionsweise der Simulation gezeigt werden. Es werden zwei Züge angenommen, die gleichzeitig auf Luzern zufahren:

- Ein Regionalzug (R 21627), bestehend aus einem 4-teiligen NPZ, kommt von Littau (LIT/C) her und soll in Luzern ins Gleis 7 einfahren.
- Ein Güterzug (G 65432), bestehend aus einer Re 6/6 und einer Anhängelast von 1620 t, kommt von Emmenbrücke (EBR/F2) und soll nach Luzern ins Gleis 9.

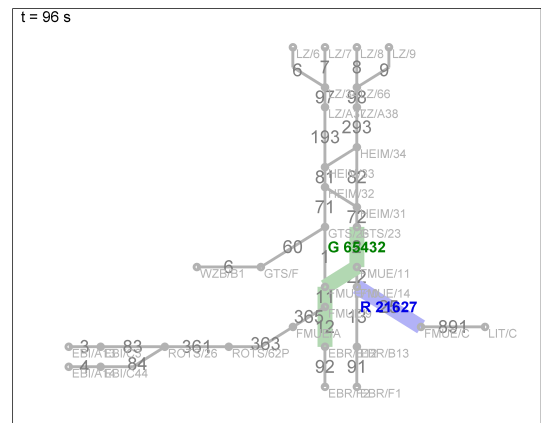
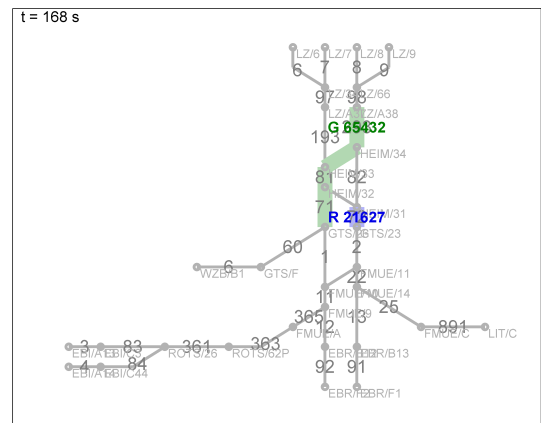
Die Fahrwege der beiden Züge überkreuzen sich, es besteht grundsätzlich ein Konflikt. Mit diesen Eingaben wird nun der Zuglauf-Prädiktor gestartet. Er findet insgesamt 14 verschiedene mögliche Lösungen (davon 10 wirklich unterschiedliche Varianten), und berechnet dazu den jeweiligen Zeit- und Energieverbrauch.

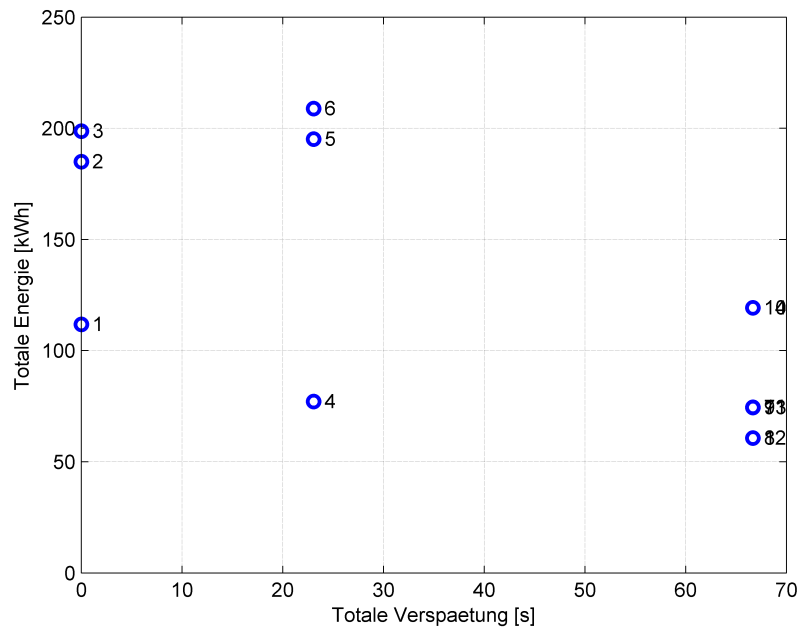
Comb	Verspätung [s]	Energie [kWh]
1	60	112
2	119	185
3	120	199
4	24 (opt)	77
5	142	195
6	143 (max)	209 (max)
7	67	74
8	67	61 (opt)
9	67	74
10	127	119
11	67	74
12	67	61
13	67	74
14	127	119

Die Verspätung ist die kumulierte Verspätung aller Züge zusammen, wobei hier beide Züge mit dem Faktor 1 gleich behandelt wurden. (opt) und (max) bezeichnen jeweils den optimalen resp. den schlechtesten Fall für Verspätung und Energie. Die Auswahl der Lösung fällt je nach Gewichtung von Zeit und Energie unterschiedlich aus.

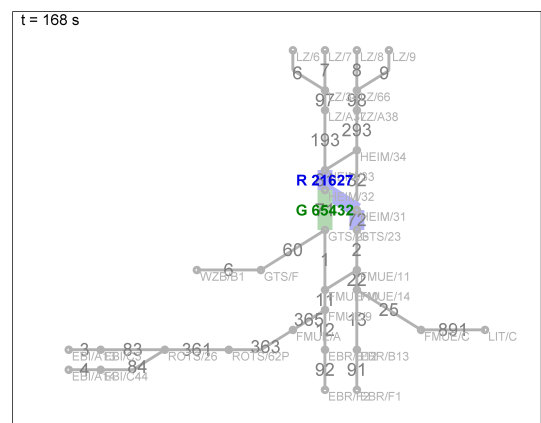
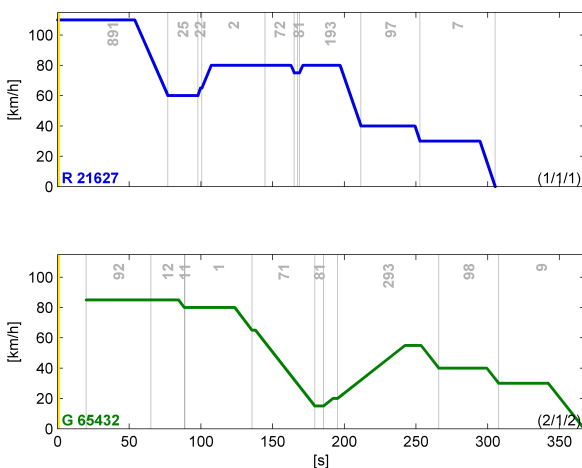


Bei der Lösung mit minimaler Gesamtverspätung (Nr. 4) wird der schwere Güterzug bevorzugt und wechselt das Gleis beim Spurwechsel Heimbach. Dieser Spurwechsel ist im angenommenen Testnetz absichtlich mit einer kleineren Geschwindigkeitslimite versehen (75 km/h), der Güterzug muss deshalb etwas abbremesen, dafür kann der Regionalzug bereits bis Gütsch vorrücken und ist damit schneller am Ziel:





Konkret bedeutet dies: Der Regionalzug wird nun bevorzugt, und der Güterzug muss entsprechend abbremsen.



4.3 Komplexe Situation mit sechs Zügen

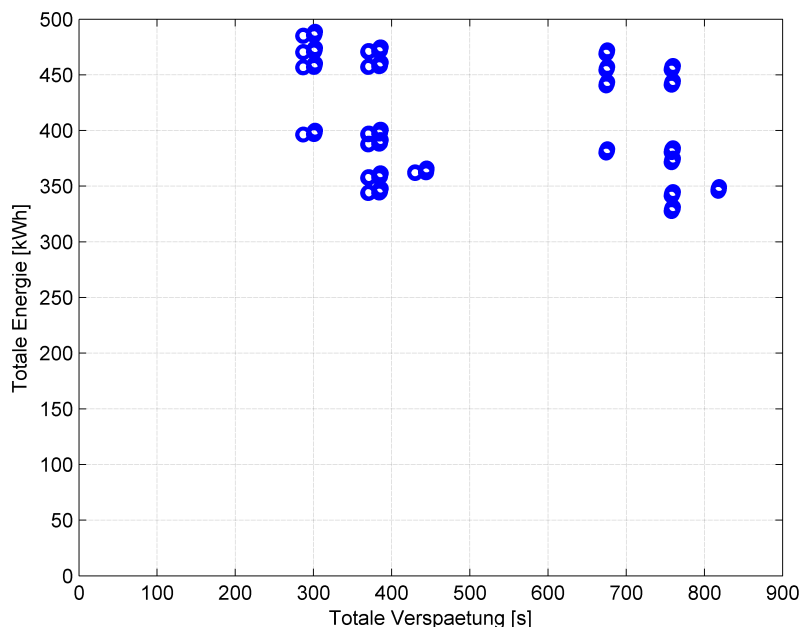
Nun wird eine komplexe Situation mit insgesamt sechs Zügen vorgegeben, die zudem zu unterschiedlichen Zeiten in den Netzwerkbereich einfahren:

- S21128 (FLIRT) von Luzern (LZ/6) nach Ebikon (EBI/A14), Abfahrt zur Minute 05:00
- S21125 (FLIRT) von Ebikon (EBI/A13) nach Luzern (LZ/8), Einfahrt in den Bereich zur Minute 06:00
- R 21627 (NPZ) von Littau (LIT/C) nach Luzern (LZ/6), Einfahrt in den Bereich zur Minute 06:30
- G 65432 (Re 6/6, 1620 t) von Emmenbrücke (EBR/F2) nach Luzern (LZ/9). (Verspätung wird nicht beachtet), Einfahrt in den Bereich zur Minute 09:30
- IR 2318 (IC2000) von Luzern (LZ/7) nach Ebikon (EBI/A14), Abfahrt zur Minute 13:00
- IR 2311 (IC2000) von Ebikon (EBI/A13) nach Luzern (LZ/7), Einfahrt in den Bereich zur Minute 15:00

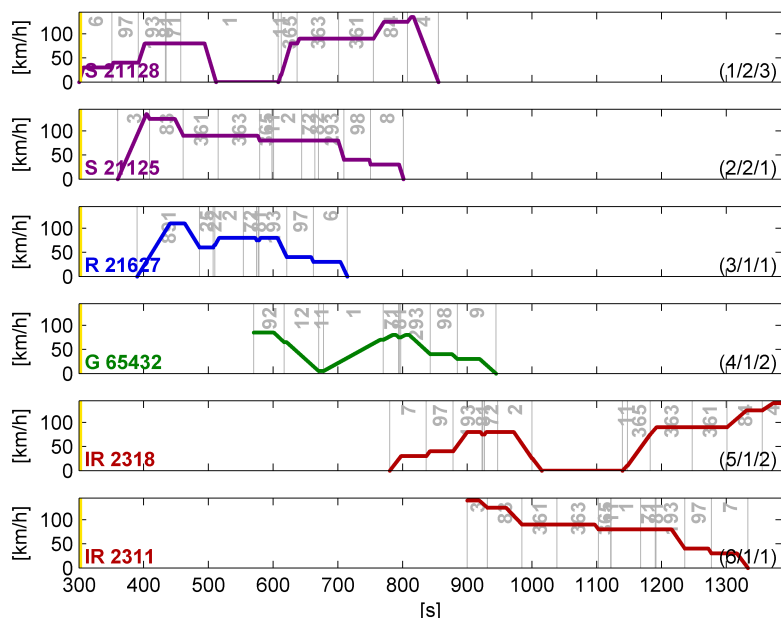
Die Netzwerksimulation findet für diese Problemstellung insgesamt 2072 Kombinationen mit 50 Varianten. Diese Kombinationen werden auf einem handelsüblichen Notebook-PC unter Matlab in rund 0.5 Sekunden berechnet:

Rechenzeit :	
- Zuglaufrechnung	: 0.20208 s
- Konfliktbehandlung	: 0.29811 s

Wie die Grafik zeigt, unterscheiden sich die 50 Varianten teilweise nur schwach. Interessant ist aber, dass zeitgleiche Varianten durchaus beträchtliche Unterschiede beim Energieverbrauch aufweisen können.



Werden für die Gesamtverspätung alle Züge gleich gewichtet (Güterzug nicht einberechnet) präsentiert sich die Lösung mit der minimalen Verspätung wie folgt:

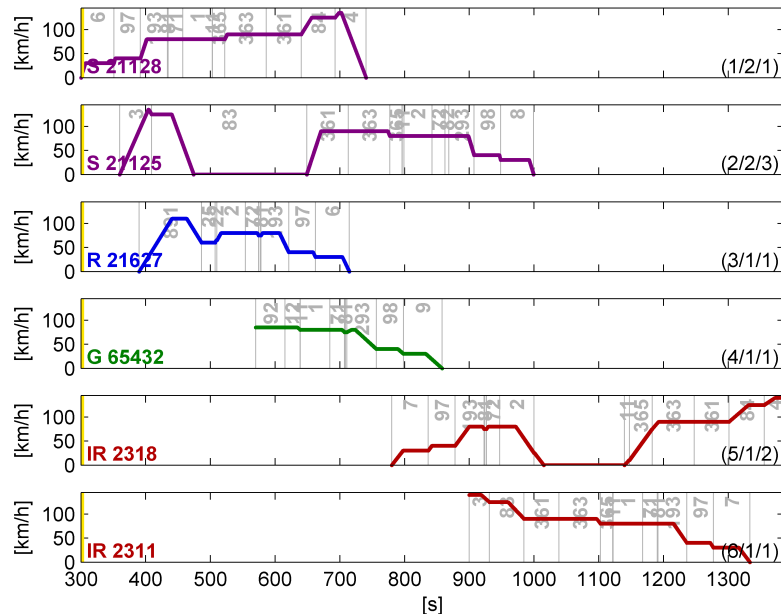


Die ausfahrende S-Bahn (S 21128) fährt auf dem rechten Gleis bis Flühmühle und wartet dort, bis die einfahrende S-Bahn (S 21125) den Einspurabschnitt von Ebikon her verlassen hat. Dabei steht sie aber dem von Emmenbrücke sich nähernden Güterzug im Weg, der deswegen abbremsten muss. Dies wird aber in Kauf genommen, da die Verspätungsminuten des Güterzuges durch die Gewichtung mit dem Faktor null explizit nicht in die Berechnung einbezogen werden. Der Regionalzug (R 21627) von Littau kann in der Zwi-

schenzeit unbehindert auf dem rechten Gleis an der ausfahrenden S-Bahn vorbei Richtung Luzern einfahren.

Bei den IR wird der ausfahrende IR 2318 in der Flühmühle angehalten, und der einfahrende IR 2311 erhält Priorität.

Wird nun beispielsweise die Verspätung der ausfahrenden S 21128 gegenüber den anderen Zügen doppelt gewichtet, so ergibt sich eine andere Lösung mit minimaler Gesamtverspätung:



Die ausfahrende S 21128 wird nun bevorzugt, sie befährt den Einspurabschnitt in Richtung Ebikon zuerst und die einfahrende S 21125 muss am Rotsee warten. Der Regionalzug (R 21627) von Littau kann auch in diesem Fall unbehindert auf dem rechten Gleis Richtung Luzern einfahren. Durch das bevorzugen der S 21128 ist nun auch für den Güterzug in der Flühmühle der Weg frei, und er kann unbeeinflusst einfahren. Dies ist ein Nebeneffekt. Da der Güterzug nicht in der Verspätungsberechnung einbezogen ist, hat er keine Priorität, aber da das Trasse durch den Abtausch der S-Bahnen frei ist, wird dieses auch genutzt.

Bei den beiden IR ergibt sich keine Änderung.

4.4 Folgerungen

Die Beispiele zeigen, dass auch komplexere Situationen mit dem gewählten Konzept lösbar sind.

Ohne Vorgabe eines Weges, nur mit Definition der Start- und Zielbedingungen, sowie mit Kenntnis der Netzwerktopologie und der Eigenschaften der Züge ist der Algorithmus in der Lage, Lösungen zu ermitteln und diese mit einer Zielfunktion zu bewerten, so dass Zeit- und Energieaspekte im gleichen Ansatz optimiert werden können.

Die Aufgabe kann auf einem normalen Notebook-PC in einer Matlab-Umgebung in kurzer Zeit gelöst werden, so dass zu erwarten ist, dass bei Einsatz in einer geeigneten leistungsfähigen Rechnerumgebung und mit entsprechender spezifischer Programmierung die Effizienz nochmals um Faktoren gesteigert werden kann. Damit werden auch reale Netz im Sekundenbereich und online berechenbar.

5 Literatur

- [1] M. Meyer, M. Lerjen, S. Menth: Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement. Schlussbericht des Projektes 102645 im Auftrag des Bundesamts für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität, vom 26.11.2009
- [2] M. Meyer, M. Lerjen: Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung: Konzept und Systemarchitektur. *emkamatik* Dokument 09-0314, Version 1 vom 26.11.2009

- [3] M. Meyer, M. Roth, B. Schaller: Einfluss der Fahrweise und Betriebssituation auf den Energieverbrauch von Reisezügen. Schweizer Eisenbahn-Revue, Eisenbahn-Revue International und Eisenbahn Österreich 8-9/2000

Versionsinformation

--	21.11.2009	MM	Version für Review
1	26.11.2009	ML	Schlussversion