

Störungen im Bahnbetrieb in Echtzeit beheben

Wetterkapriolen und Stellwerkstörungen sind für Disponenten von Eisenbahnverkehrsunternehmungen tägliche Herausforderungen. Sie verlangen rasch nach Lösungen. Heutige Ressourcenmanagement Systeme unterstützen sie dabei nur teilweise. Die *Fachhochschulen OST* und *Nordwestschweiz* entwickeln mit dem Softwarehaus *Qnamic* ein neues Decision Support System. Basis dazu bildet eine Kombination von bewährten Ansätzen des Operation Research und Machine Learning.



1. Situation im nationalen Schienenverkehr

Die COVID-19 Pandemie und immer häufiger auftretende extreme Witterungsverhältnisse fordern Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und ihre Disponenten aufs Äusserste. Kurzfristige Entwicklung von Ersatzfahrplänen, krankheitsbedingte Ausfälle von Mitarbeitern oder blockierte Streckenabschnitte verlangen schnelle Lösungen bei sich dauernd ändernden Gegebenheiten. Störungen sind eingebettet in einen Kontext aus planmässigen Herausforderungen, wie beispielsweise der reguläre Fahrplanwechsel, die Umsetzung von

zusätzlichen Streckenangeboten oder die Schulung von Personal zum Einsatz neuer Fahrzeuge. Taktverdichtung, die sukzessive gestiegene Netzauslastung und Verlagerung des Güterverkehrs von der Strasse auf die Schiene fordern die Disponenten der EVU: Sie müssen immer weitreichendere Entscheidungen in einem laufend komplexeren Umfeld treffen. Dafür steht ständig weniger Zeit zur Verfügung.

2. Möglichkeiten heutiger Ressourcen Management Systeme

Heute gibt es keine Software, welche die Disponenten von EVU bei der Behand-



1: Disponent der Südostbahn bei der Arbeit mit RailOpt

Quelle: SOB



Fabian Leuthold

Wiss. Mitarbeiter, IMS, OST
fabian.leuthold@ost.ch



Prof. Dr. Katrin Hügel

Projektleiterin, IMS, OST
katrin.huegel@ost.ch



Prof. Dr. Harold Tiemessen

Institutsleiter, IMS, OST
harold.tiemessen@ost.ch



Phillip Gachnang

Wissenschaftlicher Assistent,
Institut für Wirtschaftsinformatik,
Fachhochschule Nordwestschweiz
phillip.gachnang@fnw.ch



Dipl.-Pol. Kurt Metz

Publizist SFJ-BR
mail@kurtmetz.ch

lung von Störungen im operativen Betrieb mit konkreten Vorschlägen unterstützt. Der Markt bietet nur Lösungen, mit deren Unterstützung Disponenten den Systemzustand in Echtzeit mitverfolgen und frühzeitig über sich anbahnende Ressourcenkonflikte und Regelverletzungen informieren [1]. So werden Disponenten über Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand aufmerksam gemacht, können dann manuell eingreifen und mit der Planung geeigneter Massnahmen Konflikte und Regelverletzungen auflösen. Ressourcenkonflikte treten dann auf, wenn Ressourcen (Triebfahrzeuge, Mitarbeitende, usw.) nicht zum geplanten Zeitpunkt am vorgesehenen Ort verfügbar sind. Zu den Ursachen gehören unter anderen Streckenunterbrüche, Störungen am Fahrzeug und krankheitsbedingte Ausfälle. Regelverletzungen treten beispielsweise dann auf, wenn Arbeitszeit-, Ruhezeitregeln oder Mindestqualifikationen für das Lenken eines bestimmten Triebfahrzeugs oder das Befahren einer bestimmten Strecke nicht eingehalten werden können.

2.1. Smartrail 4.0

Die durch das Innovationsprogramm der Schweizer Bahnbranche, *smartrail 4.0*, initiierten Projekte sehen keine Arbeitspakete zur Entscheidungsunterstützung für Disponenten von Personal und Rollmaterial vor [2]. Im Zentrum stehen dort die Modernisierung und Verbesserung der Bahnproduktion aus Sicht der Infrastruktur mit dem primären Ziel, eine markante Kapazitätssteigerung im Schienennetz zu realisieren.

2.2. Von RailOpt ...

Qnamic AG, ein schweizerisches Softwareunternehmen und Anbieterin des Ressourcen Management Systems *RailOpt*, hat das Produkt für EVU erfolgreich im Markt etabliert. Als eines der ersten Unternehmen hat es erkannt, dass eine Software zur reinen Verwaltung von Ressourcen den EVU heute nicht mehr ausreicht, um deren komplexen Aufgabenstellungen zu genügen. In ihrer über zehnjährigen Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Südostbahn (SOB) hat *Qnamic* ihr Produkt *RailOpt* sukzessive ausgebaut und ihm mit dem *Decision Support System* (DSS) ein eigenes Herz verpasst. Dieses ermöglicht mit Hilfe von klugen Algorithmen eine kostenoptimierte Angebotsplanung und Fahrplanerstellung. Die Funktionalität ermöglicht es den EVU, ba-



2: Mit dem Markteintritt in den Fernverkehr auf der Gotthard-Bergstrecke ab Basel/Zürich nach Locarno hat sich das Streckennetz der Südostbahn deutlich verlängert. Im Bild ein neuer Traverso-Flirt auf der Gotthard-Südrampe im Nordtessin

Quelle: SOB/Markus Schälli

sierend auf betrieblichen Rahmenparametern – wie z. B. Nachfrage, Personalbestand, Personalstützpunkten, Fahrzeugflotten, Schienennetz und Ertragsstrukturen – unterschiedliche Szenarien von Angeboten zu modellieren. Auf dieser Grundlage lassen sich eine kostenoptimierte Fahrzeug- und Dienstplanung berechnen.

2.3. ... zu RailOpt DSSplus

Das Team von *Qnamic* erkannte die Zeichen der Zeit und spinnt den Optimierungsgedanken konsequent weiter. Ziel ist es, bald aktiv mit automatisch berechneten Lösungen den Dispositionsalltag zu unterstützen. Tritt im Betrieb eine Störung auf, so ist es nicht möglich die geplanten Leistungen zu erfüllen und es muss meist in sehr kurzer Zeit eine Lösung erarbeitet und umgesetzt werden. Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass die Optimierungsmethoden der Langfristplanung sich nicht auch in der Disposition einsetzen lassen. Doch die Anforderungen könnten kaum unterschiedlicher sein: In der Langfristplanung stehen primär wirtschaftliche Aspekte im Mittelpunkt und die Zeit zur Lösungsfindung ist nahezu unbegrenzt. In der Disposition hingegen muss in Echtzeit mit den verfügbaren Ressourcen eine Lösung gefunden werden, die es ermöglicht, den Bahnbetrieb möglichst angebotstreu aufrecht zu erhalten und mit möglichst wenigen Planänderungen umgesetzt werden kann. Wirtschaftliche Aspekte spielen dabei klar eine untergeordnete Rolle.

3. Forschungsprojekt unterstützt die Disposition

3.1. Kategorisierung von Störungen

Zu Beginn des Projektes stand das Bedürfnis, die Vielfalt der Störungen kennen zu lernen, die im Betrieb von EVUs auftreten können und sich eine Vorstellung zu schaffen, was sie bewirken. Störungen haben die unterschiedlichsten Ursachen: Wetter, technische Probleme, menschliches Versagen, Streiks oder Personenunfälle. Die Auswirkungen sind fast noch schwerer überschaubar. Ein Auslöser, wie beispielsweise eine einfache Türblockierung, ruft möglicherweise mehrere Probleme wie ein verspäteter Zug, ausgefallene Dienstfahrten, Zugausfälle oder Zugumleitungen hervor. Es stellt sich also die Frage, wie sich Struktur in das Phänomen der Störung bringen lässt. Gemäss Wikipedia wird eine Betriebsstörung wie folgt charakterisiert:

Unter einer Betriebsstörung versteht man unerwartet eintretende Ereignisse, die auf den geplanten Produktionsprozess oder Geschäftsprozess einwirken und den vorgesehenen Arbeitsablauf behindern oder sogar verhindern. (Wikipedia, 25. Januar 2021)

Diese Definition beschreibt einen zentralen Sachverhalt im Störfall sehr treffend: Am Anfang steht eine Planung von Geschäftsprozessen, an der durch das Eintreten unerwarteter Ereignisse nicht mehr festgehalten werden kann.

Basierend auf unserer Analyse von unvorhersehbaren Vorkommnissen entwickelten wir ein Modell, welches es erlaubt, jede Störung – unabhängig vom auslösenden Ereignis – einer von drei Störungskategorien zuzuordnen und dadurch den Prozess der Problembeseitigung durch den Disponenten zu leiten:

(1) Die Basis stellen **Veränderungen in der Verfügbarkeit von Ressourcen** der Infrastruktur – insbesondere von Trassen – dar. Diese Form der Störung hat immer Auswirkungen auf alle nachfolgenden Störungskategorien, weil Änderungen an der Trassenverfügbarkeit immer auch die Planung von Rollmaterial und Personal beeinflussen. Eine besondere Herausforderung

der Behebung solcher Störungen besteht darin, dass sie die EVU nicht selbständig beheben können, da Streckennetze häufig von einem anderen Player, nämlich dem Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), betrieben werden.

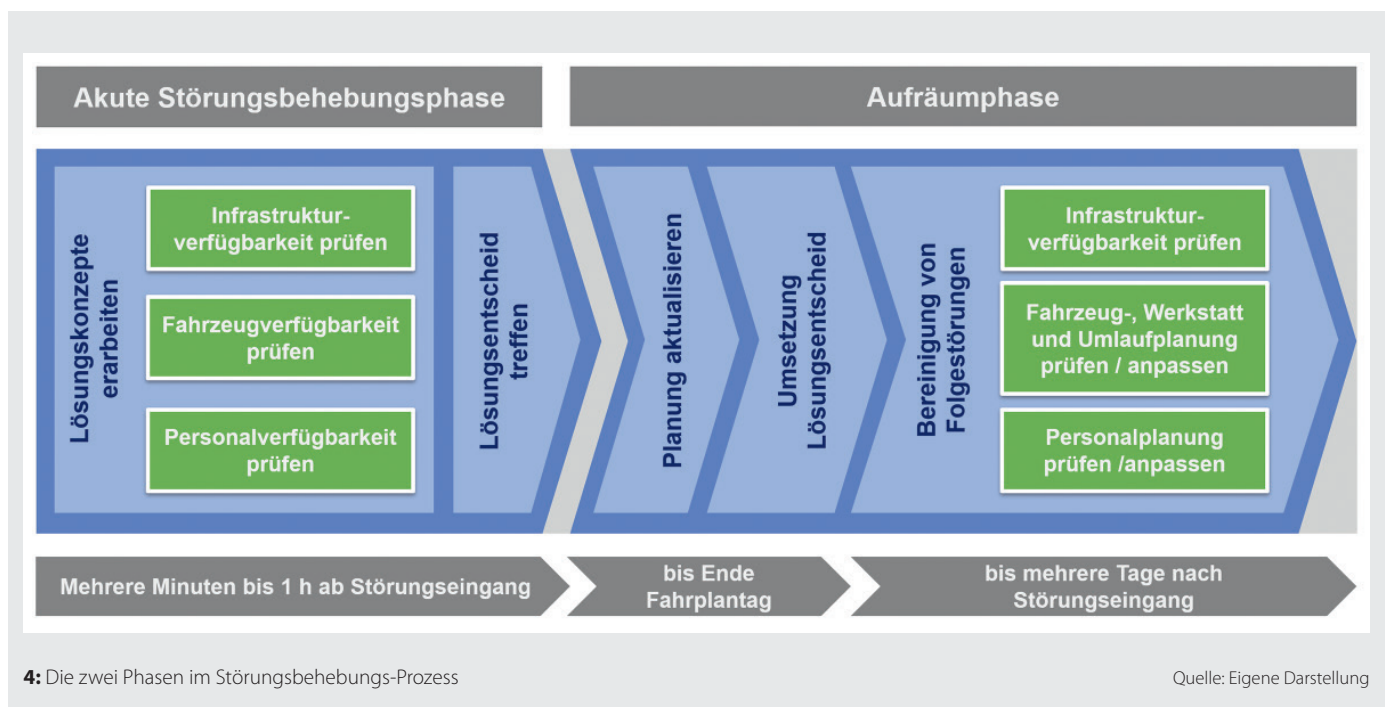
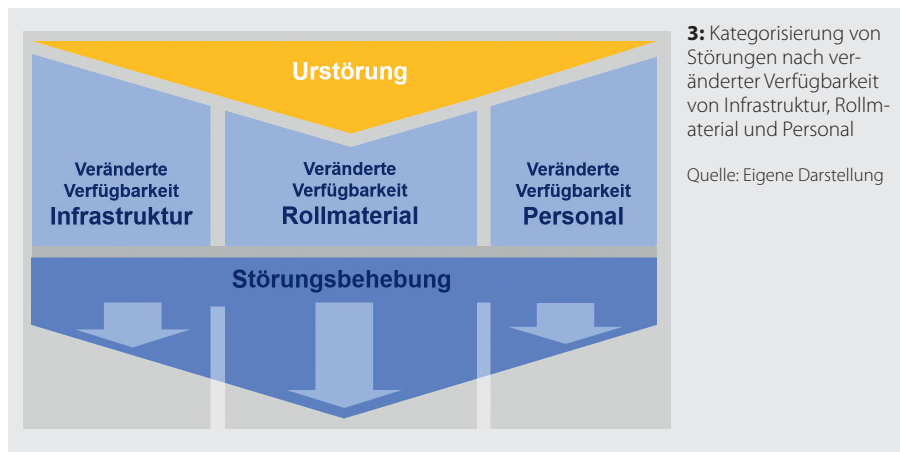
(2) Die **Veränderung der Rollmaterialverfügbarkeit** hat stets auch Auswirkungen auf das Personal, zumindest auf jenes des betroffenen Zuges. Häufig bewirkt die Behebung von Störungen dieser Kategorie wiederum neue Folgestörungen auf Seite der Infrastruktur, wie z.B. das Stellen eines Ersatzzuges aus dem Depot oder das Abziehen einer defekten Komposition aus dem Netz, die zwangsläufig Trassenanfragen beim EIU erfordern.

(3) Eine **Veränderung der Personalverfügbarkeit** lässt sich häufig ohne Beeinträchtigung der beiden anderen Kategorien lösen. Fällt beispielsweise ein Lokführer vor Dienstantritt aufgrund Krankheit aus, kann im Idealfall noch früh genug ein Ersatzlokkführer aus der Reserve eingeplant und aufgeboten werden. Erst wenn auf der Personalebene keine Lösung möglich ist und daher zur Erfüllung einer Leistung z.B. alternatives Rollmaterial mit einfacheren Qualifikationsanforderungen eingesetzt werden muss, können daraus Folgestörungen resultieren, zu deren Behebung die Infrastruktur beigezogen werden muss.

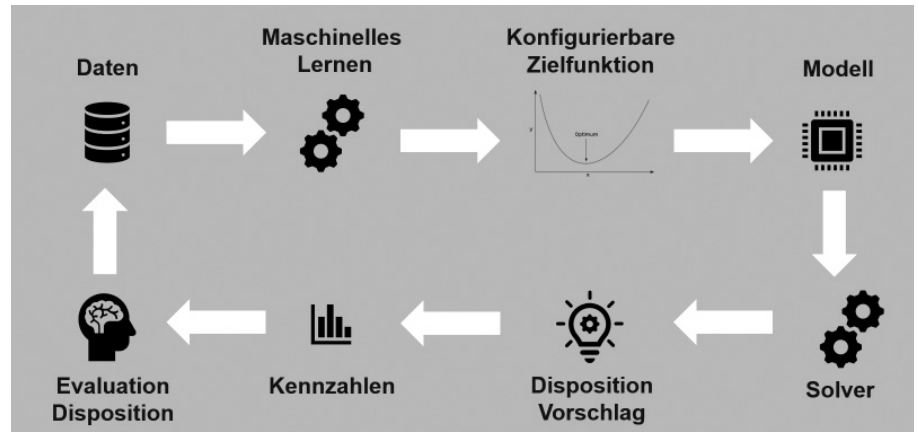
Diese Kategorisierung bringt Struktur in die Vielfalt von Störungen. Alle Urstörungen können einer dieser drei Kategorien zugeordnet werden. Abhängig von der zugeordneten Störungskategorie, kann dann die passende Massnahme getroffen werden.

3.2. Phasen in der Störungsbehebung

Nach einer Bestandsaufnahme der verschiedenen Störungen untersuchten wir den Prozess der Störungsbehebung genauer. Einen wichtigen Beitrag zu unserem Prozessverständnis lieferte die Unterteilung des Störungsbehebungsprozesses in zwei grundsätzlich voneinander getrennte Phasen: Die «Akute Störungsbehebungsphase» und die «Aufräumphase».



Im Gegensatz zu heute verfügbarer Dispositionssoftware besteht die Einzigartigkeit der in diesem Projekt angestrebten Lösung darin, Ressourcenkonflikte und Regelverletzungen sowohl zu präsentieren wie auch gleich mehrere erfolgsversprechende Planänderungen zu berechnen und vorzuschlagen.



5: Grobe Lösungsarchitektur

Quelle: Eigene Darstellung

phase bildet in jedem Fall der definitive Umsetzungsentscheid.

Aufräumphase

Die *Aufräumphase* kann von wenigen Stunden bis mehrere Tage dauern. In dieser Phase wird zuerst die Planung basierend auf der zuvor konzipierten und gewählten Lösung aktualisiert und es werden dem Personal die Änderungen kommuniziert. Anschliessend erfolgt die planmässige Umsetzung der Lösung basierend auf der neuen Ressourcenplanung. In den meisten Fällen ist zwar hinsichtlich der ursprünglichen Störung bereits nach einigen Stunden wieder der Normalzustand hergestellt, jedoch führen die getroffenen Dispositionsmaßnahmen häufig zu Folgestörungen. Diese manifestieren sich oft erst in den nachfolgenden Tagen. So führt beispielsweise ein kurzfristiger Streckenunterbruch dazu, dass am Ende des Fahrplantes Rollmaterial nicht am geplanten Zielort abgestellt wird und als Folge davon der am nächsten Tag vorgesehene Werkstatttermin gezwungenermassen entfällt. Folgestörungen, die erst später auftreten, können in einer späteren Projektphase durch die Ausweitung des Zeithorizonts in der Berücksichtigung von Regelverletzungen bei der Lösungsbeurteilung realisiert werden. Das Ende der *Aufräumphase* fällt mit dem Zeitpunkt zusammen, wo alle geplanten Dispositionsmaßnahmen – unabhängig davon, ob durch Störungen oder Folgestörungen begründet – geplant und umgesetzt sind.

3.3. Wie Software Mehrwert schaffen kann

Im Gegensatz zu heute verfügbarer Dispositionssoftware besteht die Einzigartigkeit der in diesem Projekt angestrebten Lösung

darin, Ressourcenkonflikte und Regelverletzungen sowohl zu präsentieren wie auch gleich mehrere erfolgsversprechende Planänderungen zu berechnen und vorzuschlagen. Damit erarbeitet die neue Software in Interaktion mit dem Disponenten rasch und sicher eine optimale Lösung.

Um diese Produktinnovation zu realisieren, werden folgende drei technische Innovationen kombiniert:

Parametrisierte Konstruktionsheuristiken

Die Algorithmen in der *RailOpt DSS Software* von *Qnamic* wurden für die Angebotserstellung und die Langzeitplanung von EVU entwickelt. Zur Anwendung in der Echtzeit-Ressourcendisposition sind sie entschieden zu langsam. Vielversprechend in diesem Kontext ist der Einsatz von parametrisierten Konstruktionsheuristiken in Kombination mit einer passenden Meta-Heuristik. Dieser innovative Ansatz ermöglicht die Einbindung von Kontextwissen in leistungsstarke, generische Optimierungsalgorithmen. Dieser Ansatz wurde von Prof. Dr. Harold Tiemessen, Leiter Algorithmen Entwicklung in diesem Projekt, während seines Engagements bei Philips bei der Optimierung von Bestückungsprogrammen in der Halbleiterindustrie bereits erfolgreich eingesetzt.

Autokonfiguration der Zielfunktion über Maschinelles Lernen

Sämtliche Optimierungsalgorithmen benötigen eine Methode, um Lösungen vergleichen respektive bewerten zu können – die sogenannte Zielfunktion. In unserem Kontext spielen eine Vielzahl von Zielkriterien eine Rolle. In Operations Research ist es üblich, die Optimierung mittels Gewichtung dieser Kriterien durchzuführen, ggf.



6: Die Chemins de Fer Luxembourgeois gehören mit den SOB zu den Pionieren der Entwicklung des neuen Echtzeit-Ressourcenmanagement-Systems RailOpt DSSplus
Quelle: © CFL

mit Unter- oder Obergrenzen für ausgewählte Zielkriterien. Es ist aber in der Praxis nicht einfach aber gleichzeitig sehr wichtig, schnellstmöglich sinnvolle Zielgewichtungen zu definieren. Momentan bestimmen die Disponenten in *RailOpt DSS* die Gewichtungen selbst und individuell. Neu wollen wir aus den historischen Gewichtungen lernen und daraus kontextuell bestmögliche Gewichtungen vorschlagen. So können für jedes EVU und ihre Störfälle die Zielfunktionen automatisch konfiguriert werden.

Domain Specific Language

Obwohl häufig ähnliche Störfälle im Betrieb von EVU auftreten, muss die konkrete Lösung immer wieder neu geplant werden. Im Projekt wird eine domänenspezifische Sprache (DSL) entwickelt, mittels derer manuelle und fehleranfällige Arbeitsschritte formal beschrieben, kundenspezifisch hinterlegt und später (teil-)automatisiert abgewickelt werden können. Dadurch werden manuelle und repetitive Arbeitsschritte eliminiert und die Disponenten entlastet, so dass mehr Zeit für die herausfordernde und kreative Arbeit bei der Lösungsfindung zur Verfügung steht.

Die drei oben erwähnten technischen Innovationen bilden zusammen eine transdisziplinäre Innovation. Via DSL Skripts erhält *RailOpt DSSplus* die Leistungen und Ressourcen für den Aufruf der Optimierung und über die Machine Learning Algorithmen die Gewichtungen der Zielkriterien für diese Optimierung. Der Disponent

kann die berechneten Massnahmen direkt ausführen oder Anpassungen vornehmen und eine erneute Optimierung starten, wodurch die Machine Learning Algorithmen weiter lernen. Die grobe Lösungsarchitektur ist in Bild 5 grafisch dargestellt.

4. Ausblick

Die konzeptionelle Arbeit im Projekt ist weitgehend abgeschlossen und erste Testinstanzen wurden von den EVU bereitgestellt. In den nächsten Schritten werden mit Hilfe ganzzahliger Programmierung optimale Lösungen für überschaubare Testinstanzen berechnet, erste Konstruktionsheuristiken entwickelt und die Datengrundlage erhoben, die in der Folge den Ausgangspunkt für das Machine Learning darstellt.

Wir planen, regelmässig in Fachzeitschriften und auf Konferenzen über den

Projektstand zu informieren. Aktuelle Informationen zum Projektverlauf stellen wir dem interessierten Publikum ausserdem auf der Projekt-Website unter <https://www.fhnw.ch/plattformen/dssplus/> zur Verfügung und sind selbstverständlich jederzeit offen für Rückmeldungen. ●

Literatur

- [1] Leitsystem zur Netzdisposition Kunde, LeiDis-NK Premiumversion, <https://bit.ly/3d02v2u>
[2] smartrail 4.0; Teilprojekt Traffic Management System, <https://bit.ly/3tlalnP>

Links

Qnamic: <https://qnamic.com/de/>
Ostschweizer Fachhochschule: [https://www.ost.ch/Fachhochschule Nordwestschweiz](https://www.ost.ch/Fachhochschule%20Nordwestschweiz): <https://www.fhnw.ch>
Chemins de Fer Luxembourgeois CFL: <https://www.cfl.lu>
Schweizerische Südostbahn: <https://www.sob.ch>

Summary

Störungen im Bahnbetrieb in Echtzeit beheben

Wetterkapriolen und Stellwerkstörungen sind für Disponenten von Eisenbahnverkehrsunternehmen tägliche Herausforderungen. Sie verlangen rasch nach Lösungen. Heutige Ressourcenmanagement Systeme unterstützen sie dabei nur teilweise. Die Fachhochschulen OST und Nordwestschweiz entwickeln mit dem Softwarehaus Qnamic ein neues Decision Support System. Basis dazu bildet eine Kombination von bewährten Ansätzen des Operation Research und Machine Learning.

Multinationales Forschungsprojekt

Das Innovationsprogramm Innosuisse fördert das Forschungsprojekt «Echtzeit Ressourcendisposition von Personal und Rollmaterial in der Eisenbahnbranche». Das Softwarehaus Qnamic, die Ostschweizer Fachhochschule und die Fachhochschule Nordwestschweiz entwickeln mit der Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois und der Schweizerischen Südostbahn neue Ansätze und Lösungen, um Disponenten bei der Behebung von Störungen zu unterstützen. Dabei kommen parametrisierte Konstruktionsheuristiken in Kombination mit der passenden Meta-Heuristik, maschinelles Lernen und eine Domain Specific Language zum Einsatz.