

Praxisnahe Testung von Dispositionsalgorithmen in einem Eisenbahnlabor

Liebhold, Alexandra¹, Weymann, Frédéric², Nießen, Nils¹

¹Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen

² VIA Consulting & Development GmbH

Zusammenfassung

Bisher wird die Disposition im Eisenbahnwesen hauptsächlich manuell von einem Disponenten durchgeführt. Aufgrund der oftmals kurzen Zeiträume, in denen Entscheidungen getroffen werden müssen, ist es meist nicht möglich, eine für das Gesamtnetz optimale Entscheidung zur Konfliktlösung zu finden. Es existieren bereits verschiedene Verfahren für die Zugdisposition, unter anderem das am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelte Verfahren OptDis, das eine automatische Konflikterkennung und -lösung in Echtzeit durchführen kann. Der vorliegende Artikel beschreibt die technische Umsetzung einer Testumgebung für OptDis in der Eisenbahntechnischen Lehr- und Versuchsanlage der RWTH Aachen unter realitätsnahen Bedingungen.

Keywords: Disposition, Automatisierung, Eisenbahnlabor, Realitätsnahe Evaluierung, Systemintegration

1 Einleitung

Aufgrund des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens auf der Schiene werden Eisenbahnstrecken und –knoten oftmals bis zur Kapazitätsgrenze ausgelastet. Erleidet eine Zugfahrt während des Betriebs eine Verspätung, kann dies zu Folgeverspätungen im kompletten Netzbereich führen. Daher sind Strategien für eine effiziente Zugdisposition im laufenden Betrieb von enormer Wichtigkeit.

Heutzutage werden Dispositionsentscheidungen in den meisten Fällen manuell von einem Disponenten getroffen. Die Güte der Entscheidungen hängt zum einen stark von der Erfahrung des Disponenten ab, zum anderen ist die Zeit, in der eine Entscheidung getroffen werden muss, oftmals begrenzt, sodass der Disponent, vor allem in komplexeren Betriebssituationen, nicht alle möglichen Konfliktlösungen und deren Auswirkungen auf das Gesamtnetz betrachten kann.

In der Vergangenheit wurden bereits einige Ansätze zur Konfliktlösung für die Zugdisposition entwickelt. Beispielsweise haben D’Ariano et al. das Verfahren ROMA (Railway traffic Optimization by Means of Alternative graphs) entwickelt, das alternative Graphen zur Modellierung verwendet [1]. Chou et al. haben ein agentenbasiertes Verfahren entwickelt, das den Dispositionsbereich in kleinere Teilbereiche unterteilt und die einzelnen Lösungen dann miteinander verknüpft [2]. Oftmals wird die Zugdisposition auch als mathematisches Optimierungsproblem modelliert und das zugehörige MIP (mixed-integer program) mit einer entsprechenden Solver-Software gelöst. Unter anderem verwenden auch Törnquist und Persson für die Zugdisposition ein mathematisches Optimierungsmodell [3]. Zhu und Goverde verwenden Methoden der stochastischen Optimierung, um die unbekannte Dauer von Störungen mithilfe einer endlichen Menge an möglichen Szenarien zu modellieren [4]. Eine umfangreiche Literaturübersicht und Gegenüberstellung verschiedener Lösungsstrategien für die Zugdisposition ist unter anderem in [5] zu finden.

Auch wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze zum energieoptimierten Fahren von Zügen entwickelt. Beispielsweise setzen einige EVU in der Schweiz das von der SBB entwickelte System ADL (Adaptive Lenkung) ein, welches durch Fahrempfehlungen an den Triebfahrzeugführer den Energieverbrauch reduzieren kann, indem insbesondere unnötige Stopps vor Halt-zeigenden Signalen durch angepasste Fahrprofile vermieden werden [6]. Im Rahmen eines Pilotprojekts haben das Eisenbahnverkehrsunternehmen BLS und SBB Infrastruktur verschiedene Fahrempfehlungssysteme für Lokführer im S-Bahn-Betrieb getestet. Es konnte gezeigt werden, dass durch deren Einsatz eine Energieeinsparung von 10 bis 15 % erzielt werden kann [7].

Im Rahmen des DFG-geförderten Projekts „Optimierungsverfahren bei Disposition und Fahrplanerstellung im Eisenbahnwesen“ wurde die Disposition durch ein mathematisches Optimierungsproblem beschrieben, dem ein mikroskopisches Infrastrukturmodell

zugrunde liegt [8]. Das dabei entwickelte Verfahren OptDis kann Konflikte frühzeitig automatisch erkennen und eine Lösungsstrategie finden, die in der gegebenen Situation einen bestmöglichen Betrieb ermöglicht, indem die gewichtete Gesamtverspätung minimiert wird. Die Berechnung der Lösung wird innerhalb praxistauglicher Laufzeiten von einem Solver durchgeführt. OptDis wurde innerhalb der Software LUKS implementiert [9].

Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts „Integrierte Disposition im Eisenbahnbetrieb“ wird die Disposition mit OptDis an der Eisenbahntechnischen Lehr- und Versuchsanlage (ELVA) [10] unter realitätsnahen Bedingungen validiert und auf Praxistauglichkeit getestet. Die ELVA stellt bei der Testung und Validierung eine zusätzliche Ebene zwischen virtueller Simulation und Praxistest dar. Somit können die Dispositionsalgorithmen einerseits unter realitätsnahen Bedingungen evaluiert werden, andererseits besteht im Gegensatz zu einer Testung im realen Betrieb keine Gefährdung der Sicherheit. Zudem sind die auftretenden Störungen und Verspätungen reproduzierbar. Auf diese Weise können verschiedene Dispositionsstrategien direkt miteinander verglichen werden. Die ELVA modelliert ein Eisenbahnnetz mit mehreren Strecken und Bahnhöfen im Maßstab 1:200 und bildet insgesamt ein Streckennetz von knapp 100 km ab. Durch die Entwicklung einer Softwareschnittstelle zwischen Dispositionssystem und Modellbahnanlage können einerseits OptDis Informationen über die aktuelle Betriebssituation übermittelt werden. Andererseits können die von OptDis ermittelten Konfliktlösungen von der Software aufbereitet und einem menschlichen Disponenten vorgeschlagen oder automatisch auf der Anlage umgesetzt werden. Auf diese Weise ist es möglich, verschiedene Störungsszenarien und Betriebssituationen zu simulieren. Dieser Artikel beschreibt den technischen Aufbau der Softwareschnittstelle zwischen Dispositionssystem und Modellbahnanlage, die als Testumgebung für die Dispositionsalgorithmen dient.



Abbildung 1: Eisenbahntechnische Lehr- und Versuchsanlage der RWTH Aachen

2 IT-Infrastruktur der Eisenbahntechnischen Lehr- und Versuchsanlage

Die Eisenbahntechnische Lehr- und Versuchsanlage (ELVA) modelliert im Maßstab 1:200 ein Gleisnetz mit ca. 240 km Gesamtlänge und ca. 100 km Streckenlänge. Die ELVA verfügt über Originalstellwerke verschiedener Bauformen von mechanischen bis elektronische Stellwerke der Bauform ZSB 2000, welche an die Steuerungssoftware angebunden sind. Bedienungen der Stellwerke werden über ein Bus-System an den Rechner übertragen, welcher die entsprechenden Weichen und Signale der Modellbahnanlage umstellt. Fahrstraßen können einerseits manuell über die realen Stellwerke eingestellt werden, andererseits ermöglicht es die Steuerungssoftware ebenfalls, über ein virtuelles Stellwerk Fahrstraßen auf Stellbarkeit zu prüfen und einzustellen. Auf diese Weise können Fahrstraßen auch automatisiert eingestellt werden, ohne dass dafür ein menschlicher Fahrdienstleiter benötigt wird.

Die ELVA-Software kommuniziert mit der Modellanlage über UDP-Telegramme. Die Anlage teilt der Software jeweils die aktuellen Weichenlagen und Signalbegriffe mit. Ebenfalls meldet die Anlage erfolgte Achszählüberfahrten. Mithilfe von Achszählkreisen kann die Software überwachen, welche Freimeldeabschnitte aktuell von welchen Zügen belegt sind. Über die Stellwerkslogik können Fahrstraßen aufgelöst oder deren Stellbarkeit bei Konflikten verhindert werden.

Die Züge werden über Fahrstufen angesteuert, um verschiedene Geschwindigkeiten sowie das Anfahr- und Bremsverhalten abzubilden. Je nach Lok stehen über 50 verschiedene Fahrstufen zur Verfügung, die jeweils einer Geschwindigkeit entsprechen und von der Software über UDP-Telegramme gesetzt werden können.

Das Infrastrukturmodell sowie das verfügbare Rollmaterial der ELVA werden in der Software LUKS abgebildet. Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Betriebsstelle der ELVA im LUKS-Modell.

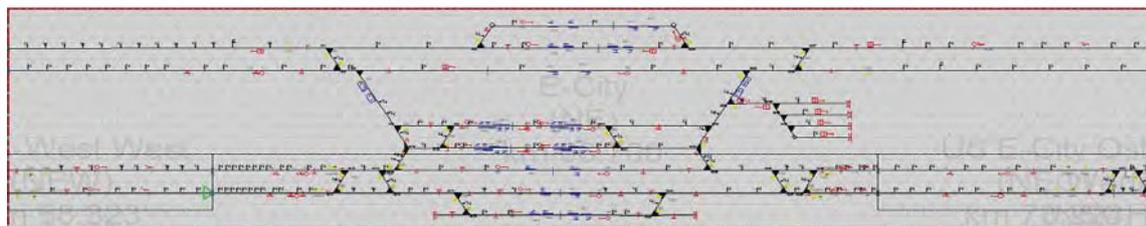


Abbildung 2: Ausschnitt aus dem LUKS-Modell der ELVA

Auf Basis der Infrastruktur- und Zugdaten können mit LUKS konfliktfreie Fahrpläne konstruiert werden. Die Fahrpläne werden von LUKS über eine XML-Schnittstelle der ELVA-Software zur Verfügung gestellt. Diese enthalten je Zug Informationen über die Ankunfts- und Abfahrtszeiten, Fahrwege und Gleisnummern je Betriebsstelle.

Mittels TCP-Telegrammen kommuniziert die Modellanlage mit LUKS zwecks Zugdisposition. Die Anlage liefert LUKS Informationen über die aktuelle Betriebssituation. Die von OptDis ermittelten Dispositionsmaßnahmen werden dann an die ELVA übermittelt und entsprechend umgesetzt (siehe auch Kapitel 3 und 6).

Vorab generierte Störungslisten, die für jeden Zug Einbruchs- und Urverspätungen enthalten, können von der ELVA-Software eingelesen und umgesetzt werden.

3 Zugdisposition mit LUKS und OptDis

3.1 Telegrammverarbeitung und Zugprognose

Grundlage der Disposition in LUKS ist ein ständig aktualisierter Dispositionsfahrplan, welcher den bisherigen Betriebsverlauf abbildet und in die Zukunft fortschreibt. Auf Basis dieser Prognose können voraussichtliche Probleme im Betriebsablauf rechtzeitig erkannt und dispositiv gelöst werden. Eine möglichst exakte Vorausschau ist daher die Voraussetzung für qualitativ hochwertige Dispositionsentscheidungen.

Wie im realen Betrieb existiert auch in der EvalOptDis-Testumgebung keine kontinuierliche Überwachung der Zugposition. Stattdessen muss LUKS die eingehenden bzw. ausbleibenden Telegramme mit dem aktuellen Dispositionsfahrplan vergleichen und bei Abweichungen oder Verzögerungen diesen geeignet anpassen.

Die möglichen Abweichungen und Reaktionen werden in Tabelle 1 dargestellt. Beim Ausbleiben von Telegrammen wird in regelmäßigen Abständen eine Anpassung wie bei einer verspäteten Ankunft durchgeführt.

Tabelle 1: Mögliche Abweichungen und Auswirkungen auf die Prognose

Art der Abweichung	Angenommene Ursache	Anpassung
Durchfahrt an einem nicht befahrenen Signal	Abweichende Fahrstraße wurde im Stellwerk eingestellt	Wahl eines alternativen Laufwegs mit geeigneten Fahrstraßen und ansonsten möglichst wenigen

		Änderungen gegenüber bisheriger Situation
Andere Ankunftszeit am Ausfahrtsignal nach Halt	Längerer oder kürzerer Halt als angenommen	Anpassung der Haltezeit
Andere Ankunftszeit am ersten Signal hinter Einbruchspunkt	Betriebsablauf außerhalb des Betrachtungsraums anders als angenommen	Anpassung der Einbruchzeit, gesamte Zeit-Weg-Linie wird parallel verschoben
Verspätete Ankunft am Signal während Fahrt	Fahrstraße wurde nicht rechtzeitig eingestellt, dadurch Fahrzeitverluste durch außerplanmäßigen Bremsvorgang	Einpflegen eines neuen Bremsvorgangs in das Geschwindigkeitsprofil des Zuges („Stutzen“)
Verfrühte Ankunft am Signal während der Fahrt	Zug hat ungeplant Fahrzeitreserven genutzt	Analoge Reduktion der Fahrzeitreserven

3.2 Konflikterkennung und Disposition

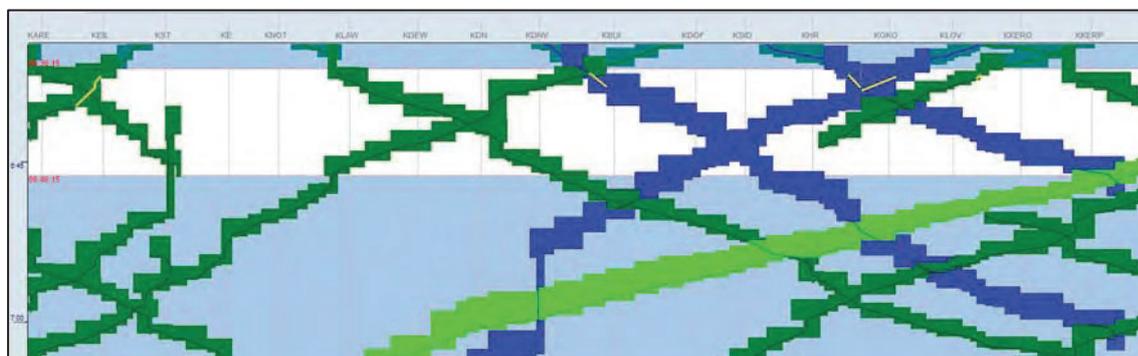


Abbildung 3: Beispielhafte Dispositionsoberfläche in LUKS

Mittels Sperrzeitentheorie werden in der ständig aktualisierten Prognose auf mikroskopischer Ebene Belegungskonflikte als Überlappungen von Sperrzeiten erkannt, welche von einem Disponenten gelöst werden sollten, um einen möglichst reibungslosen

Betriebsablauf zu ermöglichen. Abbildung 3 zeigt eine beispielhafte Situation mit aktuellem Zeitpunkt und Dispositionshorizont. Der blau hinterlegte Bereich liegt zu weit in der Zukunft, um eine zuverlässige Prognose zu treffen. Dort auftretende Konflikte werden daher noch nicht dispositiv behandelt. Auf Basis dieser Prognose kann eine Betriebsdisposition erfolgen, entweder manuell durch einen Menschen oder durch das in LUKS integrierte OptDis-Verfahren.

OptDis basiert auf dem Prinzip der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung (mixed-integer programming, MIP), welche bereits in zahlreichen anderen Bereichen erfolgreich zum Einsatz kommt. Als Eingabe erhält es den aktuellen Dispositionsfahrplan in Form der voraussichtlichen Trajektorien aller Zugfahrten, die aktuellen Zugpositionen und Informationen zu den eingestellten Fahrstraßen.

Daraus erstellt OptDis ein mathematisches MIP-Modell, welches die Menge aller zulässigen und betrieblich sinnvollen Dispositionsfahrpläne beschreibt. Es gibt somit keine starre Vorgabe von Regelsätzen, wie Konflikte zu lösen sind, sondern eine Auflistung an Anforderungen an das Ergebnis. Diese sind im Einzelnen:

- Der gewählte Laufweg jedes Zugs muss von den Stellwerken realisiert werden können, d.h. die passenden Fahrstraßen müssen vorhanden sein.
- Die gewählten Ankunfts- und Abfahrtszeiten und damit Fahrzeiten müssen vom Zug umsetzbar sein. Hier kommt die LUKS-Fahrzeitrechnung zum Einsatz, welche die fahrdynamischen Eigenschaften des Zugs, Infrastruktureigenschaften wie Neigungen und Geschwindigkeitsrestriktionen sowie Restriktionen der Leit- und Sicherungstechnik beachtet.
- Per Telegramm gemeldete Positionen und Fahrstraßen dürfen nicht verändert werden, es ist nur eine Disposition der Zukunft möglich.
- Die sich aus den gewählten Zeit-Weg-Linien ergebenden Sperrzeiten unterschiedlicher Züge dürfen sich nicht überlappen.
- Umlauf-Abhängigkeiten zwischen Zügen wie Flügel- und Kuppelbeziehungen müssen eingehalten werden.

Neben den Anforderungen besteht ein MIP-Modell aus einer Zielfunktion, welche mit Hilfe einer aggregierten Kennzahl die Qualität der Lösung bewertet. Die für EvalOptDis gewählte Funktion ist eine gewichtete Kombination mehrerer Ziele:

- Primär: Minimierung der Ankunftsverspätungen. Diese sind aus Kundensicht der entscheidende Qualitätsfaktor und werden daher priorisiert.

- Sekundär: Kompaktheit und Robustheit der Entscheidungen. Jeder dispositive Eingriff muss an die betroffenen Personen kommuniziert werden, daher sollte ihr Umfang begrenzt werden. Insbesondere sollten einmal kommunizierte Entscheidungen soweit möglich nicht erneut angepasst werden.
- Tertiär: Maximierung der Pufferzeiten.

Zusätzlich zum Störungsmanagement unterstützt das OptDis-Modell auch die Anschlussdisposition. Dazu werden die Anschlüsse als optionale Abhängigkeiten zwischen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der beteiligten Züge modelliert und die Zielfunktion um eine Maximierung der gehaltenen Anschlüsse ergänzt. In der aktuellen Phase von EvalOptDis wird diese Möglichkeit noch nicht eingesetzt, soll aber in Zukunft ergänzt werden.

Eine detailliertere Beschreibung des OptDis-Modells findet sich in [8] und [11].

Das erzeugte Modell wird an einen externen MIP-Solver übergeben. Im Rahmen von EvalOptDis kommt hierbei Gurobi zum Einsatz [12]. Gurobi durchsucht den vom Modell vorgegebenen Lösungsraum nach einer optimalen Lösung, d. h. einen gültigen Dispositionsfahrplan, welcher die oben genannten Anforderungen alle erfüllt und dessen Zielfunktionswert mindestens so gut ist wie die Bewertung jedes anderen gültigen Dispositionsfahrplans.

Aus dem Ergebnis der Optimierung erstellt OptDis im letzten Schritt einen mikroskopischen Dispositionsfahrplan. Die ermittelten Dispositionsmaßnahmen werden als Telegramme an die ELVA übermittelt und von der Steuerungssoftware bzw. den menschlichen Fahrdienstleitern entsprechend umgesetzt.

4 Zugsteuerung

Die Zugsteuerung ist ein Modul in der ELVA-Software, das die Züge und deren Geschwindigkeitskurven überwacht sowie die Geschwindigkeiten der Loks über Fahrstufen ansteuert.

Während des Betriebs ist jede Zugfahrt mit einer sogenannten Fahrwegliste verknüpft. Diese enthält alle zu befahrenden Infrastrukturelemente bis zum nächsten Halt-zeigenden Signal, d. h. dem aktuellen Ende der Fahrerlaubnis. Zu Beginn einer Betriebssimulation stehen alle Züge jeweils vor einem definierten Startsignal, die Fahrwegliste besteht also aus genau diesem Startsignal. Sobald das Startsignal auf Fahrt geht, die Fahrstraße also für die Zugfahrt eingestellt wurde, wird die Fahrwegliste bis zum nächsten Halt-zeigenden Signal in Fahrtrichtung erweitert. Dabei werden jeweils die aktuellen

Weichenlagen der Anlage berücksichtigt. Immer wenn das letzte Signal in der Fahrwegliste eines Zuges Fahrt anzeigt, wird die Liste entsprechend wieder erweitert. Abbildung 4 zeigt beispielhaft eine solche Fahrwegliste: Der Zug befindet sich aktuell vor dem Fahrt-zeigenden Signal A, seine Fahrwegliste beinhaltet alle Infrastrukturelemente, die bis zum Halt-zeigenden Signal B befahren werden müssen.

	ID	Bst	Name	Typ	Strecke	km	Distanz
1	936	NEW	A	Signal	1500	58.031	128
2	937	NEW	13B101/G12	Achszähler	1500	58.032	0
3	939	NEW	G12/W2	Achszähler	1500	58.231	199
4	913	NEW	W2	Weiche	1500	58.278	0
5	915	NEW	W2_1	Achszähler	1500	58.324	45
6	916	NEW	W3	Weiche	1500	58.37	45
7	902	NEW	W2/G22	Achszähler	1500	58.417	47
8	904	NEW	G22/13B201	Achszähler	1500	58.804	387
9	905	NEW	FF	Signal	1500	58.804	0
10	906	NEW	13B201_1	Achszähler	1500	58.932	120
11	1701	NE	13B201_2	Achszähler	1500	65.52	6578
12	1702	NE	B	Signal	1500	65.72	200

Abbildung 4: Fahrwegliste einer Zugfahrt

Einige Infrastrukturelemente in der Fahrwegliste enthalten Informationen über lokal geltende Höchstgeschwindigkeiten. Dies sind beispielsweise Signale, Halteplätze (im Falle eines Halts) oder Geschwindigkeitstafeln. Mithilfe dieser Informationen und der Höchstgeschwindigkeit des Zuges wird ein Geschwindigkeitsprofil der jeweils lokal geltenden Höchstgeschwindigkeiten für den Zug erzeugt, das bei jeder Änderung der Liste, beispielsweise weil sich ein Signalbegriff ändert oder ein dispositiver Halt hinzukommt bzw. entfällt, entsprechend aktualisiert wird.

Für jede Zugart sind Beschleunigungs- und Bremskurven hinterlegt, um die Fahrdynamik realitätsnah abzubilden. Die Beschleunigungs- und Bremskurven werden mit dem Geschwindigkeitsprofil verknüpft. Müsste ein Bremsvorgang bereits beginnen, bevor der Beschleunigungsvorgang abgeschlossen ist, so wird die durch Beschleunigung zu erreichende Geschwindigkeit entsprechend herabgesetzt. Abbildung 5 zeigt beispielhaft

ein solches Geschwindigkeitsprofil. Es ist zu beachten, dass diesem Profil die jeweils maximal zulässigen Geschwindigkeiten zugrunde liegen. Soll eine Zugfahrt aufgrund einer Dispositionsentscheidung gebogen werden, werden die Höchstgeschwindigkeiten für das Profil entsprechend angepasst.

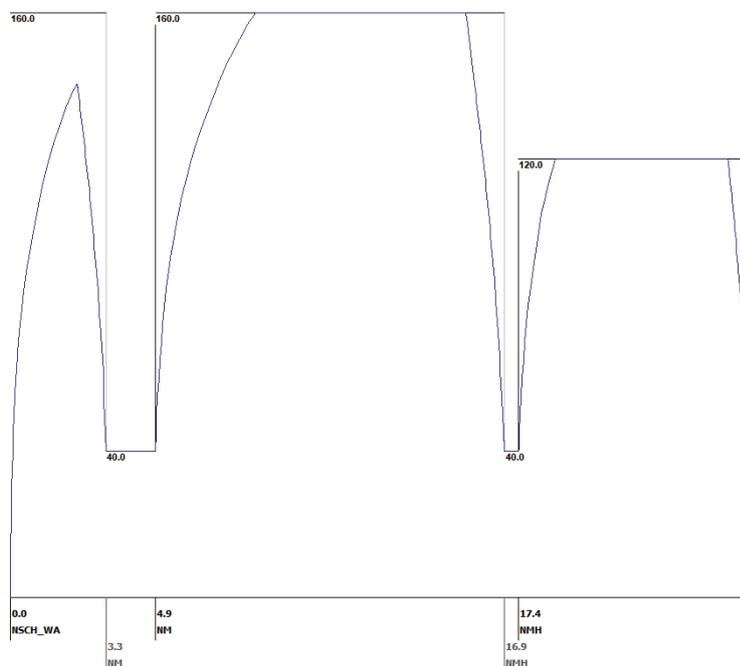


Abbildung 5: Geschwindigkeitsprofil einer Zugfahrt

Da es aufgrund der eingeschränkten Anzahl an Fahrstufen der Loks nicht möglich ist, kontinuierliche Kurven exakt abzufahren, werden die Kurven mithilfe der Fahrstufen approximiert (siehe Kapitel 5). Die Zugsteuerung steuert die Züge über die Fahrstufen so an, dass die approximierten Kurven zum jeweils richtigen Zeitpunkt abgefahren werden.

Anhand der Fahrweglisten und der Zeiten, die die Fahrstufen jeweils gefahren wurden, kann die Zugsteuerung zu jedem Zeitpunkt die Position der Züge auf der Anlage prognostizieren. Da die Züge in der Realität nie komplett exakt die Modellgeschwindigkeiten fahren, wird die virtuelle Zugposition bei jeder Überfahrt eines Achszählers entsprechend synchronisiert.

Die Zugsteuerung übermittelt außerdem alle Signalhaltfälle und eingestellten Fahrstraßen an OptDis (siehe Kapitel 3).

5 Beschleunigungs- und Bremskurven

Durch die Vorgabe von Beschleunigungs- und Bremskurven soll einerseits die Fahrdynamik der Züge in der ELVA realitätsnah abgebildet werden, andererseits ist es auch wichtig, dass die Fahrzeiten mit denen übereinstimmen, die in LUKS verwendet werden. Ziel ist es also, mithilfe der Fahrstufen der Züge, die Beschleunigungs- und Bremskurven möglichst exakt zu approximieren.

Für jede Modellbahnlok ist eine sogenannte Lokkennkurve hinterlegt, die zu jeder Fahrstufe die zugehörige Geschwindigkeit in km/h angibt (diese entspricht der Geschwindigkeit der Lok in der realen Welt). Da je Lok nur begrenzt viele verschiedene Fahrstufen zur Verfügung stehen, müssen die Beschleunigungs- und Bremskurven aus LUKS jeweils mit diesen approximiert werden. Jede Fahrstufe wird so lange gefahren, dass zu den Zeitpunkten, an denen die Geschwindigkeit der realen Kurve mit der der Fahrstufe übereinstimmt, die bis dahin zurückgelegte Strecke ebenfalls übereinstimmt. Die grüne Treppenstufenfunktion in Abbildung 6 zeigt eine solche Approximation durch Fahrstufen, wobei die blaue Kurve die zugehörige in LUKS hinterlegte Kurve beschreibt. Die Schnittpunkte bilden also die Stützstellen, an denen jeweils die zurückgelegte Strecke übereinstimmt. Die Zugsteuerung sorgt dafür, dass die approximierten Geschwindigkeitskurven entsprechend zur richtigen Zeit abgefahren werden (siehe Kapitel 4).

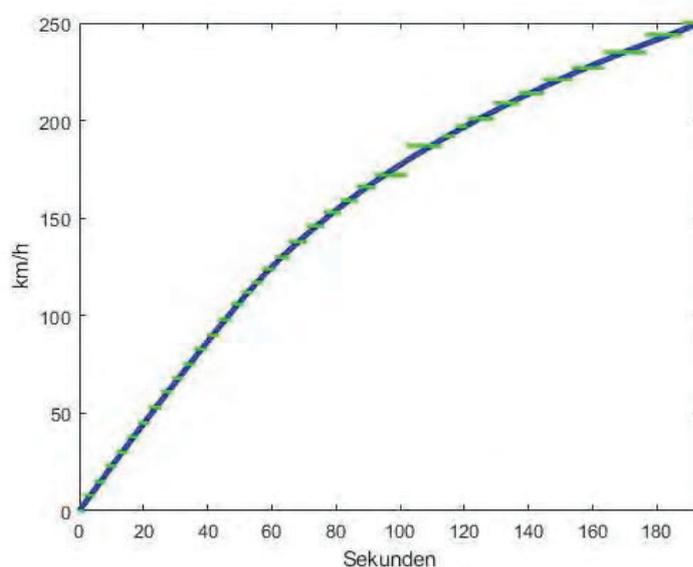


Abbildung 6: Beschleunigungskurve und Approximation durch Fahrstufen

6 Fahrplan

Das Fahrplan-Modul der ELVA-Software liest den Fahrplan aus einer mit LUKS erzeugten XML-Datei ein und verwaltet diesen. Dazu gehören unter anderem je Zug und Betriebsstelle die Ankunfts-, Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeiten und vorgesehene Fahrwege. Der Fahrplan stellt anderen Modulen über Schnittstellen verschiedene Informationen zur Verfügung und verarbeitet die Dispositionsmaßnahmen, die von OptDis vorgegeben wurden.

Bei jedem erfolgten Signalhaltfall oder Zughalt teilt die Zugsteuerung diese Information zusammen mit einem Zeitstempel dem Fahrplan mit. Daraufhin ermittelt der Fahrplan anhand der Fahrwege, die bis zum nächsten fahrplanmäßigen Halt bzw. zum Ausbruch abgefahren werden sollen, das Geschwindigkeitsprofil mit den maximal zulässigen Geschwindigkeiten (siehe Kapitel 4). Die Zeit, die der Zug zum Befahren der Strecke bis zum nächsten Halt bzw. bis zum Ausbruch benötigen soll, ist die Differenz zwischen der Abfahrtszeit in der aktuellen Betriebsstelle und der Ankunftszeit in der Zielbetriebsstelle bzw. der Zeit des Ausbruchs. Im Falle, dass der Zug durch Abfahren des Geschwindigkeitsprofils mit der jeweils maximal zulässigen Geschwindigkeit das Ziel zu früh erreichen würde, wird die Höchstgeschwindigkeit für das Geschwindigkeitsprofil reduziert. Dafür wird eine binäre Suche verwendet. Dabei wird die optimale Geschwindigkeit innerhalb der Schranken v_{min} und v_{max} gesucht, die in jedem Schritt weiter eingegrenzt werden. Zu Beginn ist $v_{min} = 1$ km/h und v_{max} die maximal zulässige Geschwindigkeit innerhalb des Geschwindigkeitsprofils. Im ersten Schritt wird die benötigte Fahrzeit für das Geschwindigkeitsprofil berechnet, wenn als Höchstgeschwindigkeit $\left\lfloor \frac{v_{max}}{2} \right\rfloor$ angenommen wird. Ist der Zug immer noch zu früh, wird v_{max} auf $\left\lfloor \frac{v_{max}}{2} \right\rfloor$ gesetzt. Ist der Zug dagegen zu spät, wird v_{min} auf $\left\lfloor \frac{v_{max}}{2} \right\rfloor$ gesetzt und in der nächsten Iteration mit den neuen Grenzen weitergesucht. Sobald die Differenz zwischen der aktuellen Fahrzeit und der Soll-Fahrzeit eine vorgegebene Grenze unterschreitet (beispielsweise eine Sekunde), wird die Suche beendet und die aktuelle Geschwindigkeit als neue Höchstgeschwindigkeit für das Geschwindigkeitsprofil gewählt. Andernfalls wird die Suche beendet, wenn $v_{max} = v_{min} + 1$ gilt und dann entweder v_{min} oder v_{max} als neue Höchstgeschwindigkeit für das Geschwindigkeitsprofil gewählt, je nachdem, mit welcher der beiden Geschwindigkeiten die Fahrzeit näher an der Soll-Fahrzeit liegt. Alle lokal zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Geschwindigkeitsprofil, die größer als die neue Höchstgeschwindigkeit sind, werden nun auf diese herabgesetzt. Abbildung 7 veranschaulicht das Vorgehen:

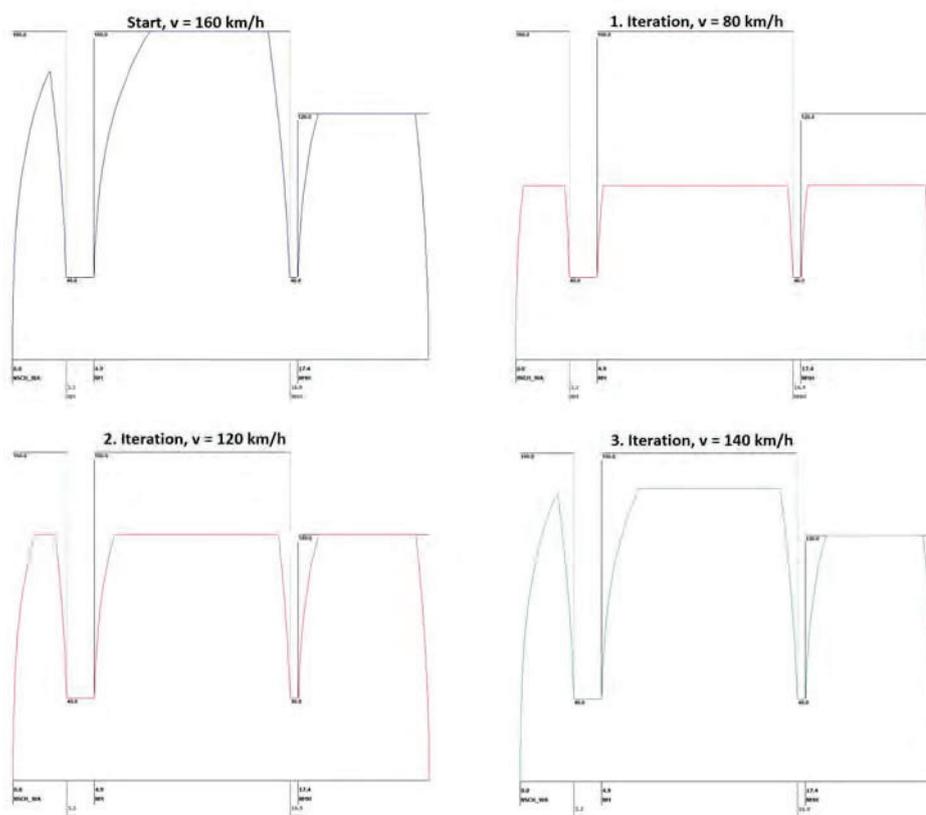


Abbildung 7: Ermitteln der neuen Höchstgeschwindigkeit mittels binärer Suche

Die Bestimmung der neuen Höchstgeschwindigkeit ist vor allem relevant, wenn eine Zugfahrt aufgrund einer Dispositionsentscheidung gebogen werden soll, da in diesem Fall von OptDis neue Ankunftszeiten vorgegeben werden. Die neue Höchstgeschwindigkeit wird an die Zugsteuerung weitergeleitet, die wiederum das Geschwindigkeitsprofil des Zuges entsprechend anpasst. Die erforderlichen Beschleunigungs- und Bremskurven werden dann für das angepasste Geschwindigkeitsprofil neu gesetzt. Als mögliche perspektivische Erweiterung könnte die Zugfahrt auch nur auf einem Teil der verbleibenden Strecke bis zum nächsten Halt gebogen werden, beispielsweise um das Risiko von neu auftretenden Konfliktsituationen zu minimieren oder um ein energieeffizienteres Geschwindigkeitsprofil abzufahren. Auch die Vorgabe von flexibleren Zeitfenstern für die Ankunft des Zuges könnte dazu beitragen, die Geschwindigkeitsprofile dahingehend noch weiter zu optimieren.

Ebenfalls an die Zugsteuerung weitergeleitet wird, im Falle eines Halts, die Haltezeit für den Zug. Diese ergibt sich als Maximum aus vorgesehener Haltezeit und der Zeit bis zur

Abfahrt laut Fahrplan. Der Zug fährt also weder vor seiner geplanten Abfahrtszeit ab, noch unterschreitet er seine vorgesehene Haltezeit. Diese kann lediglich unterschritten werden, wenn dies durch eine Dispositionsentscheidung von OptDis kommuniziert wurde.

Das Fahrplan-Modul stellt außerdem über eine Schnittstelle Informationen über die jeweils einzustellenden Fahrstraßen für die Zuglenkung bereit (siehe Kapitel 7). Hat ein Zug in einer Betriebsstelle einen fahrplanmäßigen Halt, so wird ebenfalls die geplante Abfahrtszeit der Zuglenkung bereitgestellt, damit die nächste Fahrstraße entsprechend kurz vor der Abfahrt eingestellt werden kann.

Werden von OptDis Dispositionsentscheidungen getroffen, werden diese vom Fahrplan-Modul verarbeitet. Beinhaltet eine Dispositionsentscheidung Fahrwegänderungen, so werden diese der Zuglenkung zur Verfügung gestellt. Kann der von OptDis vorgeschlagene Fahrweg von einer Zugfahrt nicht befahren werden, da bereits eine andere Fahrstraße eingestellt wurde, kann die Fahrwegänderung nicht mehr umgesetzt werden.

Zeitänderungen, also Änderungen der Ankunfts- und Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeiten, aus OptDis können einerseits Einfluss auf die Haltezeit eines Zuges in einer Betriebsstelle haben, wobei auch dispositive Halte hinzukommen oder Halte entfallen können. Andererseits können veränderte Ankunfts- oder Abfahrtszeiten dafür sorgen, dass die Zugfahrt gebogen wird. Mit der oben beschriebenen binären Suche kann die Höchstgeschwindigkeit bestimmt werden, die zum Biegen der Zugfahrt erforderlich ist, damit der Zug die neue vorgegebene Ankunfts- bzw. Durchfahrtszeit einhält.

7 Zuglenkung

Für eine automatische Umsetzung von Fahrwegänderungen wird das Softwaremodul der Zuglenkung benötigt. Diese sorgt dafür, dass die erforderlichen Fahrstraßen rechtzeitig eingestellt werden.

Hält ein Zug nach Ist-Fahrplan in einer Betriebsstelle, sendet das Fahrplan-Modul der Zuglenkung die Information, welche Fahrstraße eingestellt werden muss, sobald die Abfahrt erfolgen soll. Die Fahrstraße wird dann kurz vorher eingestellt.

Nähert sich ein Zug einem Halt-zeigenden Signal, an dem laut Ist-Fahrplan eine Durchfahrt erfolgen soll, erhält die Zuglenkung ebenfalls vom Fahrplan-Modul die Information über die einzustellende Fahrstraße. Aus der Zugsteuerung wiederum erhält die Zuglenkung den Bremseninsatzpunkt, an dem der Zug mit der Bremsung beginnen müsste, falls das aktuell Halt-zeigende Signal nicht auf Fahrtstellung geht. Die

Zuglenkung initiiert daraufhin das Einstellen der Fahrstraße kurz bevor der Zug seinen Bremsensatzpunkt bzw. das Vorsignal erreicht, damit dieser seine Geschwindigkeit nicht reduzieren muss.

Ist es nicht möglich, eine Fahrstraße einzustellen, beispielsweise weil einer der nachfolgenden Freimeldeabschnitte noch durch eine andere Zugfahrt belegt ist, so wird die Fahrstraße zum nächstmöglichen Zeitpunkt eingestellt.

Dadurch, dass Fahrwegänderungen aus OptDis direkt in den Ist-Fahrplan geschrieben werden, erhält die Zuglenkung stets die aktuell von vom Dispositionssystem für eine Zugfahrt vorgesehene Fahrstraße.

8 Erzeugung von Störungslisten

Damit überhaupt eine Zugdisposition erforderlich wird, müssen Züge Verspätungen erleiden und somit Konflikte erzeugen. Einerseits können die Züge bereits mit Einbruchsverspätungen in den Dispositionsbereich einbrechen, andererseits können auch unterwegs Urverspätungen hinzukommen. Um Verspätungswerte zu generieren, wird die in der Eisenbahnbetriebswissenschaft üblicherweise verwendete Verspätungsverteilung zugrunde gelegt, wobei der Parameter p_v der Wahrscheinlichkeit einer Verspätung entspricht und $\frac{1}{\lambda}$ der durchschnittlichen Verspätungen der verspäteten Zugfahrten:

$$F_T(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - p_v \cdot e^{-\lambda \cdot t}, & t \geq 0 \end{cases}$$

Die Parameter der Verspätungsverteilung können für Einbruchsverspätungen und Urverspätungen je Zugart frei gewählt werden. Es können damit beispielsweise auch Großstörungen modelliert werden. Die ELVA-Software generiert auf Basis der durch die Parameter gegebenen Verspätungsverteilungen zufällige Verspätungswerte, die in Störungslisten abgespeichert werden. Eine solche Störungsliste enthält für jede Zugfahrt, die in den Dispositionsbereich einbricht, eine Einbruchsverspätung sowie für jeden fahrplanmäßigen Halt den dort entstehenden Verspätungszuwachs. Die Verspätungen können dabei auch 0 sein.

Für den Betrieb der Modellanlage kann optional eine beliebige, für den jeweiligen Fahrplan erzeugte, Störungsliste eingelesen und entsprechend berücksichtigt werden. Liegt eine Einbruchsverspätung vor, bricht der Zug verspätet in den Dispositionsbereich ein, erleidet er unterwegs eine Verspätung, wird entweder der jeweilige Halt um diese Verspätung verlängert oder die Zugfahrt so gebogen, dass sie die gegebene Verspätung erreicht.

9 Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Softwareschnittstelle zwischen Dispositionssystem und Steuerungssoftware der Modellanlage bietet eine realitätsnahe Testumgebung für die Validierung des OptDis-Verfahrens. Die Anlage meldet kontinuierlich Zugpositionen und eingestellte Fahrstraßen an das Dispositionssystem. Dieses berechnet in Echtzeit die neuen prognostizierten Sperrzeitentreppen der Zugfahrten und sendet in regelmäßigen Abständen Dispositionsentscheidungen an die Anlage, die dort entsprechend verarbeitet und umgesetzt werden.

Für die Evaluierung der Disposition mit OptDis in unterschiedlichen Betriebsituationen können einerseits verschiedene Fahrpläne, mit jeweils unterschiedlicher Auslastung der Kapazität und beliebigem Zugmix, generiert und umgesetzt werden. Außerdem kann durch die Wahl entsprechender Parameter bei der Verspätungsverteilung das Ausmaß der Störungen im Netzbereich individuell festgelegt werden. Die Verspätungsdaten der Zugfahrten werden dabei aufgezeichnet und können anschließend ausgewertet werden. Ein großer Vorteil der Testung der Dispositionsalgorithmen an der Modellanlage ist, dass die jeweiligen Problem instanzen, die für die Evaluierung verwendet werden, exakt rekonstruierbar sind, was einen direkten Vergleich der Güte verschiedener Verfahren unter realitätsnahen Bedingungen und ohne Gefährdung der Sicherheit ermöglicht.

Im nächsten Schritt soll die entwickelte Testumgebung verwendet werden, um den Nutzen von OptDis im realen Betrieb im Vergleich zur manuellen Disposition zu evaluieren. Dazu muss für repräsentative Fahrplan- und Störungsszenarien ausgewertet werden, welches Verbesserungspotential jeweils ein erfahrener menschlicher Anwender und OptDis gegenüber dem Betrieb ohne Zugdisposition haben. Zeigt sich, dass die Disposition durch OptDis signifikant besser als die rein manuelle ist, bedeutet dies auch für den realen Betrieb ein Verbesserungspotential durch den Einsatz des Dispositionssystems. Vor allem in sehr komplexen Konfliktsituationen bietet ein Dispositionssystem wie OptDis, das in vergleichsweise kurzer Zeit gute Lösungen ermitteln kann, eine sinnvolle Möglichkeit, den Disponenten mithilfe von Handlungsempfehlungen zu unterstützen.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des DFG-Projekts „Integrierte Disposition im Eisenbahnbetrieb“ (NI 1597/3-1) durchgeführt.

Literatur

- [1] D'ARIANO, A. ; PRANZO, M.: *An advanced real-time train dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances*. Networks and Spatial Economics. 9. 63-84, 2009
- [2] CHOU, Y. ; WESTON, P. ; ROBERTS, C.: *Collaborative Rescheduling in a distributed railway control system*. 3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, RailZurich, 2009
- [3] TÖRNQUIST, Y. ; PERSSON, J.: *N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances*. Transportation Research Part B: Methodological. 41. 342-262, 2007
- [4] ZHU, F. ; GOVERDE, R.M.P.: *Dynamic and robust timetable rescheduling for uncertain railway disruptions*. Journal of Rail Transport Planning & Management. Vol. 15, September 2020, 100196
- [5] FANG, W. ; YANG, S. ; YAO, X.: *A Survey on Problem Models and Solution Approaches to Rescheduling on Railway Networks*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol. 16, Nr. 6, Dezember 2015
- [6] SBB: *RCS-ADL: die adaptive Lenkung für mehr Pünktlichkeit und Energieeffizienz*. www.sbb.ch
- [7] STUDER, T. ; GRAFFAGNINO, T. ; SCHÄFER, R.: *Fahrempfehlungen im S-Bahn-Betrieb: Pünktlich und energiesparend am Ziel*. ETR Swiss, Nr. 10/2017, S. 75-80, 2017
- [8] WEYMAN, F. ; NIEBEN, N.: *Verbesserung der Disposition des Eisenbahnbetriebs durch innovative Optimierungsverfahren*. ZEV Rail Glasers Annalen 139, 1-2, 2015
- [9] JANECEK, D. ; WEYMAN F. ; SCHAER, T.: *LUKS - integriertes Werkzeug zur Leistungsuntersuchung von Eisenbahnknoten und -strecken*. Eisenbahntechnische Rundschau 59, 35-32, 2010
- [10] SCHUMANN, F.: *Eisenbahn-Labor. Mit Modelleisenbahnen gegen Zugverspätungen*. Deutschlandfunk, 04.02.2019
- [11] WEYMAN, F. ; NIEBEN, N.: *Unterstützung der Fahrplanfeinkonstruktion mit Optimierungsverfahren*. Eisenbahntechnische Rundschau 64, 16-19, 2015
- [12] GUROBI OPTIMIZATION, LLC: *Gurobi Optimizer Reference Manual*. <https://www.gurobi.com>, 2021

Autoren



Liebhold, Alexandra

Alexandra Liebhold studierte bis 2017 Mathematik an der RWTH Aachen und arbeitet seitdem als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen im Bereich Eisenbahnbetriebswissenschaft.



Weymann, Frédéric

Dr. rer. nat. Frédéric Weymann arbeitet seit 2015 als Software-Architekt bei VIA Consulting & Development GmbH. Nach dem Studium der Informatik an der RWTH Aachen arbeitete er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen und promovierte dort 2011.



Nießen, Nils

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen leitet seit 2013 das Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftsgeographie an der RWTH Aachen promovierte er dort 2008. Anschließend war er Projektingenieur bei HaCon in Hannover und Geschäftsführer der VIA Consulting & Development GmbH.