

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/07/2014

Projekttitle: EcoRailNet

Projektnummer: 834586

# Neue Energien 2020 - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	5. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/03/2012
Projektende	31/05/2014
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	27 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	ÖBB-Infrastruktur AG
AnsprechpartnerIn	DI Dr. Michaela Haberler-Weber
Postadresse	Praterstern 3, 1020 Wien
Telefon	+43 664 88425195
Fax	
E-mail	<a href="mailto:Michaela.haberler-weber@oebb.at">Michaela.haberler-weber@oebb.at</a>
Website	<a href="http://www.oebb.at">www.oebb.at</a>

## EcoRailNet

Energiebedarfsoptimierung durch Verknüpfung  
der Betriebsführung des Bahnverkehrs mit  
der Steuerung des Bahnstromnetzes

**AutorInnen:**

ÖBB-Infrastruktur AG:

DI Michael Gammer

DI Dr. Michaela Haberler-Weber

Ing. Rudolf Kuralovics

ÖBB-Produktion GmbH:

Ing. Martin Turk

Technische Universität Wien:

Prof. Dr. Johann Blieberger

Thales Austria GmbH:

Michael Vondracek

Martin Lampel

DI Kurt Eigner

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	5
2.1	Aufgabenstellung .....	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes .....	5
2.3	Einordnung in das Programm .....	6
2.4	Aufbau der Arbeit .....	7
2.5	Verwendete Methoden .....	7
3	Inhaltliche Darstellung .....	8
3.1	AP1: Basisdatenerfassung .....	8
3.2	AP2: Modellierung und Simulation .....	9
3.2.1	Betriebliche Simulation .....	9
3.2.2	Simulation des Bahnstromnetzes .....	9
3.3	AP3: Optimierung .....	10
3.3.1	Einzelfahrtoptimierung .....	10
3.3.2	Gesamtoptimierung .....	11
3.4	AP4: Empfehlungen .....	13
3.5	AP5: Demonstratoren .....	14
3.6	AP6: Projektmanagement .....	17
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	17
5	Ausblick und Empfehlungen .....	18
6	Kontaktdaten .....	20

## 2 Einleitung

### 2.1 Aufgabenstellung

Die Bahnstromversorgung erfolgt durch Eigenerzeugung in Wasserkraftwerken sowie durch Fremdbezug aus Partnerkraftwerken und aus dem öffentlichen Stromnetz. Für die elektrische Betriebs- und Ausbauplanung wird eine Simulationssoftware verwendet, die die rechnerische Behandlung (Lastfluss, Kurzschluss, etc.) von Übertragungs- und Oberleitungsnetz mit örtlich vorgegebenen Streckenlasten ermöglicht. Das betriebliche Netz ist in der elektrischen Zugfahrtsimulation nur vereinfacht dargestellt (keine gleisgenaue Abbildung, fehlende Blockabstandsprüfung). Für betriebliche Simulationen und Kapazitätsanalysen liegt der Fokus auf der fahrwegsgenauen Abbildung aller Zugfahrten im Netz. Daher kommen eigene Simulationstools zum Einsatz.

Es gibt derzeit keine technische Abbildung des Gesamtsystems elektrischer Eisenbahnbetrieb und Bahnbetriebsführung, die deren Zusammenspiel und gegenseitigen Auswirkungen zeigt. Daher sind keine systemtechnisch optimierten Maßnahmen zwischen der Steuerung der Bahnstromversorgung im Oberleitungsnetz und dem elektrischen Eisenbahnbetrieb auf dem Schienennetz der ÖBB möglich.

Ein gesamthafter energieoptimierter Netzfahrplan ist derzeit nicht umgesetzt. Mittel- und langfristige Eingriffe in die Disposition der Züge im Falle einer anlagentechnischen Engpasssituation im Bahnstromversorgungsnetz sind derzeit nur mit Vorlaufzeiten von etlichen Tagen (offline) möglich. Kurzfristige Eingriffe sowohl in die Bahnstromversorgung, als auch in die Zugdisposition basieren überwiegend auf den Erfahrungen der handelnden Personen.

In den letzten Jahren wurde bei der Schulung der TriebfahrzeugführerInnen vermehrt Augenmerk auf energieoptimiertes Fahren gelegt. Einerseits wurde damit das Bewusstsein für eine energie- und damit umweltfreundliche Fahrweise geschult, andererseits gezielte Maßnahmen zum Beispiel für Bremsen mit elektrischer Rückspeisung trainiert.

Aus Sicht des einzelnen Triebfahrzeugs ist damit das Energieeinsparpotential weitgehend erschöpft. Eine weitere signifikante Energieeinsparung kann daher nur durch Betrachtung und Optimierung des Gesamtsystems geschehen.

### 2.2 Schwerpunkte des Projektes

Einige der Ziele im Projekt, die durch die Abstimmung der beiden oben genannten Bereiche erreicht werden sollten, sind:

- Energieeinsparung bei der Traktionierung (Einsparung bei einzelnen Triebfahrzeugen und Zügen) durch „vorausschauendes“ Fahren (Reduktion von Stop&Go Betrieb)
- Energiemehrbedarf durch außerplanmäßige Geschwindigkeitsreduktionen (Bremsen und Wiederbeschleunigen) minimieren
- Echtzeit-Kalkulation und Simulation von Versorgungengpässen im Bahnstromnetz bei Abweichungen vom Normalbetrieb.

- Energieeinsparung durch eine Echtzeitberechnung eines energieoptimierten Fahrplans unter vorgegebenen Randbedingungen und Onlineempfehlungen an die TriebfahrzeugführerInnen

Als Schwerpunkte im Projekt wurden daher die folgenden Aufgaben definiert:

- Überprüfen der Simulationsergebnisse auf Praxistauglichkeit durch Testfahrten: Stimmen die prognostizierten Energiebedarfswerte mit dem auf dem Triebfahrzeug aufgezeichneten tatsächlichen Energiebedarf überein?
- Erstellung einer Optimierungsroutine für den energieoptimierten Fahrplan. Die Optimierung soll Grundlage einer (üblicherweise jährlichen) Fahrplanerstellung sein, greift aber bei Abweichungen (durch z.B. Langsamfahrstellen oder verspätete Übergabe an der Staatsgrenze) zur Energiebedarfsoptimierung in Echtzeit in die aktuellen Pläne ein.
- Erstellung eines Demonstrators für Fahrempfehlungen an die TriebfahrzeugführerInnen (Teilsystem auf Triebfahrzeugen). Präsentation eines funktionsfähigen mobilen Devices mit Anzeige der Fahrempfehlungen.
- Konzipierung eines Demonstrators für die Betriebsführungszentrale. Der Disponent kann so mehrere Züge in seinem Teilbereich des ÖBB-Streckennetzes direkt und koordiniert (aufgrund der vorgeschlagenen Ergebnisse der Optimierung) beeinflussen.
- Konzipierung eines Demonstrators für die Energieleitstelle. Der Dispatcher wird mittels Ampelsystem auf eine drohende Überlastung hingewiesen.
- Erarbeitung von Empfehlungen für den energieoptimierten Betrieb.

### 2.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt EcoRailNet behandelt vorrangig den Schwerpunkt 3.1 – Smart Energy Forschung und Entwicklung. Dieser Schwerpunkt zielt auf das Zusammenspiel einzelner Systeme im Gesamtkontext auf Basis intelligenter Energiesysteme ab. EcoRailNet findet sich in diesem Schwerpunkt wieder, da das Ziel des Projekts darin bestand, die verschiedenen Netzsimulationen von Bahnstromversorgungsnetz und Bahnbetriebsführung zu verknüpfen, um eine Gesamtoptimierung des Bahnbetriebes unter Berücksichtigung der Stromversorgung zu erreichen. Somit definierte sich das Projektziel auch als eine Effizienzsteigerung mittels systemintegrativer Ansätze bei der Energieverteilung und dem Energieeinsatz. Denn die ÖBB sind durch eigene Kraftwerke sowohl Erzeuger von Strom, als auch Kunde des öffentlichen Stromnetzes und dabei – konzernweit gesehen – ein Abnehmer mit enormem Energiebedarf.

Der Subschwerpunkt „3.1.1 Netze und Systemintegration“ umfasst die Erforschung der Möglichkeiten für die Integration von Systemen. Im vorliegenden Fall wurde versucht, die bisher getrennt simulierten und optimierten Netze von Bahnstrom (Demand Side Management, Lastspitzenreduktion, etc.) und Netzbetrieb (Fahrplan samt allen zugehörigen Aspekten) zu einem Netz zu vereinen, um hier gezielt durch gemeinsame Simulation und einen Optimierungsalgorithmus einen energieoptimierten Fahrplan (tagesaktuell) zu erhalten.

Da die ÖBB über ein eigenes österreichweites Bahnstromnetz verfügen, sieht sich das Projekt im Themenfeld von „Methoden und Technologien zur Einbindung des Energiebedarfs elektrischer Verkehrssysteme in das regionale und überregionale Leistungsmanagement“ angesiedelt.

Ein weiterer Subschwerpunkt, der im Projekt behandelt wird, ist 3.1.2 – Smart Grids-Modellregionen. Der Themenschwerpunkt soll dazu beitragen, verschiedene Wege hin zu Smart Grids zu entwickeln. Dabei sieht sich die ÖBB im übertragenen Sinne als „Modellregion“, da im Projekt sehr viele Endabnehmer (die einzelnen Züge) unter den Gesichtspunkten Pünktlichkeit und Sicherheit in ihrem Verbrauch so optimiert werden sollten, dass sich eine netzweite Energiebedarfsreduktion verglichen mit heutiger Sicht ergibt. Hier findet sich der Gedanke des Themenschwerpunkts wieder, wo die Entwicklung von Konzepten zur Analyse von lokalen und regionalen Veränderungen der Versorgungsaufgabe angedacht ist.

Weiters wirkt EcoRailNet durch die gesteigerte Energieeffizienz vor allem im Umweltbereich. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Entschärfung der immer wieder auftretenden Strom-Engpasssituationen, da durch den effizienteren Energieeinsatz weniger Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss. Dadurch kann zusätzlich natürlich auch eine nachhaltige CO<sub>2</sub>-Reduktion ermöglicht werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Tatsache, dass durch einen bahnstrom- und betriebsoptimierten Fahrplan die Trasse besser nutzbar wird, wodurch mehr Verkehr auf der Schiene möglich wird. So würde sich durch die Optimierung sogar ein geringer kapazitätssteigernder Effekt ergeben.

### 2.4 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1 zeigt einen Überblick der Arbeitspakete. Die Basisdatenerfassung (AP1) sowie die Modellierung (AP2) und Schnittstellendefinition wurden vorerst noch getrennt in den Bereichen Energie und Betriebsführung bearbeitet, um die Voraussetzungen für eine Kopplung der Systeme zu schaffen. Die Simulationstechniken einerseits sowie die Optimierung (AP3) andererseits führten die beiden bisher getrennten Welten zusammen. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen sowohl für den täglichen (Online-) Betrieb als auch für den langfristigen (Offline-)Betrieb erstellt (AP4). Ein weiteres wichtiges Arbeitspaket war die Definition, Entwicklung und Umsetzung des Demonstrators, mit Hilfe dessen die TriebfahrzeugführerInnen letztendlich die Ergebnisse der Optimierungen anhand einfacher Anweisungen umsetzen können, um ihren Zug energie- und fahrplanoptimiert zu steuern (AP5).

### 2.5 Verwendete Methoden

Zur Implementierung der Algorithmen und Demonstratoren kamen Ada- bzw. Java-Entwicklungsplattformen zum Einsatz. Als mobiles Endgerät am Triebfahrzeug kam ein Tablet-PC auf Android-Basis zum Einsatz. Für den Datenaustausch der Basisdaten und der Übertragung von Informationen an den Triebfahrzeugführer wurden eigene Schnittstellen implementiert.

Die Ermittlung von Optimierungsinformationen beruht auf der Kronecker-Algebra. Zur Verifikation der Modellierung, der Optimierung sowie zur Demonstration der Funktionalität der Module des mobilen Endgerätes auf dem Triebfahrzeug wurden Testfahrten auf der im Projekt definierten Teststrecke durchgeführt.

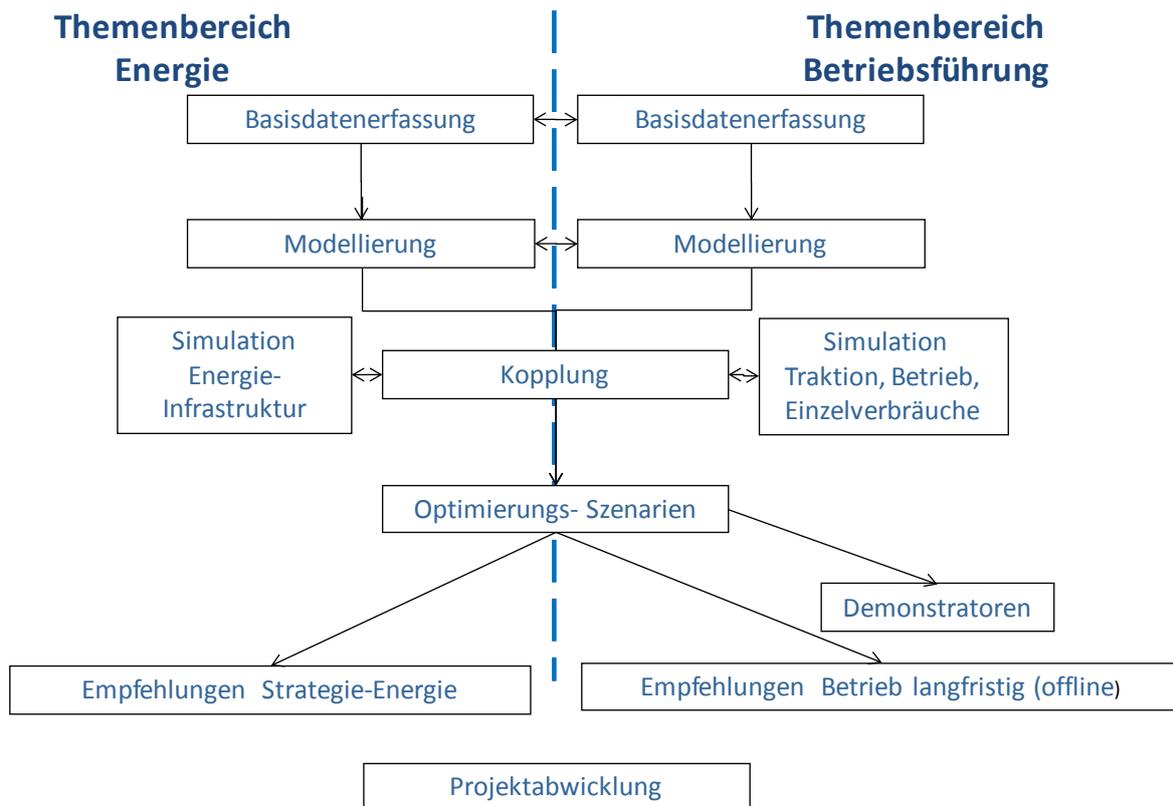


Abbildung 1: Lösungsansatz für das Projekt EcoRailNet

## 3 Inhaltliche Darstellung

Die Inhalte der Projektarbeit werden anhand der Arbeitspakete dargestellt.

### 3.1 AP1: Basisdatenerfassung

Um die Funktionalität und Nutzung der folgenden Arbeitspakete zu ermöglichen, musste eine große Anzahl an Daten aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden. Im Allgemeinen kann man diese Daten in zwei große Gruppen unterteilen: Zum Einem werden für die Berechnung der optimalen Fahrstrategie statische Daten genutzt, welche sich während der Nutzung der Applikation nicht bzw. nur zu bestimmten Zeitpunkten ändern. Zum anderen werden auch dynamische Daten benötigt, welche sich zum Zeitpunkt der Nutzung gemäß der jeweiligen betrieblichen Situation ändern können.

Eine große Herausforderung dabei ist die zeitnahe bzw. zeitgerechte Zurverfügungstellung der Daten. Statische Daten wie z.B. die Streckentopologie bedürfen einer einmaligen Aufbereitung, dynamische Daten wie z.B. Ankunfts-/Durchfahrtszeiten (bei Abweichungen vom Regelbetrieb) oder Zuggewichte müssen immer wieder neu ermittelt und aufbereitet werden.

## 3.2 AP2: Modellierung und Simulation

### 3.2.1 Betriebliche Simulation

Basierend auf existierenden physikalischen Formeln wurde die betriebliche Simulation implementiert. Damit kann in einem Schrittverfahren eine bestimmte Zugfahrt simuliert werden. Dabei gehen verschiedene Faktoren in die Berechnung ein, z.B.:

- Gradienten der Strecke
- Kurven-, Luft- und andere Widerstände
- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Länge und Gewicht des Zuges
- Reisegeschwindigkeit des Zuges
- zur Verfügung stehende Antriebskraft (triebfahrzeugspezifisch)
- zur Verfügung stehende Bremskraft (triebfahrzeugspezifisch)
- Energie-Rückgewinnungsfaktor der Rekuperationsbremse

In einem Schritt werden dabei ausgehend von Zeit und Geschwindigkeit des vorherigen Schrittes Zeit und Geschwindigkeit des nächsten Schrittes berechnet. Die Schrittweite kann dabei frei gewählt werden, wobei gewöhnlich 1 Meter praktikable Ergebnisse liefert, die einerseits für die gesamte Strecke schnell genug berechnet werden können und andererseits genügend genaue Daten für Fahrempfehlungen liefern.

Zwischen den aus den ersten Testfahrten gewonnenen Daten und den berechneten Fahrten konnte eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden (vgl. Abbildung 2).

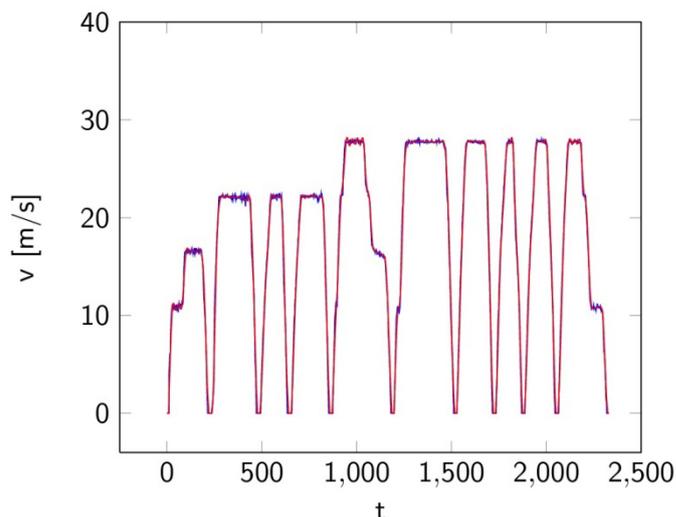


Abbildung 2: Vergleich der berechneten Fahrt (rot) mit der Testfahrt (blau)

### 3.2.2 Simulation des Bahnstromnetzes

Die Simulation des elektrischen Netzes erfolgte im Rahmen des Projekts mit dem Netzberechnungspaket für Bahnnetze  $\mu$ PAS (Power Application Software), welches die rechnerische Behandlung von z.B.

Lastfluss, Kurzschlussleistung im Bahnstromleitungsnetz und im Oberleitungsnetz mit örtlich vorgegebenen Streckenlasten ermöglicht. Dieses Softwaretool wird bei der ÖBB-Infrastruktur AG für Ausbauplanungen und langfristige Maßnahmen im Bahnstromnetz eingesetzt. Um die Anforderungen an die Simulationsaufgaben in Rahmen des Projekts zu erfüllen, war es notwendig, den zeitintensiven Aufwand für die Aufbereitung und Eingabe der Daten zu automatisieren. Insbesondere ist eine Übersicht über den aktuellen Netzzustand entscheidend, um auch einen Ausfall von Teilen der elektrischen Energieversorgung zu erfassen und bei der Berechnung der optimierten Zugfahrt zu berücksichtigen. Zur zyklischen Übergabe dieser Daten wurde im Rahmen des Projekts eine Schnittstelle zur Energieleitstelle Meidling implementiert. Im Minutentakt wird der elektrische Netzzustand als topologisches Abbild aus dem Energieleitsystem in  $\mu$ PAS übernommen. Dabei werden aber nicht die einzelnen Schalter erfasst, sondern nur die für die Simulation relevanten Informationen, zum Beispiel ob eine Strecke ein- oder zweiseitig gespeist wird. Damit bleibt die Datenmenge überschaubar. Fehlerhafte oder nicht übernommene Leitungszustände werden in der Simulationsdarstellung eingefärbt und sind somit leicht identifizierbar.

Durch die Kopplung der betrieblichen mit der elektrischen Netzsimulation sollen mögliche Engpässe im elektrischen Netz wie z.B. drohende Anlagenüberlastung oder Unterschreitung der minimalen Spannungsgrenzen, aufgezeigt werden.

Dafür wird von der betrieblichen Zugfahrtsimulation zyklisch eine Vorschaurechnung in der elektrischen Netzsimulation angestoßen. Der von der Zugfahrtsimulation optimierte Fahrplan wird für ein Vorschauenfenster von z.B. einer halben Stunde in gleichmäßige Zeitintervalle unterteilt. Für jeden dieser Zeitschritte übergibt die Zugfahrtsimulation für alle zu diesem Zeitpunkt verkehrenden Züge die Position sowie die Leistungsanforderung.

### 3.3 AP3: Optimierung

Aufbauend auf das Arbeitspaket 2 konnten energieoptimierte Zugfahrten errechnet werden, vorerst für einzelne Züge, in einer späteren Phase für mehrere Züge gemeinsam. Durch Testfahrten wurde der Nachweis erbracht, dass sowohl die Modellierung als auch die simulierten Zugfahrten der Realität entsprechen. Weitere Testfahrten zeigten, dass die vorberechneten energieoptimierten Zugfahrten tatsächlich von den Triebfahrzeugführern „nachgefahren“ werden können und die dafür benötigte Energie dem vorberechneten Wert entspricht.

In den betrachteten Simulationsfahrten war eine Einsparung von 10% Energie ohne Anrechnung der Rekuperationsenergie festzustellen; mit Anrechnung der Rekuperationsenergie lag das Einsparungspotenzial bei etwa 3%.

#### 3.3.1 Einzelfahrtoptimierung

Eine optimale Einzelfahrt eines Zuges kann sich aus vier unterschiedlichen Phasen zusammensetzen:

- Beschleunigungsphase
- Haltenphase (gleiche Geschwindigkeit)
- Rollphase (ohne Energiezufuhr)
- Bremsphase (ggfs. mit Energierückspeisung)

Will man für eine bestimmte Strecke eine optimale Einzelfahrt bestimmen, muss man daher die Strecke für die Berechnung so in Teilstrecken (im Folgenden „Regime“ genannt) zerlegen, dass innerhalb jedes Regimes die zulässige Höchstgeschwindigkeit und der Gradient konstant sind.

Für jedes dieser Regime ist dann eine optimale Fahrt, bestehend aus einer Teilmenge der oben genannten vier Phasen, zu eruiieren.

Ein Beispiel: Die optimale Einzelfahrt ohne Energierückspeisung beim Bremsen für die Teststrecke Wien – Bruck a.d. Leitha wurde wie in Abbildung 3 errechnet. Der Energiebedarf bei der typischen (roten) Fahrt ergibt sich zu 177.3 kWh (dieser Wert wurde bei den Testfahrten validiert). Die optimale Fahrt (grün) benötigt hingegen nur 160.2 kWh. Daher ergibt sich eine potentielle Einsparungsmöglichkeit von 9,7 %.

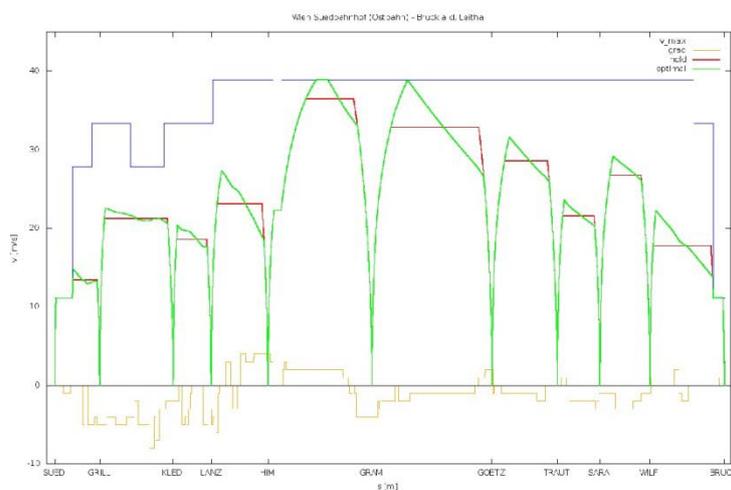


Abbildung 3: optimale Einzelfahrt für die Teststrecke, ohne Energierückspeisung

In der Praxis gibt es einige Randbedingungen, die bei der Implementierung berücksichtigt werden mussten, damit die Fahrempfehlungen auch praktisch anwendbar sind, z.B.

- diskretes Geschwindigkeitsraster in 5 km/h-Schritten (0 km/h, 5 km/h, 10 km/h, ...)
- eine minimale Phasendauer von mind. 30 Sekunden, damit der Triebfahrzeugführer nicht ständig die Fahrempfehlungen kontrollieren muss.

### 3.3.2 Gesamtoptimierung

Basierend auf der Kronecker Algebra und der Einzelfahrtoptimierung wurde von der TU Wien ein Algorithmus entwickelt, der für ein System aus mehreren Zügen Fahrkurven berechnet, mit deren Hilfe der Energiebedarf des Gesamtsystems minimiert werden kann. Mehrere interagierende Züge (z.B. Auflaufen eines schnelleren Zuges auf einen langsameren, Kreuzen,...) können so gleichzeitig optimiert werden. Dadurch kann der gesamte Fahrplan im Falle einer Verspätung eines Zuges dynamisch so angepasst werden, dass unter Berücksichtigung der Pünktlichkeit weiterhin energieoptimal gefahren werden kann.

Ein Beispiel: Ein typisches Problem aus der Praxis des Eisenbahnbetriebs stellt das „Einfädeln“ eines Zuges zwischen zwei anderen in derselben Richtung verkehrenden Zügen dar (Abbildung 4).

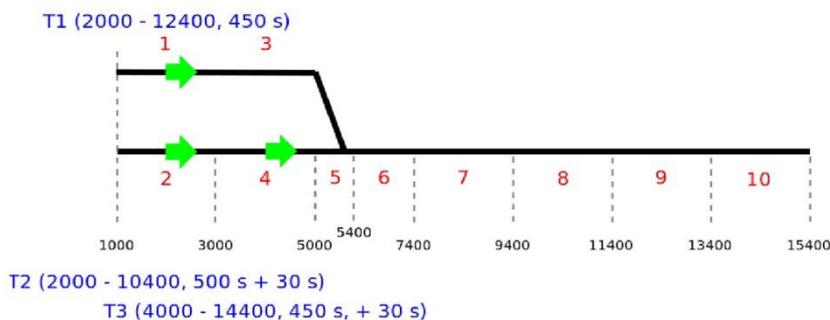


Abbildung 4: Einreihen eines Zuges zwischen zwei anderen.

Hier ergibt sich durch Anwendung der Kronecker Algebra folgender Graph (Abbildung 5), wobei rote Knoten für zu vermeidende Verklemmungen (engl. Deadlocks) stehen. Die Kronecker Algebra ermöglicht, auch solche Verklemmungen automatisiert zu erkennen und zu vermeiden.

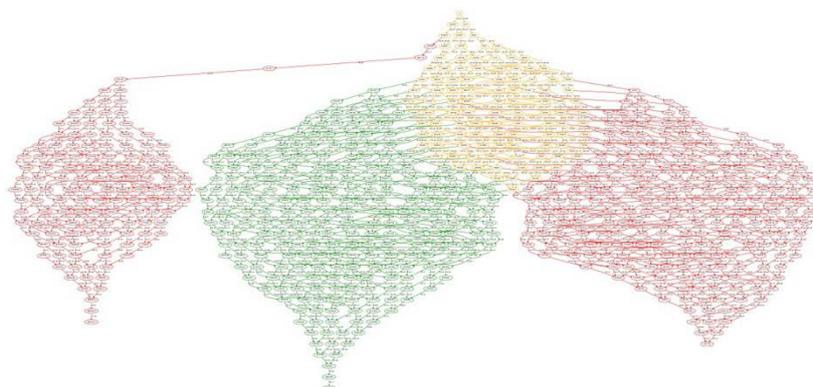


Abbildung 5: Kronecker Graph mit Deadlocks (rot) und möglichen Fahrten (grün).

Die optimale Lösung für dieses Beispiel ist in der Abbildung 6 skizziert (rot ... optimale Lösung, blau ... gegenseitig unbeeinflusste Fahrten).

Das Einsparungspotenzial lässt sich für die Gesamtoptimierung leider nicht genau beziffern. Um es zu ermitteln, ist eine sehr umfangreiche Simulation und begleitend ein ausgedehnter Testbetrieb erforderlich, der über das in diesem Projekt Machbare deutlich hinausgeht. Jedenfalls können der an der TU Wien ausgearbeitete Algorithmus und das implementierte Software-Paket als Basis für eine praktische Erprobung herangezogen werden.

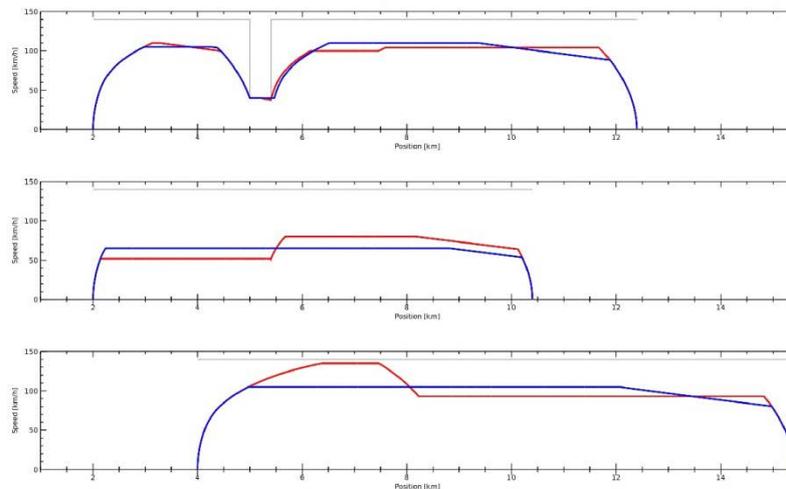


Abbildung 6: nächster Schritt: optimale Lösung (rot)

Die grundsätzliche Methodik der Optimierungsrechnung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Der Optimierungsalgorithmus der TU Wien berechnet die optimale Fahrkurve für alle im System vorhandenen Züge, unter Einhaltung der Rahmenbedingungen Sicherheit, Pünktlichkeit und Fahrkomfort. Das Ergebnis wird mittels elektrischer Netzsimulation und der Energieverfügbarkeit auf Zulässigkeit überprüft.

Ist der berechnete (optimierte) Betrieb aufgrund der Energienetzauslastung nicht durchführbar, so wird dieser Schritt mit dem nächstbesten Ergebnis in Bezug auf den Gesamtverbrauch ermittelt und die Daten wiederum an  $\mu$ PAS übergeben.

Sollte keine Lösung den Anforderungen entsprechen, können der Fahrplan, aber auch physikalische Einflussgrößen (z.B. Beschleunigung mit maximaler Kraft) verändert werden, um ein neues "Optimum" für die Fahrweise der berücksichtigten Zugfahrten zu ermitteln.

## 3.4 AP4: Empfehlungen

Für ein energiesparendes Fahren gibt es seit einigen Jahren bereits Schulungen für ÖBB-TriebfahrzeugführerInnen. Zusätzlich zu diesen allgemein gültigen Empfehlungen wurden von der TU Wien aufgrund der vielen durchgerechneten Testfälle eine Reihe von infrastrukturellen Empfehlungen erarbeitet. Vieles davon könnte allerdings nicht ad hoc eingeführt werden, sondern bedarf längerfristiger Planungen. Einige Beispiele:

- Das Einführen von Bedarfshalten für Personenzüge (auf Nebenstrecken) könnte ca. 10% Energie sparen. In Zeiten mit weniger Fahrgastaufkommen (z.B. Mittagszeit) könnte so an einigen Haltestellen das vollständige Abbremsen und Wiederanfahren vermieden werden. Bedarfshalte setzen allerdings eine gewisse Infrastruktur voraus: einige Garnituren mit „Halt“-Druckknöpfen existieren; es müssen allerdings auch die Haltestellen mit entsprechenden Signalisierungsmöglichkeiten ausgerüstet sein.
- Eine Reduktion der Aufenthaltsdauer (bei wenig Fahrgastaufkommen) in den Bahnhöfen und Haltestellen kann helfen, Energie zu sparen. Z.B. könnte der Zug um 15 sec. später ankommen;

durch diese zusätzliche Zeit kann die Geschwindigkeit im vorherigen Abschnitt ein wenig reduziert werden, was wiederum weniger Energie benötigt.

- Minimale Fahrplananpassungen: bei Bahnhöfen mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben in den Abschnitten davor und danach (z.B. 140 km/h und 80 km/h) könnte eine kleine Verschiebung des Bahnhofs Aufenthaltes helfen, die Geschwindigkeit in beiden Abschnitten anzupassen. Durch die Reduktion der Höchstgeschwindigkeit wird wieder weniger Energie benötigt.

### 3.5 AP5: Demonstratoren

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Testfahrten und den Diskussionen mit den TriebfahrzeugführerInnen bzw. dem Leitstellen-Personal wurden die Anforderungsprofile der einzelnen Systemkomponenten entsprechend angepasst. Als Basis für das Design und die Realisierung der Systemkomponenten der Demonstrations-Konfiguration wurde ein Architekturkonzept spezifiziert und realisiert.

Für das mobile Endgerät auf dem Triebfahrzeug wurde eine Benutzeroberfläche entworfen und als Prototyp implementiert, welche die Projektziele (nach Maßgabe der Datenqualität) bestmöglich unterstützt.

In Abbildung 7 ist die Systemarchitektur des Projekts EcoRailNet zu sehen. Daraus ist erkennbar, dass der ‚Train-Manager‘ (ERN-Server bzw. EcoRailNet-Server) das zentrale Element von EcoRailNet darstellt. Der EcoRailNet-Server besteht aus verschiedenen Modulen: Die wesentlichen Komponenten sind der ‚Train-Manager‘, die Daten-Module und das ODS („Optimal Driving Strategy“, das Optimierungsmodul der TU Wien). Die Module sind auf dem „EcoRailNet-Server“ installiert und werden zur Aufbereitung der Daten, zur Berechnung der Fahrempfehlungen und zum Datenaustausch genutzt. Im Wesentlichen führen die auf dem EcoRailNet-Server installierten Module folgende Operationen aus:

1. Verwaltung statischer Daten: Der ‚Train-Manager‘ nutzt selbst statische Daten, und stellt damit dem ODS statische und dynamische Daten zur Verfügung (Fahrstreckentopologie und Zugdaten).
2. Verwaltung dynamischer Daten: Die Positionsbestimmung des Zuges erfolgt dynamisch anhand von Geodaten entlang der Strecke. Weiters koordiniert der ‚Train-Manager‘ den Empfang applikationsrelevanter Daten von der Schnittstelle zu ARAMIS. Die aktuelle Implementierung basiert auf einem Logger, der diese Daten sammelt und in lesbarer Form speichert und bereitstellt.
3. Empfang der Zugnummer und der Positionsdaten von mobilen Endgeräten
4. Mapping von Geodaten auf die aktuelle Zug-Position auf der Strecke: Für die Generierung von energieoptimalen Fahrempfehlungen werden Positionsangaben (Latitude, Longitude) vom mobilen Endgerät an den ‚Train-Manager‘ gesendet. Im ‚Train-Manager‘ werden diese Daten mit

Hilfe einer Lookup-Tabelle verglichen. Jener Streckenpunkt, der den übergebenen Koordinaten am nächsten ist, wird dem Algorithmus vom ‚Train-Manager‘ bereitgestellt.

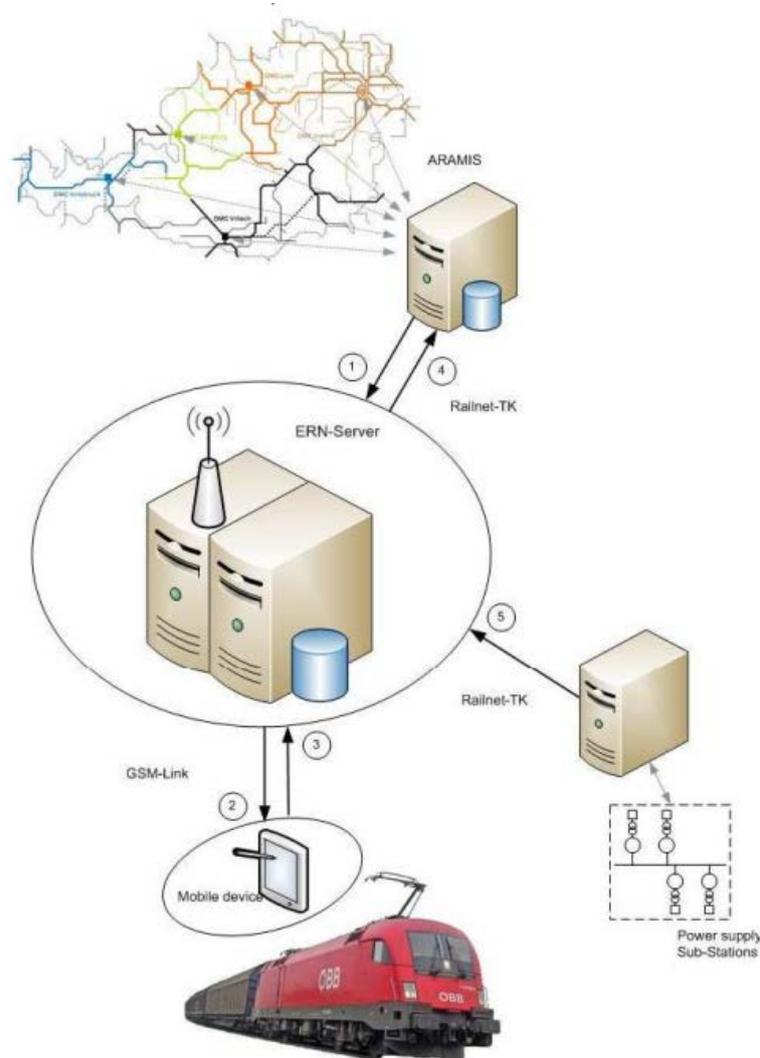


Abbildung 7: Systemarchitektur des Demonstrators auf dem Triebfahrzeug

5. Berechnung der optimalen Fahrt für die jeweilige Zugnummer mittels ‚Ada2Java Wrapper‘ und dem TU-Algorithmus (ODS):  
Der TU Algorithmus ODS (Optimal Driving Strategy) wurde in der Programmiersprache Ada bereitgestellt, alle restlichen Komponenten des Systems jedoch in Java implementiert. Aufgrund dieser zwei unterschiedlichen Programmierumgebungen wurde ein Kommunikationsdesign auf Software-Niveau über ein natives Software-Interface entworfen. Anfragen vom ‚Train-Manager‘ und Ergebnisse vom ODS-Algorithmus können so auf direktem Wege übertragen werden. Verwendetes Software-Framework: GNAT Ada-Java Interfacing Suite von AdaCore ([http://docs.adacore.com/gnat-ajis-docs/html/Getting\\_Started\\_with\\_GNAT-AJIS.html](http://docs.adacore.com/gnat-ajis-docs/html/Getting_Started_with_GNAT-AJIS.html)). Die Implementierungsarbeiten umfassten u.a. die Realisierung verschiedenster Kommunikationsworkflows, Integration aller Komponenten, Tests des Demonstrator 1-

Gesamtsystems.

6. Kommunikation mit ARAMIS:

Das System ARAMIS (Advanced Railway Automation, Management and Information System), welches bei den ÖBB als dispositives Betriebsleitsystem im Einsatz ist, ist eine wesentliche Quelle für die im Projekt benötigten und genutzten dynamischen Daten in Bezug auf die jeweils aktuelle betriebliche Situation (z.B. Fahrplan-Änderungen, Verspätungen). Über standardisierte UIC-Messages können Daten aus ARAMIS abgefragt werden.

7. Versenden der Fahrempfehlung auf die mobilen Endgeräte

Am mobilen Endgerät werden dem Triebfahrzeugführer die notwendigen Informationen angezeigt. Im Projekt kam ein Tablet mit dem Betriebssystem Android zum Einsatz. Eine ständige Datenverbindung zwischen dem mobilen Endgerät und dem ‚Train-Manager‘ ist für die Berechnung einer optimalen Fahrstrategie zwingend erforderlich. Realisiert wurde dies mit Hilfe einer VPN-Verbindung (GSM-Link) zwischen mobilem Endgerät und dem EcoRailNet-Server.

Alle Komponenten des EcoRailNet-Servers werden über eine Open Source Integrations-Plattform gestartet und koordiniert. Beim Start werden die vorhandenen statischen Daten geladen. Nach dem Start der Applikation „EcoRailNet“ am mobilen Endgerät kann man sich mit „Name“, „Passwort“ und der genutzten „trainID“ (Zugnummer) authentifizieren. Entsprechend der „trainID“ werden die passenden Daten des Zuges und des jeweiligen Fahrplans ausgewählt. In weitere Folge schickt das mobile Endgerät zyklisch (Default: alle 5 Sekunden) einen Request an den ‚Train-Manager‘. Die im Request enthaltenen Parameter werden im ‚Train-Manager‘ für den ODS aufbereitet und dem ‚Ada2Java-Wrapper‘, übergeben. Nachdem der ODS eine Fahrempfehlung berechnet hat, übergibt er das Ergebnis wieder dem Ada2Java-Wrapper, welcher dieses dem ‚Train-Manager‘ bereitstellt. Dieser bereitet die Fahrempfehlung auf und sendet sie dem mobilen Endgerät. Dort wird dem Triebfahrzeugführer die Fahrempfehlung angezeigt. Abbildung 8 zeigt einige Beispiele der Benutzeroberfläche, z.B. im ersten Bild links oben: Beschleunigen (A – Accelerate) auf 15 km/h, dann Geschwindigkeit halten (H – Hold) bis zu km 33.273. oder im dritten Bild: Beschleunigen (A) auf 40 km/h, dann Rollen (R) bis km 33.351.

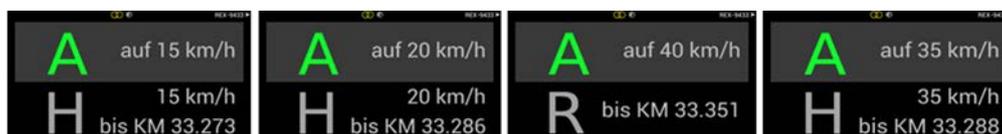


Abbildung 8: Beispiele für einen Ablauf von Fahrempfehlungen auf dem mobilen Endgerät

Ein Demonstrator in der Energieleitstelle ist erst nach der tatsächlichen Implementierung der Schnittstelle TU-Tool zu  $\mu$ PAS sinnvoll möglich. Hier ist daran gedacht, den  $\mu$ PAS - Simulationsrechner als abgesetzten Computerarbeitsplatz in der Warte der Energieleitstelle zu installieren. Wenn bei der laufenden Netzüberwachung kritische Parameter der Energieversorgung erreicht werden, wird der Dispatcher mittels Ampelsystem am  $\mu$ PAS-Simulationsrechner auf eine drohende Überlastung

hingewiesen. Die betroffenen Netzteile werden im Netzbild eingefärbt (gelb: Warngrenze, rot: Alarmgrenze). Der Dispatcher kann so auf einen Blick Probleme identifizieren und frühzeitig mit der Zugdisposition Gegenmaßnahmen einleiten.

### 3.6 AP6: Projektmanagement

Das Arbeitspaket 6 lief über die gesamte Projektlaufzeit. Zu den Aufgaben zählte u.a.:

- Im Rahmen des Projektmanagements wurde zu Projektbeginn der Konsortialvertrag ausgearbeitet und finalisiert.
- Die Schaffung eines Kernteams gegen Ende des ersten Projektjahres, bestehend im Wesentlichen aus je einem Mitglied pro Fachgebiet, ermöglichte die rasche und kompetente Abarbeitung aktueller Fragestellungen, sowohl fachlicher als auch organisatorischer Natur.
- Eine digitale Projektplattform für Datenaustausch und -archivierung sowie zur Projektkommunikation wurde erstellt. Dafür wurde die ÖBB-eigene SharePoint-Lösung gewählt. SharePoint verfügt neben allgemeinen Verwaltungsmöglichkeiten auch über eine Benachrichtigungsfunktion, wo man per email über neu hochgeladene Dateien informiert wird. Alle Projektteilnehmer erhielten Zugang zur Plattform.
- Weiters bestand die Projektmanagementarbeit aus Abstimmung der Kommunikation zwischen den Partnern, die Organisation von Besprechungen, Erstellung und Verteilung diverser Protokolle und Statusberichte, Sammlung und Aufbereitung von Informationen für den Zwischen- und den Endbericht bzw. für die zugehörigen Abrechnungen.
- Im Anschluss an die Zwischenabrechnung wurden beim Fördergeber eine kostenneutrale Projektverlängerung sowie zwei Kostenumschichtungen beantragt.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Entsprechend der Ziele des Projekts wurden die Grundlagen geschaffen; bei Vorhandensein aller Rahmenbedingungen wäre die Implementierung möglich. Eine Weiterentwicklung ist mit den Unternehmensstrategien und anderen energieeffizienzsteigernden Maßnahmen im Schienenverkehr abzustimmen und bedarf der Managemententscheidung. Hierbei sind sicherlich einige der Erkenntnisse aus dem Projekt zu berücksichtigen, beispielsweise:

- Komplexität des Systems Bahn: Im Laufe der Projektarbeit wurde allen Beteiligten klar, dass es sehr komplexe Zusammenhänge innerhalb des Bahnbetriebs und der Bahninfrastruktur gibt. Viele Daten und Informationen, die als „ohnehin vorhanden“ angesehen werden, ließen sich nicht oder nicht sofort in der gewünschten Form weiterverarbeiten. Weiters bedeuten die strengen rechtlichen Reglementierungen im Bahnbetrieb immer eine Einschränkung bei neuen Prozessen.
- Langfristigkeit: Wie erwähnt, ist das System Bahn sehr „träge“, was kurzfristige Änderungen betrifft. Die Zulassung neuer Prozesse, Komponenten, etc. kostet viel Geld und dauert lange, oftmals Jahre. Überdies muss berücksichtigt werden, dass Beschaffungen (z.B. eines neuen Triebfahrzeug- oder Wagentyps) sehr langfristige Planungen und Projektlaufzeiten erfordern.

Hier müssen zukünftige Anforderungen mit heutiger Technologie in Übereinstimmung gebracht werden, Zulassungen und Typisierungen müssen erreicht werden. Oftmals müssen gewünschte Zusatzleistungen aus Kostengründen gekürzt oder gestrichen werden. Für das Forschungsprojekt bedeutet dies als Beispiel etwa Folgendes: um die Fahrempfehlung von der EcoRailNet-Zentrale an die TriebfahrzeugführerInnen schicken zu können, bedarf es der standardmäßigen Ausrüstung aller Triebfahrzeuge mit Endgeräten samt notwendiger Datenübertragungstechnik. Sollte dies kostenmäßig genehmigt werden und in der nächsten Beschaffung für Triebfahrzeuge berücksichtigt werden, würden mindestens 10-15 Jahre bis zur Auslieferung vergehen. Für umfangreichere Änderungen in der Zuglenkungssoftware ARAMIS sind ebenfalls mehrere Jahre bis zur Inbetriebnahme anzusetzen.

- **Umwelteinflüsse:** die Optimierung der Fahrgeschwindigkeiten für die einzelnen Züge baut auf geometrischen Grunddaten sowie physikalischen Grundprinzipien auf. Leider sind viele Einflussfaktoren während der Fahrt, die der Triebfahrzeugführer bewusst oder unbewusst in seiner täglichen Tätigkeit berücksichtigt, nicht einfach modellierbar. So verändert sich beispielsweise (wie auch im Straßenverkehr) das Bremsverhalten eines Zuges bei regennassen Schienen erheblich. Ein erfahrener Triebfahrzeugführer kann diesen Umwelteinfluss natürlich in sein Fahrverhalten einfließen lassen. Weitere Umwelteinflüsse, die nur schwer im Optimierungsalgorithmus berücksichtigt werden können, betreffen Wind oder Schnee und Eis. Für eine ansatzweise Berücksichtigung und Einspeisung dieser Faktoren in die Software bzw. in die Berechnungen müsste eine Vielzahl von Testfahrten über einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehen und statistisch analysiert werden. Z.B. wären Daten aus den Wetterdiensten einzubinden, damit der Optimierungsalgorithmus die aktuelle Wettersituation berücksichtigen kann. Dieser Ansatz ist aus heutiger Sicht zwar grundsätzlich technisch möglich, aber im Rahmen einer flächendeckenden Umsetzung eher als langfristige Vision zu sehen.
- **Human factors:** Aus betrieblicher Sicht können für die DisponentInnen Entscheidungen zu treffen sein, wo bzw. bei welcher Situation ein Zug aus speziellen Gründen vorgereiht werden muss. Dies kann den Energiebedarf in dieser Situation extrem verzerren, kann aber ebenfalls nicht einfach in den Algorithmen abgebildet werden. In diesem Fall muss die Optimierung mit diesen neuen Randbedingungen neu gestartet werden, um die neue Situation aus Energiesicht bestmöglich abzuwickeln. Die energieoptimale Abwicklung größerer Streckenbereiche bzw. des gesamten österreichischen Streckennetzes ist also als hochdynamisch anzusehen; mit Störungen des vorausberechneten energieoptimalen Grundzustandes (Fahrplanes) ist also ständig zu rechnen.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Im Projekt EcoRailNet wurden von Beginn an viele ambitionierte Ziele verfolgt. Als Gesamtziel war die Verknüpfung der Netzsimulationen von Bahnstromnetz und Bahnbetrieb zur Optimierung des Bahnbetriebs unter Berücksichtigung der Stromversorgung vorgesehen. Einige der Detailziele konnten erreicht werden, andere konnten nur konzeptuell betrachtet werden. Die Vision ist für alle Projektpartner

aber weiterhin, dass die im Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse zukünftig als Grundlage für die Einführung eines optimierten Zugsteuerbetriebs verwendet werden können.

Wenn man die Gesamtkette der Maßnahmen betrachtet, damit solch ein optimierter Steuerbetrieb möglich wird, wären folgende Punkte noch genauer zu untersuchen:

- Übertragung der Informationen der Betriebsführungszentrale zu den TriebfahrzeugführerInnen: hier ist aus technischer Sicht zu beachten, dass die Übertragung der Informationen über gesicherte Wege gewährleistet sein muss. Als zweiter Gesichtspunkt ist sicherlich eine Untersuchung notwendig, wie die zusätzlichen Informationen dem Triebfahrzeugführer präsentiert werden können, ohne ihn zu überlasten. Hier wären verschiedene mögliche Visualisierungsarten wissenschaftlich zu betrachten (Eignung von optischen oder akustischen Zeichen? Art und Häufigkeit der Visualisierung?)
- Die Kopplung von Bahnstromnetz und Bahnbetrieb muss ausgehend von Ergebnissen von EcoRailNet umgesetzt werden. Die Implementierung der erstellten Konzepte würde hier der nächste Schritt sein, um detailliert weiterarbeiten zu können.
- Die Optimierungsalgorithmen haben in den im Projekt behandelten Testfällen gut funktioniert. Für aussagekräftige Bewertungen werden allerdings sicher repräsentative, großräumige Tests notwendig sein, wo viele interagierende Züge gleichzeitig zu behandeln sind. Damit kann auch die Kopplung zum Bahnstromnetz ausgiebig getestet werden, da es nur bei Betrachtung sehr vieler Züge gleichzeitig überhaupt zu Engpässen im Stromnetz kommen kann. Da es außerdem im österreichischen Netz kaum Strecken gibt, die rein auf Personenverkehr ausgelegt sind, die Züge im Mischverkehr aber sehr verschiedene Charakteristika aufweisen, ist hier eine Ausweitung des Algorithmus auf Güterzüge bzw. auf Mischbetrieb von Personen- und Güterzügen notwendig.
- Für die optimalen Intervalle zwischen zwei Neuberechnungen sind weitere Überlegungen anzustellen. Im Projekt wurden regelmäßige Neuberechnungen realisiert (ein Zeitintervall von 5 Sekunden hat sich für die Tests als optimal herausgestellt). Dieser Parameter hängt aber von mehreren Faktoren ab wie der aktuellen Geschwindigkeit, der Streckentopologie, etc. Im Falle einer Neuberechnung lediglich im Anlassfall (z.B. bei Verspätungen) würde der Datentransfer natürlich massiv reduziert; hier müssten aber ebenfalls geeignete Parameter zur Optimierung erarbeitet werden.
- Alle für das Projekt benötigten Daten müssen in eine international normierte, konsistente Form (z.B.: railML) gebracht werden, damit der Datenaustausch vereinfacht wird, z.B. Daten von Fahrplan, Strecke, Signalstellungen, etc.

## 6 Kontaktdaten

### ProjektleiterIn:

DI Dr. Michaela Haberler-Weber  
ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3, 1020 Wien  
0664/88425195  
[www.oebb.at](http://www.oebb.at)

### Weitere Projektpartner:

ÖBB-Produktion GmbH  
Langauergasse 1, 1150 Wien

Thales Austria GmbH  
Handelskai 92, 1200 Wien

Technische Universität Wien  
Institut für Rechnergestützte Automation  
Treitlstrasse 1, 1040 Wien