

Modellierung eines universalen Eisenbahnsystems mit Fokus auf Wechselbeziehungen

Jürg Suter¹, Sebastian Straube², Fabian Riesen³

¹ Federal Office of Transport FOT, CH-3003 Bern, Switzerland

² Lufthansa Systems Business Solutions GmbH, CH-1700 Fribourg, Switzerland

³ CISCO Systems GmbH, CH 8304 Wallisellen, Switzerland

Abstract.

Die Entwicklung der Technik zusammen mit der Zunahme des Verkehrs auf der Schiene führen zu einer stets höheren Komplexität im System der Eisenbahn. Die Automatisierung in der Betriebsführung, der Sicherungslagen und der Fahrzeuge führt zu einem Verlust von Systemkenntnissen. Es stellt sich heute die Frage, ob dem Ersetzen von jahrelanger Erfahrung durch die Technik gewisse Grenzen gesetzt sind und wie sich dies auf das Gesamtsystem auswirkt. Dies betrifft insbesondere Problemstellungen im Zusammenhang mit den Schnittstellen zwischen Menschen und Maschinen.

Für die punktuelle Untersuchung von betrieblichen und technischen Prozessen im System Eisenbahn setzt man heute Simulationen ein. Dabei wird ein Simulationssystem, hinreichend für bestimmte Systemelemente konzipiert. Bekannte Beispiele dafür sind Fahrsimulatoren für Lokführer oder Simulationsprogramme für Zugverkehrsleiter. Es gibt momentan keine bekannten Simulationssysteme, die beide Kategorien von Eisenbahnpersonal gleichzeitig mit einbeziehen. Die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen und deren Tätigkeiten werden somit in den Simulationen nicht berücksichtigt. Heute können solche Problemstellungen oft nicht genügend tief untersucht werden, weil die Beschaffung, die Auswahl und die Modellierung der notwendigen Daten als zu aufwändig und zu komplex erscheinen. Diese Tatsache ist typischerweise bei der Bewertung von potentiellen Risiken auf der Systemebene erkennbar.

Das Zusammenführen und Aufbereiten der Daten als Grundlage für Simulationen gestaltet sich oft schwierig. Erschwerend dazu kommt, dass sowohl die Infrastruktur als auch der Betrieb Veränderungen in stets kürzeren Zeitabständen unterworfen sind. Die Forschungsarbeit „Aufbau und Visualisierung eines dynamischen Eisenbahn-Systemmodells der Schweiz in Raum und Zeit“ der TU Braunschweig fokussiert sich auf die Methoden, wie ein elektronisches Modell für Untersuchungen im komplexen System des Schienenverkehrs aufgebaut werden kann. Es wird betrachtet, welche Daten für eine Systemmodellierung erforderlich sind. Dieses Modell dient als Basis, für die Untersuchung von einzelnen Systemelementen und deren Wechselwirkungen. Die Arbeit befasst sich schliesslich mit den Anforderungen an die Visualisierung von Modellen und mit der Anwendung der Instrumente, welche auf den Datenmodellen basieren.

Keywords: Eisenbahnsystem, Modellierung von Eisenbahndaten, Simulationen, Schnittstelle Mensch-Maschine

1. Einführung

Die Verkehrszunahme, besonders auf den Transitachsen und im Bereich von Zentren erfordern Massnahmen zur Kapazitätssteigerung bei der Eisenbahn. Diese Tatsache, zusammen mit den Folgen der Liberalisierung im Schienenverkehr bewirken zunehmenden Kostendruck auf die Verkehrsunternehmen und die Infrastrukturbetreiber. Heute muss jeder einzelne Schritt für die Entwicklung des Bahnsystems bereits im Vorfeld sehr genau untersucht werden, damit die Umsetzung der Massnahmen möglichst hohen wirtschaftlichen Anforderungen genügt und die Sicherheit des Gesamtsystems weiterhin gewährleistet werden kann. Zu diesem Zweck kommen viele spezifische elektronische Instrumente und Werkzeuge zum Einsatz. Das Simulationsprogramm OpenTrack stellt ein Modell für die Planung von Bahnanlagen und –angeboten bereit. Es kann auf ablaufende Prozesse Einfluss nehmen und die Belastbarkeit von theoretischen Fahrplankonzepten im Voraus genau untersuchen. Grosse Datenmengen komplexer Systeme lassen sich meistens nur mit Simulationsmodellen analysieren. [1]

Elektronische Modelle, welche die Kapazität des Schienennetzes, Energiefragen, technische und betriebliche Risikobetrachtungen sowie komplexe Fragestellungen zum Fahrplan abbilden, basieren auf einer Menge von Infrastruktur- und Betriebsdaten. Die Erhebung und Aufbereitung dieser erforderlichen Daten in der notwendi-

gen Genauigkeit und Qualität gestaltet sich sehr aufwändig, weil heute kein allgemeines Gesamtverzeichnis mit den erforderlichen und aktuellen Daten aller Transportunternehmungen existiert. Die auf der Basis von Infrastruktur- und Betriebsdaten erstellten Modelle bilden in der Regel jeweils nur einen Zeitpunkt ab, da die Daten meistens nur das Erhebungsdatum als einzigen zeitlichen Bezug aufweisen. Für das übergeordnete Verständnis des Systems der Eisenbahn müssten jedoch auch Wechselwirkungen mit wirtschaftlichen, politischen, gesellschaftlichen und kulturellen Bereichen in Raum und Zeit betrachtet werden können.

Der Verkehr auf einer bestimmten Achse entwickelt sich typischerweise angebotsorientiert. Eine Erhöhung der Kapazität oder die Verkürzung der Verkehrszeiten lässt die Verkehrsnachfrage – besonders im Personenverkehr – oft überproportional ansteigen. Dies lässt sich beispielsweise auf der Strecke des Lötschberg-Basistunnels oder auf der Neubaustrecke zwischen Bern und Olten beobachten. Bei der Planung von Infrastrukturausbauten und des Angebots im Eisenbahnverkehr können deshalb auch Erkenntnisse aus der Vergangenheit nützlich sein.

Problemstellungen an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (Human-Machine Interface HMI) können oft nur ungenau untersucht werden, da viele Einflussfaktoren nicht diskret messbar sind und der Kontext nicht immer eindeutig bestimmbar ist. Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an jene Berufe, die im Bereich der Betriebsführung der Eisenbahn tätig sind, da durch die Automatisierung stets mehr Verantwortung auf weniger Personen fällt. Davon direkt betroffen sind die Zugverkehrsleiter und die Lokführer. Aus diesem Grund steigt die Bedeutung von Erkenntnissen zu Themen wie Belastungsgrenzen des Personals (Human Factor), Benutzerfreundlichkeit von Bedienelementen (Usability Engineering) sowie Ursachen von Fehlverhalten und Fehlbedienungen. Das Wissen um die Komplexität dieser Anforderungen kann die Sicherheit eines gesamten Eisenbahnsystems verbessern.

Ein Beispiel dazu findet sich bei den so genannten Signalfällen, das heisst die unberechtigte Vorbeifahrt eines Lokführers bei einem Halt zeigenden Signal (Signal Passed At Danger, SPAD). In Abb. 1 ist ein Netzwerkdiagramm dargestellt, welches die Signalfälle als System darstellt. Bei solchen Fällen sind komplexe Wechselbeziehungen zwischen Mensch und Maschine mit nicht oder nur schwer quantifizierbaren Einflussgrößen festzustellen. Hingegen kann man repräsentative Stichprobe erheben, indem mit Probanden (Lokführer und Zugverkehrsleiter) entsprechende Simulationen durchgeführt werden. Dabei stellt sich die Frage, wie der Detaillierungsgrad und der Grad der wirklichkeitstreuen Modellierung das Verhalten der Probanden und damit die Untersuchungsergebnisse beeinflussen.

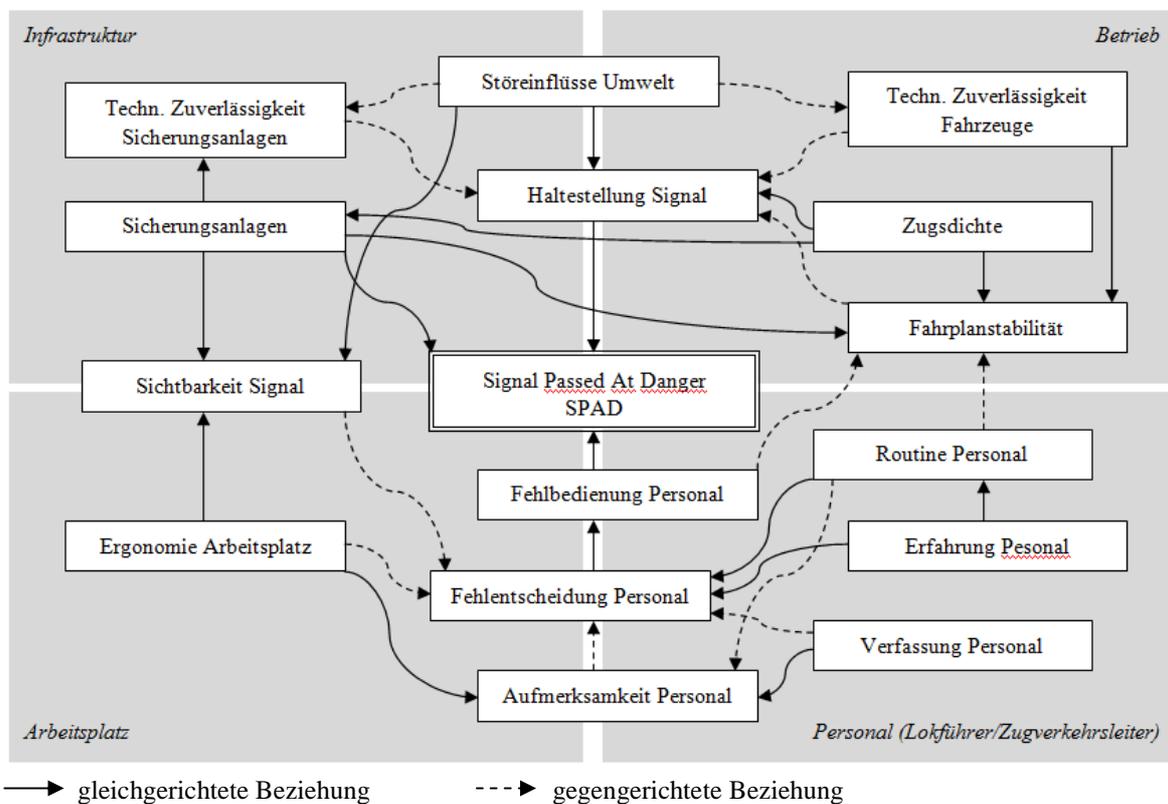


Abb. 1. Netzwerkdiagramm [9] am Beispiel der Problemstellung der Signalfälle im Schienenverkehr.

Simulationsbasierte Lösungsansätze für die Planung von baulichen und betrieblichen Massnahmen ermöglichen zuverlässige Ergebnisse. Dabei ist es wichtig, dass die Basisdaten der Infrastruktur und des Betriebs einen definierten Detaillierungsgrad aufweisen. Die hier beschriebene Arbeit möchte die entsprechenden Methoden für die Datenauswahl und -modellierung erklären und zudem der Frage nachgehen, welche Auflösung von Daten in Abhängigkeit des Anwendungsbereiches erforderlich ist.

2. Begriff und Aufbau eines Systemmodells

Aufgrund der methodischen Relevanz des Eisenbahn-Systemmodells müssen die Systemelemente erkennbar und nachvollziehbar ausgestaltet sein. Die Struktur der Systemelemente, welche dieser Arbeit zu Grunde gelegt werden, ist die Abb. 2 dargestellt. Die Betrachtung und Darstellung des Systems Verkehr ist anspruchsvoll, wie folgendes Zitat von Kai Müller [4] zeigt: „Verfolgt man allerdings die kontroversen Diskussionen z.B. über neue Verkehrskonzepte, so muss auch hier festgestellt werden, dass es die Wirklichkeit nicht gibt. Die persönliche Meinung (Wirklichkeit) ist vom philosophischen, religiösen, wissenschaftlichen, gesellschaftlichen und individuellen Weltbild abhängig. Die Wahrnehmung der Wirklichkeit ist bei der Erfüllung von neuen Systemen bzw. bei der politischen Änderung der gesellschaftlichen Randbedingungen von entscheidender Bedeutung. Über die Wahrnehmung wird die Akzeptanz der Änderung in entscheidender Weise beeinflusst.“ Müller [4] ordnet den Verkehr deshalb den komplexen Systemen zu, weil deren Elemente von der Zeit abhängig und nicht oder nur bedingt reproduzier-, prognostizier- und berechenbar sind.

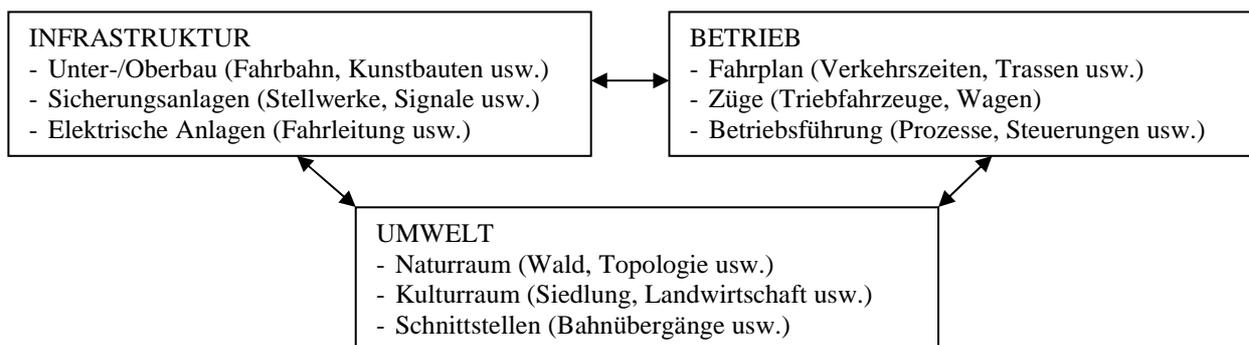


Abb. 2. Darstellung der in der vorliegenden Forschungsarbeit betrachteten Systemelemente.

Dem Begriff des Systems gewinnt unter interdisziplinärer Verwendung stets an Bedeutung, verliert jedoch gleichzeitig an Sinnhaftigkeit [8]. In dieser Forschungsarbeit wird versucht, die inhaltliche Aussagekraft dieses Ausdrucks am Beispiel des Eisenbahnwesens zu stärken. In diesem Sinne kommt hier auch das intelligente Glossar „iglos“ zur Anwendung, mit welchem Terminologie-Strukturen modelliert und analysiert werden können [2].

Unter *Verkehrssystem* wird in dieser Arbeit eine Gesamtheit von gerichteten Systemelemente, die miteinander in Wechselwirkung stehen und die Prozesse der Raumüberwindung von Personen, Güter und Dienstleistungen beeinflussen, verstanden. Das Eisenbahn-Systemmodell ist eine spezielle Abbildung der Wirklichkeit..

Die *Systemelemente (Objekte)* bilden verschiedene Gruppen im System, die untereinander in Wechselbeziehung stehen. Es wird grundsätzlich zwischen Objekten der Infrastruktur und des Betriebs unterschieden, welche sich wie folgt gliedern:

Infrastrukturobjekte (in der Visualisierung sichtbar):	Betriebsobjekte:
Fahrbahnobjekte (Kurven, Geraden, Weichen usw.)	Fahrzeuge
Kunstabauten (Brücken, Tunnels usw.)	Fahrpläne
Elektrische Anlagen (Fahrleitungsmasten usw.)	Prozesse, Abläufe, Vorschriften
Signale (Lichtsignale, Tafeln, Kennzeichen usw.)	Umfeld
Bauten (Gebäude, Perron, Bahnübergänge usw.)	
Umfeld (Meteo, Kulturraum, Naturraum)	

Tab. 1. Strukturierung der sichtbaren Eisenbahnobjekte

Dynamisches Modell heisst in diesem Zusammenhang, dass der Haushalt der Daten ganz besonders auf strukturelle, räumliche und zeitliche Veränderung ausgelegt ist. Die Anpassung und Ersetzung von einzelnen oder zusammengehörenden Objekten stellt eine Grundfunktion innerhalb der Modellierung dar.

Als Beschreibungsmittel vom technischen System der Eisenbahn werden Unified Modeling Language (UML)-Klassendiagramme und Petrinetze herbei gezogen [8]. Erstere dienen der Beschreibung und Analyse von unabhängigen Nebenläufigkeiten und nichtdeterministischen Abläufen und der objektorientierten Modellierung. Damit kann die statische Struktur der Systeme anhand der zwischen den Systemelementen bestehenden Wechselwirkungen dargestellt werden. Petrinetze eignen sich zur Beschreibung von dynamischen Systemen mit fester Grundstruktur, womit sich die kausalen und temporalen Begriffsbeziehungen darstellen lassen. Für die Beschreibung der Wechselwirkungen und die erforderlichen Bewertungen eignet sich das Netzwerkdiagramm und die Vernetzungsmatrix [9], welche sich grafisch interpretieren lassen.

Der Modellierung insbesondere von Infrastrukturdaten müssen Standards zu Grunde gelegt werden, um eine möglichst hohe Kompatibilität und damit eine breite Nutzbarkeit des Modells zu erreichen. Es wird angestrebt, im Rahmen dieser Forschungsarbeit bereits etablierte Industriestandards zu nutzen. Eine Schnittstelle zum Austausch von Daten zwischen Eisenbahnsystemen und Systemelementen wurde bereits in der Industrie etabliert. Es handelt sich dabei um den RailML [7] Standard. Für Erhebung von Infrastrukturdaten ist im Auftrag des schweizerischen Bundesamts für Verkehr BAV das Tool „QRailScan“ [6] entwickelt worden, mit welchem Eisenbahnstrecken mittels Global Positioning System (GPS) und Videoaufnahmen aus dem Führerstand modelliert werden können. Diese Methode eignet sich vor allem für Strecken, für die ungenügende Daten oder inkompatible Datenformate vorliegen. Für die Untersuchung des Modells und die Überprüfung der aufgestellten Hypothesen, werden geeignete Systemkomponenten ausgewählt und die dafür notwendigen Instrumente entwickelt oder evaluiert.

3. Messungen und Untersuchungen im Labor

Die Messungen und Untersuchungen im Labor dienen der Überprüfung der aufgestellten Hypothesen. Das Labor ermöglicht unterschiedliche Betrachtungsweisen von Problemstellungen. Das Gesamtsystem muss gewisse Bedingungen erfüllen um eine deterministische Untersuchung zu ermöglichen. Die Komplexität der Simulation wird in einzelne Schichten heruntergebrochen um die Betrachtung von Systemkomponenten zu ermöglichen. Im Labor ist es möglich, gewisse Komponenten aus der Eisenbahnsystemsicht in das Simulationssystem einzubinden, oder von der Untersuchung zu trennen. Dabei können komplexe Faktoren in verschiedenen Epochen simuliert und untersucht werden. Sie können jedoch nur bis zu einem gewissen Grad nachgebildet werden. In welcher Art und Weise die Faktoren das Gesamtsystem beeinflussen, ist ein Bestandteil des Ergebnisses aus den Untersuchungen. Es werden verschiedene Betrachtungsweisen aus der Sicht von Infrastrukturobjekten und Betriebsobjekten sowie der Umwelt gefordert. Aus diesen Anforderungen werden im Labor Informationswege innerhalb des Gesamtsystems simuliert (siehe Abb. 3). Die Gesamtsimulation kann mit diesen Einflussfaktoren und den Faktoren aus dem Betrieb als komplexes System betrachtet werden.

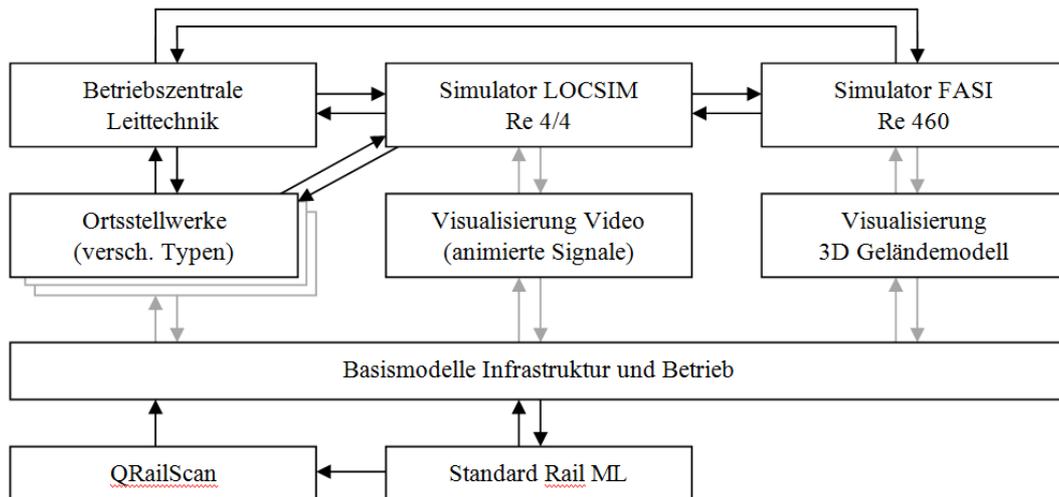


Abb. 3. Übersicht des nachgebildeten Informationsflusses der Gesamtsimulation im Labor

Die Forderung von Wirtschaftlichkeit bei Eisenbahnunternehmen, wird zu einem zentralen Thema. Dabei wird die Automatisierung von bestimmten Prozessen angestrebt. Das komplexe System wird evolutionär automatisiert und weiterentwickelt. Die Automatisierung an den HMI im Umfeld der Lokführer und der Zugverkehrsleiter werden aus den Anforderungen heraus unterschiedlich entwickelt. Die ursprünglich vor Ort bedienten Stellwerke an den Bahnhöfen werden ferngesteuert und in Betriebszentralen zusammengefasst. Automatisierung von Schienenfahrzeugen ist noch nicht flächendeckend umgesetzt. Die Triebfahrzeuge und damit die Arbeitsplätze der Lokführer wurden hingegen – etwa analog zu den Automobilen auf der Strasse – inzwischen mit umfangreichen Assistenzsystemen ausgerüstet. Die Führerstandssignalisierung im Rahmen des European Train Control System (ETCS) ist nur ein Beispiel. Diese Entwicklung hat das Arbeitsumfeld der Lokführer entscheidend verändert. Im Labor können Stellwerke sowie die Lokomotiven Re 4/4 II, Re 460 und Stellwerke simuliert werden. Das damit verbundene HMI ist detailgetreu nachgebildet und ermöglicht eine Untersuchung von komplexen Faktoren.

Als erstes Untersuchungsobjekt dieser Forschungsarbeit dient ein Ausschnitt aus dem Eisenbahnsystem der Schweiz, die Signalstation Obermatt bei Langnau im Emmental. Die Geschichte dieser kleinen Abzweigstation weist sämtliche wichtigen Typen von Stellwerken auf die in den verschiedenen Eisenbahnepochen entworfen wurden. Aus diesem Grund ist diese Signalstation besonders gut für eine Untersuchung geeignet, weil die Stellwerktypen verschiedene Eisenbahnepochen abbilden und deren Modellierung ermöglichen.

In einem ersten Schritt wurde für diese Station das elektromechanische Vertikalschalterwerk aus dem Jahr 1952 originalgetreu nachgebaut. Dieses Stellwerk umfasst eine Darstellung von Infrastrukturobjekten und eine hinreichend genaue Positionsanzeige für alle verkehrenden Fahrzeuge auf dem zur Verfügung stehenden Gleisnetz. Der Loksimulator „LOCSIM“ der Berner Fachhochschule Biel [3] enthält ein detailgetreues Abbild der Umwelt und ein digitalisiertes Abbild der Infrastruktur.

Das Stellwerk und der „LOCSIM“ werden für die Untersuchungen in der Gesamtsimulation miteinander kombiniert. Dabei umfasst die Integration des Stellwerks verschiedene Kommunikationswege, die für dieses HMI nicht sofort erkennbar sind. Die Stellwerkseite wird in die abgebildete Infrastruktur und die dahinterliegende Stellwerklogik getrennt. In den Epochen wurde die Logik mit jeweils verschiedenen Ausprägungen unterschiedlich umgesetzt. An dieser Signalstation stehen Stellwerktypen mit den Ausprägungen mechanisch, elektromechanisch, elektrisch mit Relais und vollelektronisch zur Verfügung. Die Modellierung der Stellwerklogik wird bis heute durch verschiedene Methoden umgesetzt, das Ergebnis basiert auf der Verschluss Tafel.

Auf dieser Tabelle sind alle Abhängigkeiten des Stellwerks mit der gesamten Infrastruktur vorhanden. Diese integrierte Tafel verhindert das Einstellen von inkonsistenten oder ungewollten Zuständen für das HMI. Dadurch wird die Sicherheit im Schienenverkehr bis zu einer kritischen Ebene gewährleistet. Es ist heute möglich, die Tafel elektronisch zu erfassen und in einem Computermodell abzubilden. Für diese Forschungsarbeit gibt es momentan keine Möglichkeit, eine vorhandene Modellierungsmethode näher zu betrachten und zu untersuchen. Das Modell wird für eine universelle Anwendbarkeit selbst entwickelt. Für die Struktur wird eine Matrix angewendet die für jedes Stellwerk die gleichen Grundzüge enthält, aber individuell erfasst werden muss. Es werden momentan verschiedene Modellierungsformen gesucht um die digitalisierte Verschluss Tafel anwenden zu können.

Es stehen momentan mit ihren vor- und Nachteilen verschiedene Markup Language (ML) zur Auswahl, die Extensible Markup Language (XML) und die Web Ontology Language (OWL). Die Modellierung erfolgt durch die zum Stellwerk zugehörige Stellwerklogik. Die Integration des Stellwerks in die Simulation erfolgt mit einer modular aufgebauten Schnittstelle, siehe Abb. 4.:

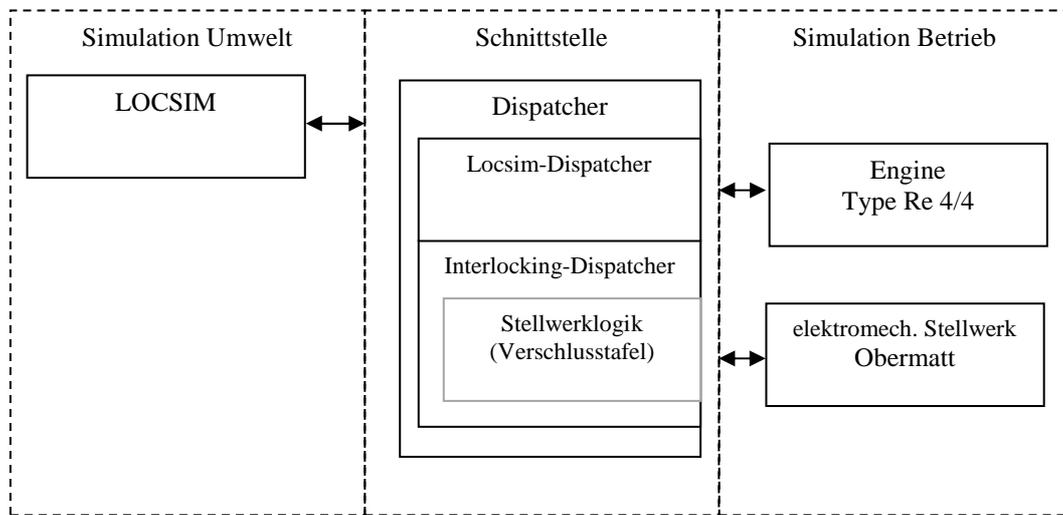


Abb. 4. Integration der Stellwerklogik in den dynamischen Fahrsimulator LOCSIM [3]

In einem nächsten Schritt sollen die Vorgänger- und Nachfolgetypen der Stellwerke der Station Obermatt integriert werden. Dieser Versuchsaufbau macht es möglich, das integrierte Simulationsmodell anhand von konkreten Fallstudien auf seine Anwendbarkeit zu überprüfen. Dabei sollen Erkenntnisse über den erforderlichen Detaillierungsgrad des Modelles und die geeignete Art ihrer Visualisierung gewonnen werden.

Für die Untersuchung dieser Fragen werden in Zusammenarbeit mit Eisenbahnunternehmen konkrete Problemstellungen ausgearbeitet, welche auf Grund ihrer Komplexität nicht auf linearem Weg untersucht werden können. Hier geht es typischerweise um Situationen, deren Verlauf unmittelbar von der Wahrnehmung und dem Entscheidungsverhalten der Lokführer und Zugverkehrsleiter abhängig sind und nicht mit absoluter Sicherheit vorbestimmt werden können. Aus diesen Problemstellungen gehen Untersuchungsgegenstände hervor, die auf den Simulationsmodellen mit Probanden mit einer möglichst hohen Zahl von Wiederholungen durchgespielt werden. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse werden zusammen mit zusätzlich mittels qualitativen Methoden erhobenen Daten (systematische Befragung des Probanden) ausgewertet. Im Fokus der oben erwähnten Problemstellungen steht u.a. die Wahrnehmung und die Bedienung der Signale im Konfliktfall (Ausschluss von Fahrstrassen zweier gleichzeitig verkehrenden Züge). Für diese Versuche steht auch der einzige Vollsimulator der Schweiz einer Lokomotive vom Typ Re 460 zur Verfügung.

4. Erwartete Ergebnisse

Die Forschungsarbeit hat zum Ziel, Erkenntnisse über die (elektronische) Modellierung im Bereich der Eisenbahn für die Untersuchung von komplexen Systemen gewinnen zu können. Solche Systeme weisen die Eigenschaft auf, dass sich ihre Systemelemente dynamisch Verhalten und auf sich selbst zurückwirken können. Dadurch werden Prozesse in Gang gesetzt, deren Verlauf nicht einfach vorhersehbar und kalkulierbar ist [5]. Im Abb. 5 ist die Komplexität zwischen betrieblichen Prozessen auf der einen sowie Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen auf der andern Seite am einfachen Fallbeispiel eines Halt zeigenden Hauptsignals aufgezeigt.

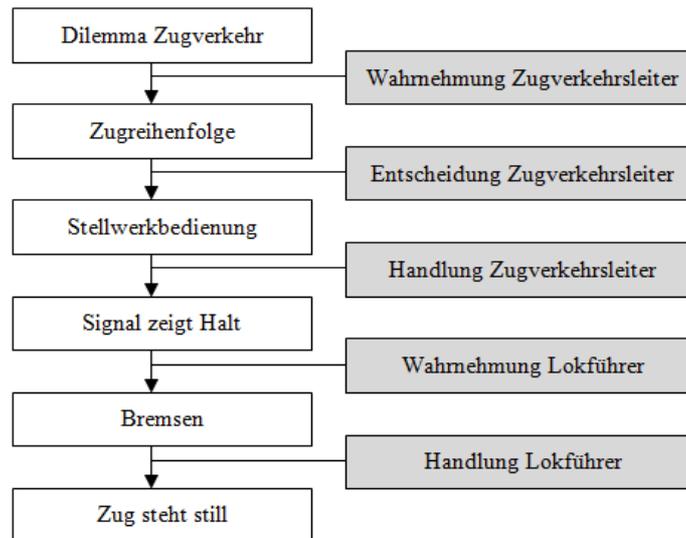


Abb. 5. Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen von Zugverkehrsleiter und Lokführer am Beispiel eines Halt zeigenden Hauptsignals. Mit Simulationen können die Zusammenhänge untersucht werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit will einen Beitrag leisten, die Eisenbahn als komplexes System besser verstehen zu können, indem ein Ansatz für die Modellierung als Basis für integrierte Simulationen aufgezeigt wird. Anhand von Fahr- und Stellwerksimulatoren werden Erkenntnisse sowohl über die erforderliche Auflösung der Modelle als auch über die Anforderungen an integrierte Simulationsmodelle für die Untersuchung der Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine erwartet. Damit soll an konkreten Problemstellungen und Untersuchungsgegenständen erklärt werden können, wie sich die Anforderungen an die Arbeit der Lokführer und Zugverkehrsleiter im Verlauf der Automatisierung verändern.

Referenzen

1. HÜRLIMANN Daniel, 2001: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen. Eidgenössische Technische Hochschule. Zürich.
2. IGLOS: Intelligente Glossar des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig. <http://www.iglos.de>
3. LOCSIM: Computerprogramm für Loksimulationen der Berner Fachhochschule Biel. <http://www.locsim.ch>
4. MÜLLER Kai, 1998: Verkehr in systemtechnischer Darstellung und ihre Anwendung auf ein multimodales Güterverkehrskonzept. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf.
5. NICK Andreas, BÜRKI Leo, HUNGERBÜHLER Roland, MÜHLEMANN Heinrich, 2004: Systemik. Vernetztes Denken in komplexen Situationen. Orell Füssli Verlag. Zürich.
6. QRailScan, 2011: Computerprogramm für die Erhebung von Infrastrukturdaten mittels Video- und GPS-Aufnahmen.
7. RAILML: XML-Schnittstelle für Eisenbahnanwendungen. <http://www.railml.org>
8. SCHNIEDER Eckehard, SCHNIEDER Lars, 2010: Terminologische Präzisierung des Systembegriffs. Grundlage formaler Systembeschreibungen. atp edition 9/2010. Oldenbourg Industrieverlag. München.
9. VESTER Frederic, 2005: Die Kunst vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. 5. Auflage. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG. München.