



Jürg Suter
Trüelmatt 24
CH-3624 Goldiwil (Thun)

Goldiwil, 17. November 2015, Version 1.0

Grobkonzept

Entwicklung eines Bewegungssystems für Fahrsimulatoren





Inhalt

1	Problemstellung	3
1.1	Fallstudien	3
1.2	Notwendigkeit eines Bewegungssystems	4
1.3	Anforderungen an ein Bewegungssystem.....	5
2	Mögliche Problemstellungen für Studienarbeiten	7
2.1	Bewegungssimulation.....	7
2.2	Mögliche Lösungen für die Konstruktion	8
2.3	Universeller Einsatz des Bewegungssystems.....	8
3	Theoretische Grundlagen	10
3.1	Grundlagen der Bewegungsdynamik	10
3.2	Grundlagen der Eisenbahnsimulation	10
3.3	Grundlagen für Bewegungssysteme	10
4	Methoden	11
4.1	Quantitative Methoden.....	11
4.2	Qualitative Methoden.....	11
5	Erwartete Ergebnisse	12



1 Problemstellung

Die Automatisierung im Eisenbahnbetrieb bringt neue Herausforderungen für das im System verantwortliche Personal mit sich. Die Auswertung von Unfällen und Ereignissen zeigt deutlich, dass der zunehmende Verkehr in Verbindung mit der Automatisierung für die Lokführer und Fahrdienstleiter in den Betriebszentren vermehrt komplexe Situationen hervorrufen kann. Gegenwärtig gibt es nur wenige Untersuchungen über den Faktor Mensch im Eisenbahnbetrieb.

Die Schweiz verfügt über eines der dichtesten Eisenbahnnetze der Welt. Auf ihrem Netz über rund 5000 km verkehren täglich rund 1000 Züge. Die Untersuchung von nicht messbaren Einflussfaktoren in Verbindung mit den Schnittstellen Mensch-Maschine ist oft nur unter Anwendung von Simulatoren möglich. Im Gegensatz zur Luftfahrt fehlen bei der Bahn heute Simulatoren für die Untersuchung der menschlichen Faktoren. Das [Forschungslabor DESM](#) in Deisswil (Bern) befasst sich mit der Entwicklung eines integrierten Simulationssystems. Das Labor verfügt über den heute einzigen Vollsimulator der Schweiz einer Lok vom Typ Re 460. Zur Zeit befindet sich ein System mit insgesamt acht Fahrsimulatoren und einer Betriebszentrale im Aufbau.



Abbildung 1: Vollsimulator vom Typ Re 460 im DESM-Forschungslabor in Deisswil (Bern).

1.1 Fallstudien

Im Forschungslabor wurden erstmals in der Schweiz Fallstudien mit Lokführenden durchgeführt, welche auch die Anforderungen an Simulatoren für Untersuchungen der Human Factors an den Schnittstellen Mensch-Maschine aufzeigen sollen. Für diese Fallstudien wurden reale Situationen, welche aus tatsächlichen Unfällen und Ereignissen hervor gingen, verwendet. Ein möglicher Referenzindikator besteht aus den sogenannten „Signalfällen“ (engl.: Signal Passed At Danger SPAD), bei welchen ein Zug ohne Erlaubnis bei einem Halt zeigenden Signal vorbei fährt. Es handelt sich um Fälle mit hohem Gefährdungspotential, welche nicht immer mit technischen Massnahmen verhindert werden können. In den letzten Jahren führten Signalfälle vermehrt zu schweren Eisenbahnunfällen.

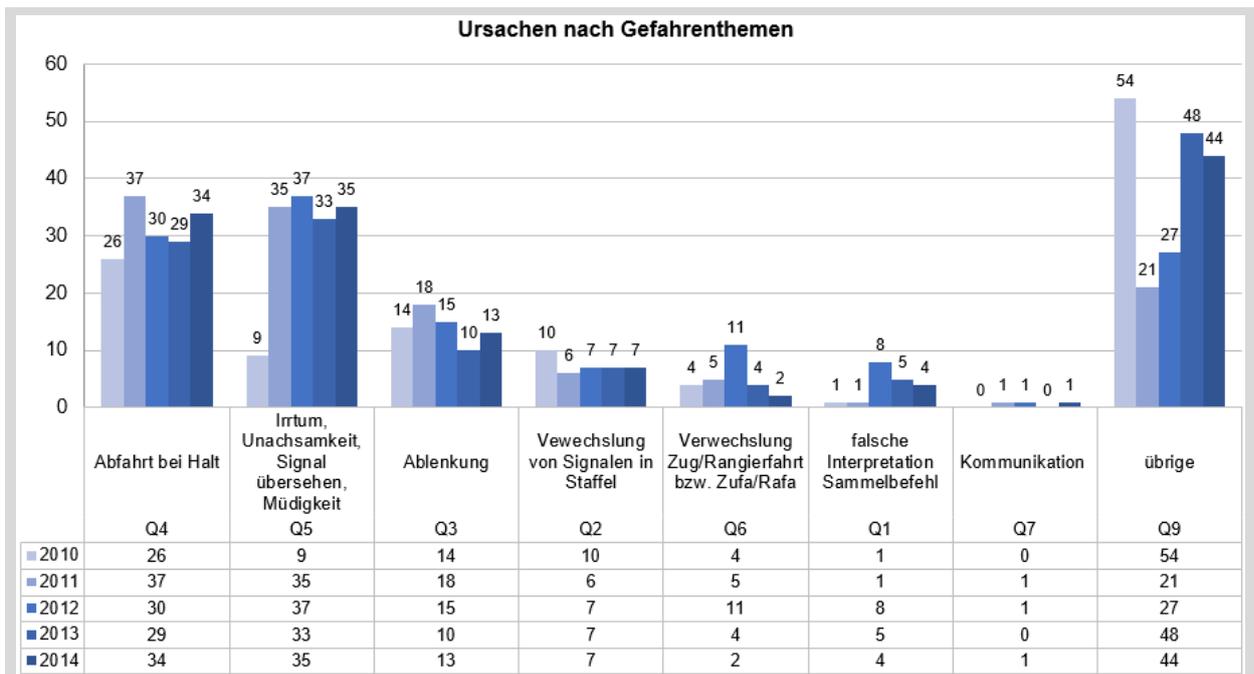


Abbildung 2: Auswertung der Signalfälle in der Schweiz in den Jahren 2010 bis 2014. Das Totaal der Fälle präsentiert sich wie folgt: 2010: 118 Fälle, 2011: 124 Fälle, 2012: 136 Fälle, 2013: 136 Fälle, 2014: 140 Fälle. Die Zunahme der Signalfälle übersteigt die Zunahme der verkehrenden Züge. (SUTER 2015)



Abbildung 3: Schwerer Unfall am 20.02.2015 in Rafz, verursacht durch einen Signalfall. (Quelle)

1.2 Notwendigkeit eines Bewegungssystems

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass Fahr simulatoren zu Forschungszwecken mikroskopisch modelliert sein müssen. Die Probanden müssen sich in einem abgeschlossenen Führerraum befinden, welcher so wirklichkeitsnah wie möglich modelliert ist. Damit sich die Probanden völlig auf ihre Arbeit konzentrieren können, ist auch die Simulation der Fahrdynamik notwendig. Diese Eigenschaft kann einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse von Fallstudien aufweisen.

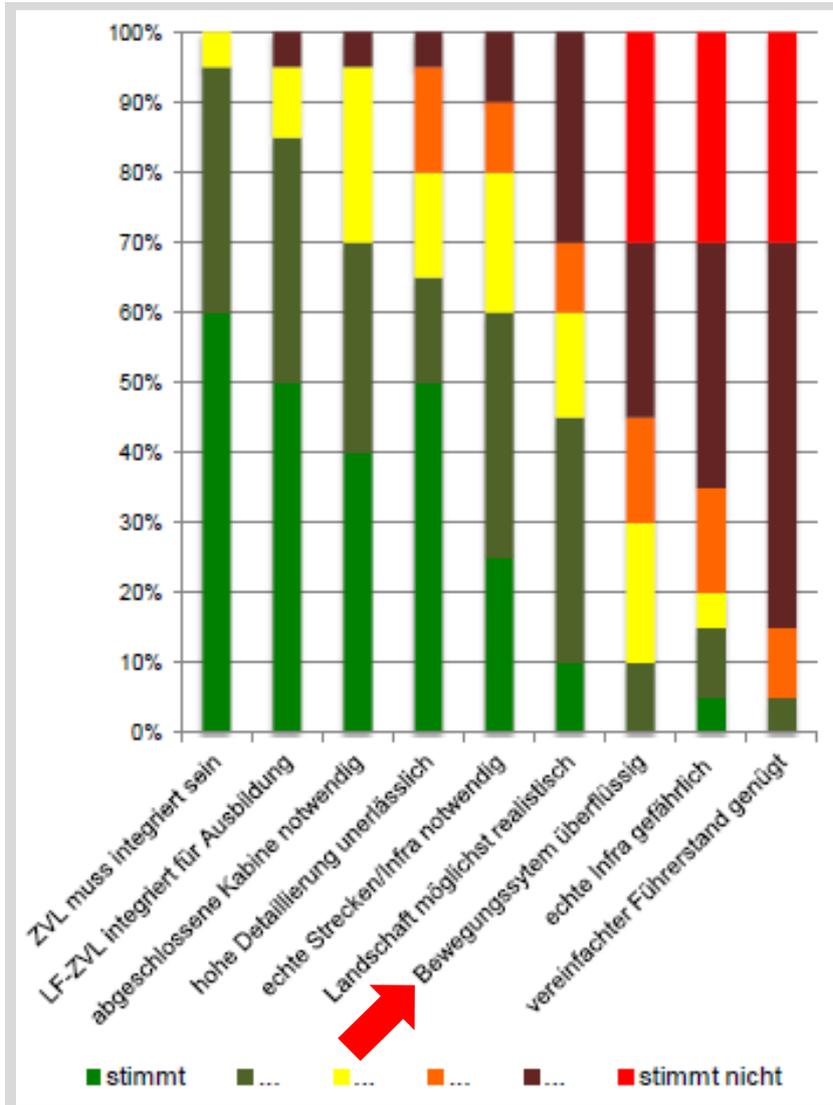


Abbildung 4: Aus der qualitativen Datenerhebung bei den Lokführern mittels Fragebogen geht die Notwendigkeit eines Bewegungssystems für einen Fahrsimulator zu Forschungszwecken hervor. (SUTER 2013)

Eine wichtige Erkenntnis aus den Fallstudien besteht aus der hohen Bedeutung einer Simulation der Fahrdynamik beim Einsatz von Fahrsimulatoren, wenn das Verhalten der Lokführer untersucht werden soll.

1.3 Anforderungen an ein Bewegungssystem

Im DESM-Forschungslabor werden zur Zeit acht Fahrsimulatoren aufgebaut, bei welchem lediglich einer über ein Bewegungssystem verfügt. Dieser Simulator wurde durch das deutsche Unternehmen [Krauss-Maffei-Wegmann](http://www.krauss-maffei-wegmann.com) konstruiert.



Abbildung 5: Bewegungssystem für einen Eisenbahn-Fahrsimulator mittels drei Aktuatoren und Gelenken, um die zwei Tonnen schwere Kabine zu bewegen. (SUTER 2013)

Ein Fahrzeug verfügt über insgesamt sechs Bewegungsfreiheitsgrade. Um eine annähernd perfekte Bewegung erreichen zu können, muss der Simulator auf sechs Aktuatoren gelagert sein. Die Konstruktion eines Bewegungssystems für einen schweren Simulator ist jedoch sehr aufwändig und teuer. Zudem erfordert ein solcher Simulator durch seine Abmessungen eine außerordentliche Raumhöhe. Die Herausforderung besteht darin, ein neuartiges Bewegungssystem zu konstruieren, welches folgende Anforderungen erfüllt:

Neuer Lösungsansatz, nach welchem schwere Kabinen (bis zu drei Tonnen) getragen werden können. Die Bewegung von Personen innerhalb der Kabine (Lokführer und max. drei Begleiter) darf die Bewegung der Simulation nicht stören.

Das Bewegungssystem ist auf die für die Simulation notwendigen Bewegungen ausgerichtet (nicht alle Bewegungsfreiheitsgrade weisen die gleiche Bedeutung für die Simulation auf).

Geringe Höhe der Bewegungsplattform. Im Idealfall ist die Kabine nicht höher als ein Meter über Boden gelagert.

Wirtschaftlichkeit: Ideales Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen.

Möglichst einfache Konstruktion und Bauweise.



2 Mögliche Problemstellungen für Studienarbeiten

Innerhalb der Konstruktion eines neuen Bewegungssystems, welches die Anforderungen erfüllt, gibt es mehrere Optionen für eine Studienarbeit der Ingenieurwissenschaften.

2.1 Bewegungssimulation

Die Simulation von Bewegungen eines Fahrzeugs weist einen gewissen Komplexitätsgrad auf. Ein Teil der simulierten Bewegungen unterscheiden sich von den realen Bewegungen. So zum Beispiel wirken Kräfte der Beschleunigung, der Bremsung und der Querschleunigung in Wirklichkeit horizontal, während der Simulator Drehbewegungen ausübt. Ferner weisen Bewegungen des Fahrzeugkastens wie vorwärts/rückwärts, links/rechts und gieren auf Grund der Federungen nicht die gleiche Bedeutung auf wie Zug- und Bremskräfte sowie die Querschleunigung. Andere Kräfte sind von der Geschwindigkeit abhängig, da sie über die Gleisgeometrie verursacht werden, wie die Kurvenüberhöhung. Solche Bewegungen müssen auch auf der Visualisierung (Leinwand) berücksichtigt werden.

Steht die Kurve schräg, setzt sich die Normalkraft F_N , mit der das Fahrzeug in das Gleis gedrückt wird, aus zwei Komponenten zusammen, der Zentrifugalkraftkomponente F_Z und die Gewichtskraftkomponente F_G :

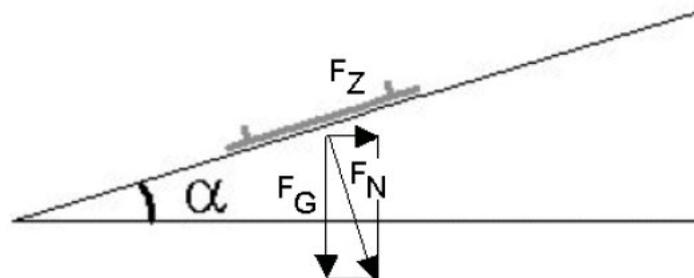


Abbildung 6: Die Kurvenüberhöhung beeinflusst die Simulation auf mehreren Ebenen: Die Bewegung des Simulators hängt von der Geschwindigkeit ab, während die Visualisierung der Fahrbahn die Gleisgeometrie absolut abbilden muss. ([Quelle](#))

2.1.1 Mögliche Forschungsfragen

2.1.1.1 Lösungsansätze für die Simulation

Welches sind die exakten Unterschiede in der Realität und bei der Simulation zwischen den Kräften und den Bewegungen, welche auf den Lokführer wirken?

Welche möglichen Lösungsansätze bestehen für die Simulation und welches sind die jeweiligen Vor- und Nachteile?

2.1.1.2 Anforderungen für die Simulation

Wie kann die Bedeutung von bestimmten Bewegungen (vorwärts/rückwärts, links/rechts und gieren) untersucht werden, damit für Experimente die völlige Konzentration des Probanden auf seine Arbeit erreicht werden kann?



Welches sind die Vor- und Nachteile im Hinblick auf die Konstruktion des Bewegungssystems und auf die Konzentration des Probanden, wenn bestimmte Bewegungsfreiheitsgrade vereinfacht werden?

2.1.1.3 Messung der Bewegungsfreiheitsgrade

Wie können Daten über die Bewegung von Eisenbahnfahrzeugen in der Realität unter Berücksichtigung folgender Einflussfaktoren erhoben werden?

- Konstruktion des Fahrzeugs (Lokomotiven, Triebwagen, Steuerwagen)
- Geschwindigkeit
- Beschaffenheit der Infrastruktur (Fahrbahn)
- Verhalten der Anhängelast (Kräfte zwischen Fahrzeugen)

2.1.2 Erwartete Ergebnisse

Beschreibung der Analysen der Ergebnisse als Basis für die Konstruktion eines neuartigen Bewegungssystems für Eisenbahnfahrzeuge. Erkenntnisse für die Konstruktion und Anwendung des Bewegungssystems.

2.2 Mögliche Lösungen für die Konstruktion

Die heute verfügbaren Bewegungssysteme erfüllen nicht alle Anforderungen gemäss Zf. 1.3. Eine der wichtigsten Eigenschaften darin, dass das Gewicht der Kabine nicht direkt von den Aktuatoren getragen werden soll.

2.2.1 Mögliche Forschungsfragen

2.2.1.1 Grundlagen für die Konstruktion

Vergleich von verschiedenen existierenden Bewegungssystemen im Hinblick auf ihre Verwendung für Eisenbahnfahrzeuge. Welches sind die möglichen Lösungen, um genügend realitätsnahe Bewegungen für einen Eisenbahnsimulator zu erreichen? Welches sind ihre Vor- und Nachteile?

2.2.1.2 Anpassung im Hinblick auf Eisenbahnfahrzeuge

Die heute am besten entwickelten Simulatoren befinden sich im Bereich der Luftfahrt und der Strassenfahrzeuge. Welches sind die massgebenden Unterschiede im Bezug auf die Bewegungssimulation? Welche Anpassungen müssen erfolgen, damit sich die Bewegungssysteme für Eisenbahnfahrzeuge eignen?

2.2.2 Erwartete Ergebnisse

Beschreibung der Resultate mittels Modell in geeignetem Massstab, um alle Funktionen und Vorteile aufzeigen zu können. Erkenntnisse für die Konstruktion und die Anwendung.

2.3 Universeller Einsatz des Bewegungssystems

Im DESM Labor befindet sich gegenwärtig eine Middleware für die Integration von Fahr- und Stellwerksimulatoren in Entwicklung. Das Bewegungssystem muss so beschaffen sein, dass es über die Middleware mit beliebigen Simulationsprogrammen in Verbindung gebracht werden kann.



2.3.1 Mögliche Forschungsfragen

2.3.1.1 Steuerung des Systems

Machbarkeitsstudie: Welches ist die ideale Lösung für die Verbindung des Bewegungssystems mit den Simulationsprogrammen? Welches sind die notwendigen Abgrenzungen bzw. Schnittstellen zwischen der internen Steuerung des Bewegungssystems und den Simulationsprogrammen bzw. der Middleware?

2.3.1.2 Benötigte Daten

Welche Daten werden von den Simulationsprogrammen bzw. von der Middleware benötigt, um das Bewegungssystem korrekt steuern zu können?

2.3.1.3 Schnittstelle zwischen Steuerung und Simulationsprogrammen/Middleware

Wie kann eine Standard-Schnittstelle realisiert werden, welche den universellen Einsatz des Bewegungssystems erlaubt? Welches sind die entsprechenden Anforderungen?

2.3.2 Erwartete Ergebnisse

Beschreibung der Resultate mittels Modell in geeignetem Massstab, um alle Funktionen und Vorteile aufzeigen zu können. Erkenntnisse für die Konstruktion und die Anwendung.



3 Theoretische Grundlagen

Als Grundlage muss der Stand der Technik untersucht werden. Während die Entwicklung von Bewegungssystemen für Flugzeuge und terrestrische Fahrzeuge weit fortgeschritten ist, fehlt die entsprechende Forschung für Eisenbahnfahrzeuge.

3.1 Grundlagen der Bewegungsdynamik

Um die Problemstellung für die Entwicklung eines Bewegungssystems untersuchen zu können, müssen die Unterschiede zwischen Realität und Simulation studiert werden.

3.2 Grundlagen der Eisenbahnsimulation

Simulatoren für Eisenbahnfahrzeuge unterscheiden sich von Simulatoren für Flugzeuge und für terrestrische Fahrzeuge. Ein entscheidender Einflussfaktor besteht aus dem höheren Gewicht der Eisenbahnfahrzeuge, welches andere Arten von Bewegungen bewirkt.

3.3 Grundlagen für Bewegungssysteme

Gegenwärtig bestehen verschiedene Lösungsansätze für Bewegungssysteme. Die existierenden Systeme sollen hinsichtlich Anforderungen und Eignung für Eisenbahnsimulatoren untersucht werden.



4 Methoden

4.1 Quantitative Methoden

Die quantitativen Methoden betreffen einerseits einen Teil der Untersuchungen der Wirklichkeit im Vergleich mit der Simulation der Bewegungen. Andererseits werden quantitative Methoden für die Konstruktion von möglichen Lösungen angewendet.

4.1.1 Messungen in der Wirklichkeit

Anwendung von geeigneten Instrumenten für die Untersuchung und Bewertung der realen Bewegungen von Eisenbahnfahrzeugen im Hinblick auf die Einflussfaktoren (s. Zf. 2.1.1.3).

4.1.2 Berechnungen für das Bewegungssystem

Für die Anwendung eines Bewegungssystems mit dem Ziel, Bewegungen einer Führerkabine zu simulieren (welche nicht den Bewegungen in der Wirklichkeit entsprechen), müssen die notwendigen Algorithmen ermittelt und berechnet werden.

4.1.3 Statische Berechnungen

Die Konstruktion muss darauf ausgelegt sein, dass sowohl schwere als auch leichte Kabinen getragen werden können. Die Bewegung der Personen im Führerraum (Lokführer und max. drei Begleiter) darf das Bewegungssystem nicht stören.

4.1.4 Konstruktion eines Modells

Für die Demonstration des Konstruktionsprinzips von möglichen Lösungen ist ein entsprechendes Modell in geeignetem Massstab zu konstruieren.

4.2 Qualitative Methoden

Die qualitativen Methoden dienen der Untersuchung von nicht messbaren Faktoren.

4.2.1 Experteninterviews

Bestehende Erfahrungen und Kenntnisse können mittels Experteninterviews mit strukturiertem Fragebogen erhoben und in Wert gesetzt werden.

4.2.2 Nutzwertanalyse

Die Bewertung von Varianten kann mittels Nutzwertanalyse als Standardmethode durchgeführt werden. Diese Methode erlaubt die spezifische Gewichtung von Einflussfaktoren im Hinblick auf die Projektanforderungen.



5 Erwartete Ergebnisse

Masterarbeit mit theoretischen Grundlagen, angewandten Methoden, erzielten Ergebnissen und Erkenntnissen/Folgerungen. Für die Visualisierung des entwickelten Lösungsansatzes eignet sich ein Modell.