

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: **Energieeffiziente und robuste Antriebsregelung von Zügen
(FKZ 03WIR1208)**

**Zuwendungs-
empfänger:** **Technische Universität Chemnitz**

Laufzeit: **08/2020 – 10/2023**

1 Stand der Technik und ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Projekt EETCM soll durch den Einsatz regelungstechnischer Methoden die Effizienz beim Betrieb dieselgetriebener Triebfahrzeuge verbessert werden. Ausgangspunkt war die These, dass Energieeinsparungen durch eine geeignete Traktionsregelung möglich sind, indem der Eingriff des Schleuder-/Gleitschutzes präventiv vermieden wird. In aktuellen Triebfahrzeugen sind unterschiedliche Schleuder-/Gleitschutzmechanismen eingebaut, welche das Gleiten und Schleudern (d. h., das Blockieren und Durchdrehen der Räder) beenden sollen. Jedoch bewirkt der Eingriff des Schleuder-/Gleitschutzes im Falle des Schleuderschutzes ein Herunterregeln des Motor moments und nach Beendigung des Schleudervorgangs ein erneutes Aufbauen der Traktion. Dies ist energetisch mit einem Mehraufwand gegenüber einer Fahrt mit kontinuierlicher Traktion verbunden. Weiterhin kann es trotz Gleitschutz bei einem einsetzenden Gleitvorgang zu Schäden an Rad und Schiene kommen, welche vermieden werden sollen. Diese Probleme sollten in diesem Projekt durch die Entwicklung einer Regelung, die dem Eingriff des Schleuder-/Gleitschutzes vorbeugt, gelöst werden.

2 Ablauf des Vorhabens

Gemäß der Projektplanung wurde zunächst in Abstimmung mit den Projektpartnern das systemtheoretische Konzept aufgestellt. Dies beinhaltet die Formulierung der Systemgrenzen des benötigten Modells, die Formulierung des Regelungsziels sowie die Aufschlüsselung der Regelstrecke (Zug) in Teilbereiche und deren Zusammenhänge.

Anschließend wurde ein physikalisches/mathematisches Modell für die Regelstrecke anhand von Bewegungsdifferentialgleichungen aus der Literatur aufgestellt. Dabei lag der Fokus auf der Modellierung der translatorischen Bewegung des Zugs. Besondere Aufmerksamkeit erhielt hierbei die Einbindung des Kraftschlussbeiwerts μ als zentrale Kenngröße der Traktion sowie das Verhalten des Antriebsstrangs, um den Einfluss der Hebelstellung des Fahr-/Bremshebels auf die translatorische Bewegung zu bestimmen.

Für die Bestimmung der unbekannten Parameter in den Widerstandskräften und der Fahrhebelübertragungsfunktion des konkreten Zugs wurden Schätzalgorithmen entworfen sowie Experimentierfahrten vorbereitet und durchgeführt. Konkret wurde für die Parameterschätzung ein Kálmánfilter entworfen, welcher mit Hilfe der gemessenen Größen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung die resultierende Zugkraft schätzen kann.

Für die Bestimmung der Messgrößen wurden Anforderungen an die Sensorik im Zug definiert, um – außerhalb des Projektes – einen Triebwagen der Baureihe 642 mit entsprechender Sensorik und Aktuatorik ausstatten und den später entwickelten Regler in der Praxis einsetzen zu können. Dazu wurde ein Schnittstellenkonzept erstellt, welches die Schnittstellen zwischen Sensorik, Regler und Aktuatorik definiert. Die Daten der Sensoren für Beschleunigung, Raddrehzahlen und Geschwindigkeit werden dem Regler über eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Der Regler läuft auf einem Rechner in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink. Über eine Schnittstelle zur Aktuatorik wird dann das Stellsignal des Reglers in eine Empfehlung der Hebelstellung des Fahr-/Bremshebels umgewandelt.

Auf Basis des erstellten Modells wurde eine modellprädiktive Antriebsregelung entworfen. Ziel dieser Regelung ist das Verhindern von Gleiten und Schleudern während der Fahrt, um den Verschleiß an Rädern und Schienen zu minimieren. Unter Einbindung des Modellwissens und von Streckeneigenschaften wie Traktionswerten, Steigung, Höchstgeschwindigkeit und einem Zeitplan wird bei der modellprädiktiven Regelung wiederkehrend ein Optimalsteuerungsproblem

gelöst. Dabei wird eine optimale Folge von Fahrhebelstellungen bestimmt, welche mit minimalem Aufwand in der gegebenen Zeit den nächsten Bahnhof erreicht und dabei Schleudern und Gleiten vermeidet.

Da die Lösung des Optimalsteuerungsproblems zeitaufwendig ist, wurde zur Verbesserung der Echtzeitfähigkeit ein zweistufiger Ansatz verwendet. Zuerst wurde offline, also vor der Fahrt, das Optimalsteuerungsproblem gelöst. Der daraus erhaltene Verlauf der Fahrhebelstellung dient anschließend als Referenz. Online, also während der Fahrt, sorgt der Regler dafür, dass dieser Referenz gefolgt wird.

Auf Basis des erstellten Modells wurde ein Simulationsmodell mittels der Softwareumgebung MATLAB/Simulink erstellt, worin definierte Szenarien abgefahren werden können. Der innerhalb des Projekts entworfene Regler sowie weitere Konzepte mit Hilfe des erstellten Modells wurden ausführlich in Simulationen getestet, bevor sie im Zug umgesetzt bzw. implementiert werden können.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Im Projekt EETCM wurden die Sensorik und die Schnittstellen eines Forschungszugs konzipiert. Diese Arbeit stellt die Grundlage für Folgeprojekte, wie ELFE und 5D.Rail, dar. Unter Verwendung der erzielten Messdaten wurde ein mathematisch/physikalisches Modell des Zugs entworfen und implementiert. Auf Basis dieses Modells wurde eine effiziente und robuste Antriebsregelung des Zugs entworfen, implementiert und anschließend simulativ validiert.

Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation mit dem Titel „A map-based model predictive control approach for train operation“ zusammengefasst und bei der *European Control Conference 2023* eingereicht.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: **Energieeffiziente und robuste Antriebsregelung von Zügen
(FKZ 03WIR1208)**

**Zuwendungs-
empfänger:** **Technische Universität Chemnitz**

Laufzeit: **08/2020 – 10/2023**

1 Durchgeführte Arbeiten

Durch die COVID-19-Pandemie wurde ein Zusammenarbeiten durch Kontaktbeschränkungen erschwert. Dies wirkte sich auch auf den – außerhalb des Projektes – geplanten Umbau des Forschungszuges aus, welcher bereits 2021 fertig gestellt sein sollte. Da der Forschungszug aufgrund von Verzögerungen beim Umbau nicht für Experimente zur Verfügung stand, musste auf einen anderen Zug ausgewichen werden, in dem jedoch nicht die notwendigen Sensoren verbaut waren, um alle notwendigen physikalischen Größen messen zu können. Damit ging ein Mehraufwand in einigen Arbeitspaketen einher, welcher an den jeweiligen Stellen im Bericht erläutert wird. Bevor auf die einzelnen Arbeitspakete eingegangen wird, soll eine Einordnung erfolgen, um ihr Zusammenspiel zu verdeutlichen. Diese Einordnung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Aktuell stellt ein Triebfahrzeugführer den Fahrhebel basierend auf seinen Erfahrungen und Einschätzungen. Um diesen Vorgang zu automatisieren, wurde in AP1 der Zug modelliert, die Traktion analysiert und eine Regelung konzeptioniert. Dieses AP stellt den Übergang von der realen Welt in die abstrakte Welt dar. In AP5 wurde auf dieser abstrakten Ebene eine Traktionsregelung entwickelt. Durch die Implementierung der Regelung in AP6 wurden die theoretischen Ergebnisse wieder in die reale Welt transferiert. In AP7 wurde der Regler im Zugrechner implementiert, um schließlich den Fahrhebel zu stellen bzw. dem Triebfahrzeugführer eine Empfehlung zu dessen Stellung zu liefern. Inhalt von AP3 war die Kommunikation zwischen Zugrechner und Zug durch ein Schnittstellenkonzept. Die verbleibenden drei Arbeitspakete bezogen sich auf das Projekt als Ganzes.

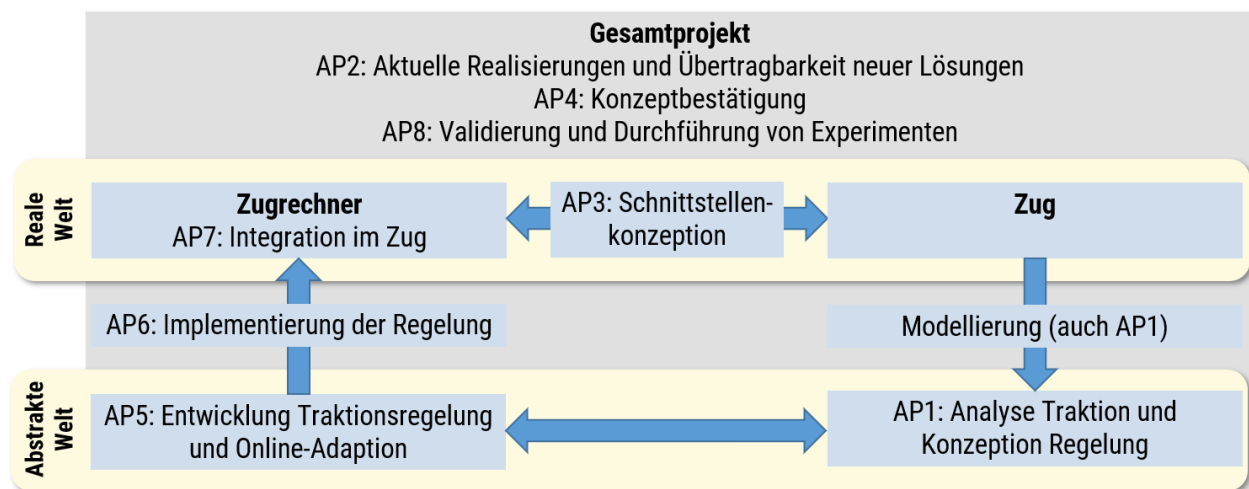


Abbildung 1: Einbindung der einzelnen Arbeitspakete in das Gesamtvorhaben

AP 1: Analyse Traktion und Konzeption Regelung

Zu Beginn stand das Aufstellen des mathematischen Konzepts im Vordergrund. Da eine energieeffiziente Antriebsregelung im Projekt angestrebt wurde, wurde zuerst untersucht, an welchen Stellen es zu Energieverlusten kommt. Dabei stellte sich heraus, dass Gleiten und Schleudern einen signifikanten Einfluss haben. Zusätzlich schädigen sie sowohl die Räder des Zuges als auch die Schienen. Dadurch stellte sich bereits zu Projektbeginn heraus, dass diese beiden Phänomene verhindert werden sollten. Um dies sicherzustellen, wurde nach Ansätzen für eine Traktionsregelung recherchiert.

In einer ausführlichen Literaturrecherche zeigt sich, dass aktuell realisierte Traktionsregelungen hauptsächlich in drei Kategorien eingeteilt werden können:

- Regelung auf konstanten Sollschlupf,
- Regelung auf maximalen Kraftschluss mittels Suchverfahrens,
- Regelung auf maximalen Kraftschluss mittels Gradientenverfahrens.

Diese drei Kategorien werden nachfolgend beschrieben.

Die Regelung auf konstanten Sollschlupf ist die einfachste Variante. Hierbei wird ein von anderen Größen unabhängiger, konstanter Sollwert für den Radschlupf vorgegeben. Der Nachteil dieser Vorgabe ist, dass der Sollschlupf nur für gewisse Bedingungen ideal ist, da sich Kraftschlusskurven und deren Maxima in Abhängigkeit von verschiedenen Schienenbedingungen teils deutlich unterscheiden. Dies ist in Abbildung 2 zu sehen. Bei anderen Bedingungen als der, für die der Sollschlupf festgelegt wurde, kann der Kraftschluss teils deutlich niedriger ausfallen sowie hoher Schlupf zu einem erhöhten Verschleiß führen.

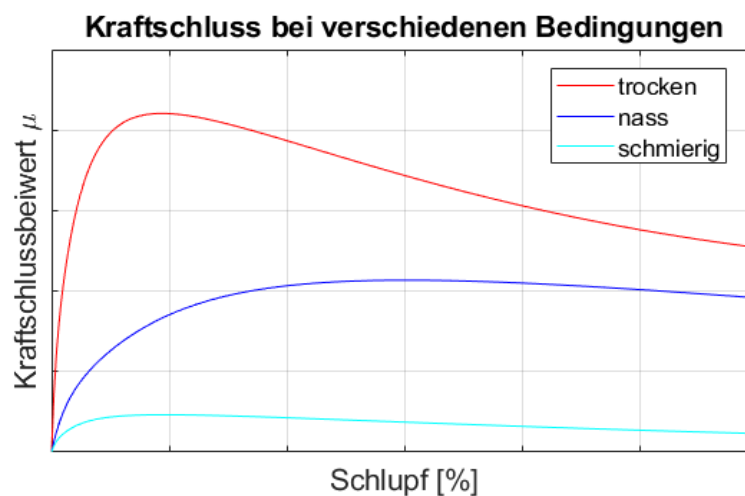


Abbildung 2: Kraftschlussbeiwert in Abhängigkeit des Schlupfs bei verschiedenen Schienenbedingungen

Die Suchverfahren nutzen verschiedene Suchalgorithmen, um das Maximum des Kraftschlussbeiwerts μ zu finden, und geben den zugehörigen Schlupfwert als Sollwertvorgabe aus. Auch hierbei entstehen Nachteile, da das Kraftschlussmaximum durch die Suche periodisch überschritten wird. Dies führt zur Absenkung des Motormoments, um einen Schleuder-/Gleitvorgang zu verhindern. Abschließend wird das Motormoment wieder solange erhöht, bis das Maximum des Kraftschlussbeiwerts erreicht ist. Dadurch kann es zur Anregung von Resonanzstellen kommen, welche vermieden werden sollten. Da das Maximum nur zyklisch und kurzzeitig erreicht wird, ist die Ausnutzung des Kraftschlusses suboptimal.

Bei der Regelung mittels Gradientenverfahrens wird das Kraftschlussmaximum durch Bildung der Ableitung einer Kraftschlussfunktion ermittelt. Dies ermöglicht prinzipiell das Fahren mit nahezu maximalem Kraftschluss, hat aber den Nachteil, dass die Konvergenz durch die Ableitungsbildung langsam ist. Dies führt dazu, dass Schleuder-/Gleitvorgänge möglicherweise nicht schnell genug erkannt werden können, sodass Zusatzfunktionen zum Erkennen notwendig werden.

Anhand der Erkenntnisse fand eine Potentialanalyse neuer Ansätze statt. Darin wurde das Potential einer Traktionsregelung mit dem Fokus auf einem maximalen Wirkungsgrad im Rad-Schiene-Kontakt analysiert. In der Analyse konnte durch den Ansatz eine Erhöhung des Wirkungsgrads im Rad-Schiene-Kontakt um 1-2 % erreicht werden. Da die Strategie jedoch mit einer geringeren Zugkraftanforderung einhergeht, werden die Antriebsstrangkomponenten teilweise in Bereichen schlechter Wirkungsgrade betrieben. Die Verluste im Antriebsstrang würden jedoch im Vergleich

mit dem Gewinn im Rad-Schiene-Kontakt deutlich höher ausfallen, so dass sich insgesamt keine Verbesserung des Wirkungsgrads einstellen würde. Diese Strategie wurde daher verworfen.

Alternativ ergab sich die Idee, Energieeinsparungen herbeizuführen, indem das Eingreifen des Schleuder-/Gleitschutzes durch eine Traktionsregelung selbst bei widrigsten Bedingungen im Voraus vermieden wird. Der Eingriff des Schleuder-/Gleitschutzes bewirkt im Falle des Schleuderschutzes ein Herunterregeln des Motormoments und nach Beendigung des Schleudervorgangs ein erneutes Aufbauen der Traktion. Dies ist energetisch mit einem Mehraufwand gegenüber einer Fahrt mit kontinuierlicher Traktion verbunden. Weiterhin kann es trotz Gleitschutz bei einem einsetzenden Gleitvorgang zu Schäden an Rad und Schiene kommen, welche vermieden werden sollen. Diese Probleme können mit einer Regelung, die dem Eingriff des Schleuder-/Gleitschutzes vorbeugt, gelöst werden. Daher wird diese Idee der Regelung als mathematisches/systemtheoretisches Konzept weiterverfolgt.

Einen weiteren Bestandteil des ersten Arbeitspaketes stellte die regelungstechnische Modellierung der Regelstrecke anhand von Bewegungsgleichungen aus der Literatur dar. Dabei lag der Fokus auf der Modellierung der Längsdynamik mittels Differentialgleichungen für die translatorische Bewegung des Zugs und die Rotationsbewegung der angetriebenen Räder. Besondere Aufmerksamkeit erhielt hierbei die Modellierung des Kraftschlussbeiwerts μ als zentrale Kenngröße in der Traktion sowie das Verhalten des Antriebsstrangs, da der Motor nicht direkt, sondern über die Vorgabe einer Hebelstellung des Fahr-/Bremshebels angesteuert wird. Hierbei ergab sich die Herausforderung, dass das Verhalten der Antriebsstrangkomponenten aufgrund von Betriebsgeheimnissen nicht direkt zur Verfügung steht. Daher wurden kurze Testfahrten im Juli 2021 auf dem Werksgelände der Erzgebirgsbahn mit einem regulären Zug durchgeführt, wo zum einen Ausrollversuche aufgezeichnet wurden und zum anderen die Übertragung des Fahr-/Bremshebels auf die Beschleunigung untersucht wurde. Dabei wurden GPS- und Beschleunigungsdaten sowie Laufachsendrehzahl, Treibachsensendrehzahl und Beschleunigungszeit bei voller Beschleunigung aufgenommen. Mit Hilfe dieser Daten konnten erste Modelle aus der Literatur verifiziert und parametrisiert werden. Da jedoch der Einfluss der Fahrhebelstellung auf die Dynamik des Zuges nicht vollständig untersucht werden konnte, sind weitere Versuche nötig, bei denen auch die genaue Fahrhebelstellung aufgezeichnet werden kann. Da im weiteren Verlauf des Projektes keine weiteren Testfahrten durchgeführt werden konnten, musste die Literaturrecherche ausgedehnt werden, um die benötigten Parameter zu identifizieren und die Modellierung abschließen zu können. Grund dafür ist die Verzögerung beim Umbau des Forschungszuges, welche unter anderem durch die COVID-19 Pandemie bedingt war. Weitere Informationen zu den Testfahrten folgen in AP4.

Um basierend auf den aufgenommenen Daten weitere Erkenntnisse über das Modell zu erlangen, wurde ein Zustandsschätzer/Kálmán-Filter entworfen, welcher zum einen die aufgenommenen Daten glättet und Messfehler beseitigt und zum anderen die Zugkraft basierend auf den Daten ermittelt. Es stellte sich heraus, dass sie zuverlässig geschätzt werden konnte. Mit der Kenntnis anderer angreifender Kräfte, wie zum Beispiel Reibungskräften, konnte aus der Zugkraft auch die Antriebskraft ermittelt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse flossen in das Modell der Zugdynamik ein.

Auf Basis der erstellten Gleichungen der Zugdynamik wurde ein Simulationsmodell mittels der Softwareumgebung MATLAB/Simulink erstellt, worin definierte Szenarien abgefahren werden können. Dieses Modell wurde ergänzt, um ein vorausschauendes Fahren ohne Auslösen des Schleuder-/Gleitschutz-Mechanismus zu gewährleisten. Schwierigkeit war auch hier, dass der Schleuder-/Gleitschutz ein Betriebsgeheimnis ist, weshalb er ohne ausreichende Testfahrten nicht zufriedenstellend modelliert werden kann. Um ihn jedoch zu berücksichtigen, wurde ein

Gespräch mit einem Triebfahrzeugführer durchgeführt, um Informationen über den Mechanismus aus dessen Sicht und damit Expertenwissen zu erlangen. Da diese Informationen jedoch nicht ausreichend waren, um den Mechanismus in das vorhandene Modell einzubinden, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass eine Kenntnis über die aktuell vorliegenden Traktionsbedingungen das Kernelement darstellt, um den Eingriff des Schleuder-/ Gleitschutzes bei jeglichen Bedingungen vorzubeugen. Dabei charakterisiert der Kraftschlussbeiwert die aktuellen Traktionsbedingungen. Da jedoch nur Geschwindigkeit und Raddrehzahlen mittels Sensorik messbar sind, muss er mittels dieser Größen geschätzt werden. Um sicherzustellen, dass dies möglich ist, wurde eine Beobachtbarkeitsanalyse durchgeführt. Für die Identifikation des Kraftschlussbeiwerts sind zwei verschiedene Ansätze denkbar. Der erste basiert auf der Rotationsgleichung der Räder und damit auf einer Momentengleichung, der zweite auf der Translationsgleichung des Zuges und damit auf einer Kräftegleichung. Es stellte sich heraus, dass für den ersten Ansatz eine Kenntnis des Motordrehmoments nötig ist. Da dieses im Rahmen des Projekts nicht direkt messbar ist, muss es über die Motordrehzahl und gegebene Motorkennlinien abgeschätzt werden. Für den zweiten Ansatz muss die Beschleunigung gemessen werden. Beide Ansätze wurden in das Simulationsmodell integriert und in Simulationsstudien erprobt. Eine beispielhafte Simulationsstudie ist in Abbildung 3 zu erkennen. Darin zeigt die rote Kurve den tatsächlichen Verlauf des Kraftschlussbeiwerts, die blaue Kurve die Identifikation mittels der Rotationsgleichung und die grüne Kurve die Identifikation anhand der Translationsgleichung. Für beide Ansätze ist zu erkennen, dass sie dem tatsächlichen Verlauf des Kraftschlussbeiwerts mit gewissen Abweichungen folgen.

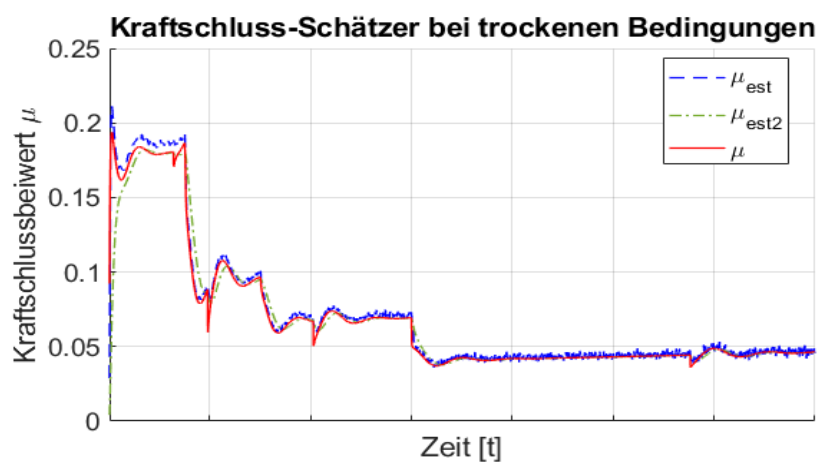


Abbildung 3: Identifikation des Kraftschlussbeiwerts. Hier stellt μ (rot) den tatsächlichen Verlauf dar und die beiden anderen Kurven (blau und grün) zwei geschätzte Verläufe. Somit lässt sich der Kraftschlussbeiwert mit Schätzverfahren ermitteln.

AP 2: Aktuelle Realisierungen und Übertragbarkeit neuer Lösungen

Das zweite Arbeitspaket beinhaltet aktuelle Realisierungen und die Übertragbarkeit neuer Lösungen, welches von der TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen übernommen werden sollte. Am 25.11.2021 wurde stattdessen die IfB Institut für Bahntechnik GmbH beauftragt. Für die Abweichung vom Antrag sprach unter anderem, dass einige der geplanten Leistungen, insbesondere Recherchetätigkeiten, bereits im ersten Arbeitspaket stattfanden. Die Aufgaben des IfB bestanden in der Erbringung verschiedener Begleitungs- und Validierungsleistungen und die Einbringung ihrer Expertise, indem Seminare angeboten und technische Stellungnahmen sowie Gutachter-tätigkeiten erbracht wurden. In drei Seminaren wurde projektrelevantes Wissen zu den Themen

„Bremsvorgänge bei Zügen“, „Automatisiertes Fahren in Zügen“ und „Grundlagen des Bahnverkehrs“ vermittelt. Die Inhalte konnten genutzt werden, um bestehende Modelle zu verbessern und einen besseren Überblick für nachfolgende Arbeitspakete zu erhalten.

AP 3: Schnittstellenkonzeption

Dieses Arbeitspaket umfasste die Konzeption der Schnittstellen, d. h. deren Formulierung und Implementierung. In Zusammenarbeit mit den Partnern wurde ein Schnittstellenkonzept erstellt, welches die Schnittstellen zwischen Sensorik, Regler und Aktorik definiert – dieses ist in Abbildung 4 dargestellt.

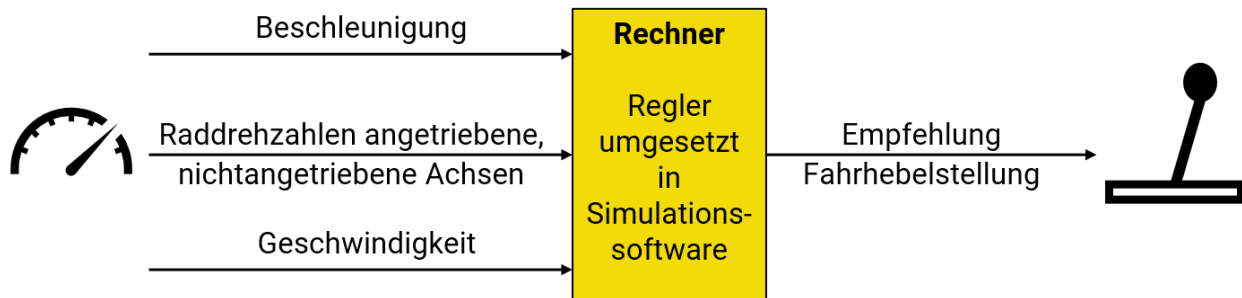


Abbildung 4: Das Schnittstellenkonzept: Informationen zu gemessenen Größen, wie zum Beispiel Beschleunigung, Geschwindigkeit und Raddrehzahlen angetriebener und nichtangetriebener Achsen, stehen dem Regler zur Verfügung. Der in einer Simulationssoftware umgesetzte Regler berechnet eine empfohlene Fahrhebelstellung, welche vom Triebfahrzeugführer umgesetzt werden kann.

Die Daten der Sensoren für Beschleunigung, Raddrehzahlen und Geschwindigkeit müssen dem Regler über eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Sie resultieren entweder aus verbauten Sensoren, wie z. B. Beschleunigungssensoren, oder aus Softsensoren, also Schätzmethoden, die die nicht messbaren Größen ermitteln. Der Regler wird auf einem Rechner in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink laufen. Über eine Schnittstelle zur Aktorik wird dann das Stellsignal des Reglers in eine Empfehlung der Hebelstellung des Fahr-/Bremshebels umgewandelt, da nicht direkt auf den Fahr-/Bremshebel Einfluss genommen werden darf. Die Schnittstellen konnten im Forschungszug bisher noch nicht implementiert werden, da der Umbau des Forschungszuges zum Projektende noch andauerte. Dennoch wurden bereits Vorbereitungen getroffen, um sie nach erfolgreicher Fertigstellung des Forschungszuges zu implementieren. So soll die Kommunikation zwischen Zug und Zugrechner über ROS (Robot Operating System) laufen, welches der Simulationsumgebung MATLAB Sensordaten zur Verfügung stellt. Nach erfolgreicher Berechnung der Fahrhebelstellung (mehr dazu in AP5) wird diese dann, sofern es zu einem späteren Zeitpunkt erlaubt wird, umgesetzt. Dadurch wird die Beschleunigung des Zuges so angepasst, dass eine energieoptimale Fahrt gewährleistet wird, bei der Gleiten und Schleudern verhindert wird.

AP 4: Konzeptbestätigung

Dieses Arbeitspaket sah zunächst eine Bestätigung des Regelungskonzeptes vor. Bei der Vorstellung des Konzepts vor den Projektpartnern stellte sich heraus, dass – wie bereits im Absatz zu AP 3 beschrieben – die Fahrhebelstellung aktuell nicht gestellt werden kann, sondern nur eine Empfehlung durch den Regler erfolgt. Wie bereits in AP 1 beschrieben, wurden auch die Daten aus den Messfahrten genutzt, um das Modell, welches einen wesentlichen Bestandteil des Konzeptes darstellt, zu bestätigen.

In einem weiteren Schritt erfolgte eine Versuchskonzeption, um unbekannte Parameter in der Regelstrecke zu schätzen. Dies beinhaltet insbesondere die Fahrhebelübertragungsfunktion, also den zeitlich-dynamischen mathematischen Zusammenhang zwischen Fahrhebelstellung und

Motordrehzahl bzw. Zugbeschleunigung, sowie den Einfluss der Widerstandskräfte. In einer ersten Versuchsserie am 07.07.2021 auf dem Werksgelände der Erzgebirgsbahn wurden zuerst Ausrollversuche durchgeführt, bei denen der Zug auf eine vorher festgelegte Geschwindigkeit beschleunigt und anschließend der Fahrhebel auf null gestellt wurde. Dadurch konnte der Einfluss des Rollwiderstandes und anderer Reibkräfte auf die Dynamik des Zuges untersucht werden. In einer weiteren Versuchsserie am gleichen Tag wurden Beschleunigungsversuche mit unterschiedlichen Positionen des Fahr-/Bremshebels durchgeführt. Eine Schwierigkeit hierbei ist, dass die genaue Position des Hebels nicht bekannt ist. Dadurch können bloß zuverlässige Aussagen über das Beschleunigungsverhalten getroffen werden, wenn sich der Fahrhebel am Anschlag befindet. Aus diesen Versuchen konnten Aussagen zur Übertragung der Fahr-/Bremshebelstellung auf die Zugkraft und Zuggeschwindigkeit abgeleitet werden. Das sich daraus ergebende charakteristische Zugkraftdiagramm wurde mit Werten aus Datenblättern verglichen (siehe Abbildung 5). Die geschwindigkeitsabhängige Zugkraft konnte aber nur bis zu einer Geschwindigkeit von 40 km/h aufgenommen werden, da aufgrund der begrenzten Streckenlänge auf dem Werksgelände keine höheren Geschwindigkeiten erreicht werden konnten. Auffällig dabei ist ein großer Unterschied im kleinen Geschwindigkeitsbereich. Die Ursache für die große Abweichung liegt in einer internen Leistungsabregelung der Zugleistung in kleinen Geschwindigkeiten. Diese Abregelung wurde anschließend untersucht, indem die Motorsolldrehzahl gemessen wurde. Dabei stellte sich heraus, dass bei einem Sprung des Fahrhebels auf das Maximum die Motorsolldrehzahl nicht auch auf den maximalen Wert springt, sondern nur auf die Hälfte und erst ca. 10 Sekunden später auf den maximalen Wert (siehe Abbildung 6). Durch diese interne Abregelung kann in kleinen Geschwindigkeitsbereichen nicht die volle Zugkraft erreicht werden.

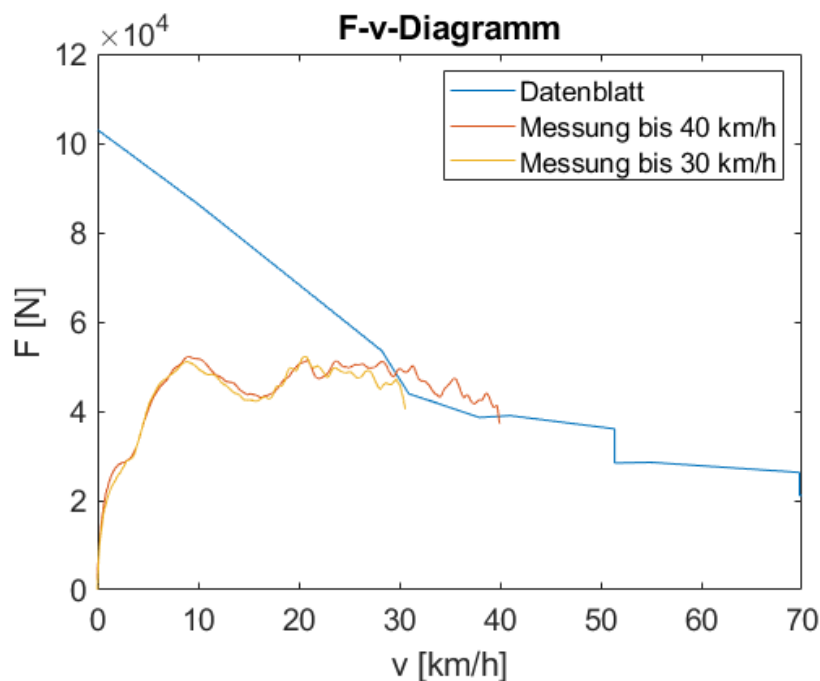


Abbildung 5: Vergleich der geschätzten Zugkraft bei maximaler Fahrhebelstellung bei Sprungversuch bis 30 km/h (gelb) bzw. bis 40 km/h (rot) mit der theoretisch erwarteten Zugkraft (blau).

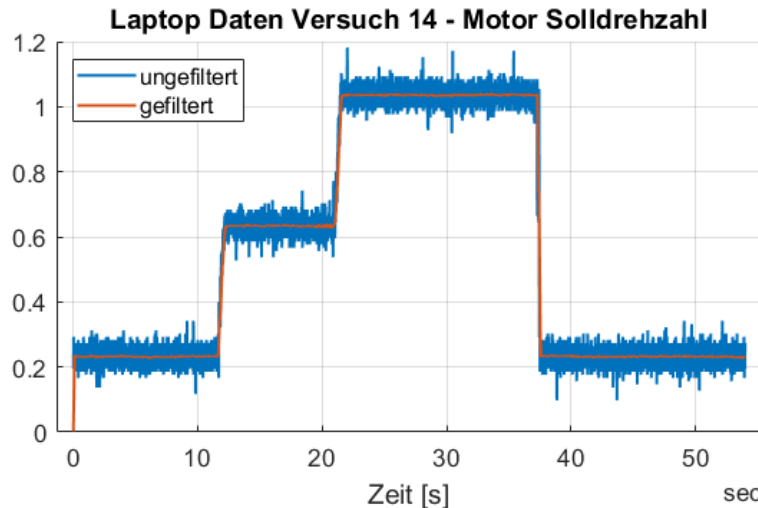


Abbildung 6: Experimentell bestimmter Sensorspannungswert der Motorsolldrehzahl bei einer Fahrhebelstellung von 100 % ab Sekunde 12. Bis Sekunde 22 ist die Motorsolldrehzahl auf rund 50 % intern abgeregelt.

Zur Verifikation dieser Erkenntnisse wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die nachvollziehbarsten Ergebnisse lieferte eine Internetseite, bei der die Zugkraft und die Zugbeschleunigung für verschiedene Geschwindigkeiten dargestellt wurden (siehe Abbildung 7). Dieses wurde mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschrieben, wodurch die Übertragung von Fahrhebelstellung auf Beschleunigung zu erkennen ist.

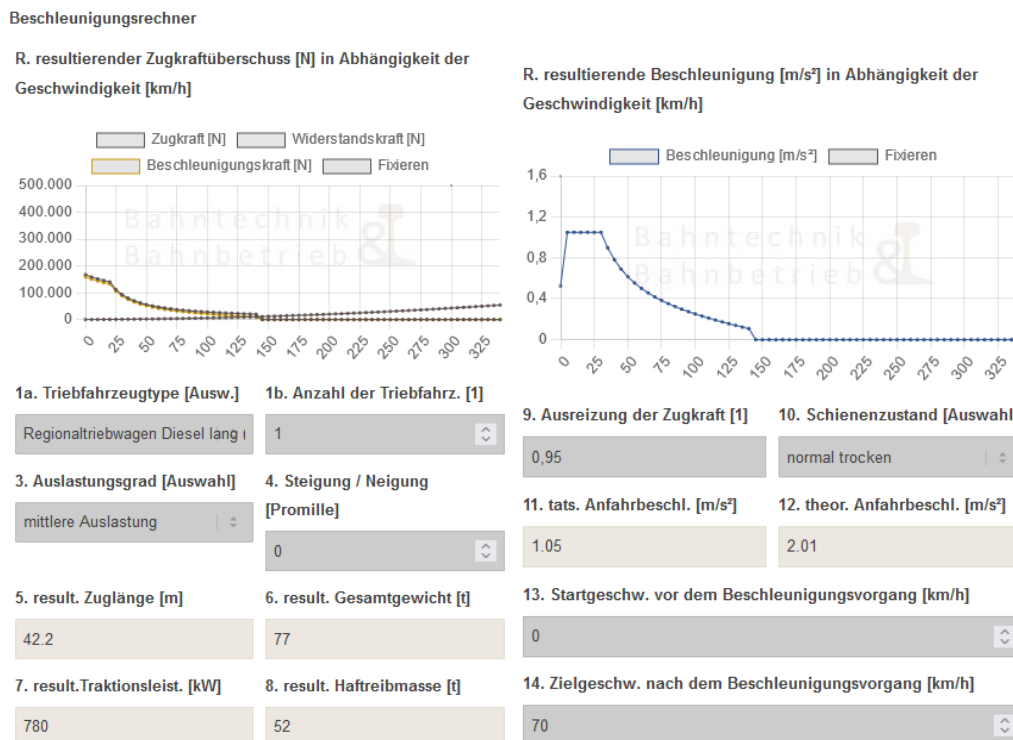


Abbildung 7: Zugkraftdiagramm und Beschleunigungsdiagramm für einen Regionaltriebwagen <https://www.bahntechnik-bahnbetrieb.de/%20beschleunigungsrechner/> (aufgerufen am 13.02.2024)

Um die Zugdynamik für höhere Geschwindigkeiten zu ermitteln, wurde eine zweite Messfahrt am 12.08.2022 unternommen. Dabei wurden Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung während einer regulären Fahrt von Chemnitz nach Cranzahl und zurück aufgenommen. Die ermittelten Daten lieferten Rückschlüsse auf die Höchstgeschwindigkeiten entlang der Strecke und ein mögliches Beschleunigungsverhalten. Die Schwierigkeit hierbei ist jedoch, dass die Fahrhebelstellung

nicht aufgezeichnet werden konnte, wodurch die Daten nicht zur Validierung genutzt werden konnten.

Bei der Durchführung der Experimente stellte sich zudem heraus, dass mit dem gewählten Regelungskonzept ein Auftreten von Schleudern oder Gleiten nicht in allen Fällen verhindert werden kann. An Stellen mit schnellen Änderungen der Traktionsbedingungen, beispielsweise bei Laub auf der Schiene an Waldeinfahrten oder unterschiedlichen Witterungsverhältnissen bei Ein-/Ausfahrten in Bahnhöfen, Tunneln und Brücken, kann sich der Schlupf sprunghaft ändern. Das Auftreten von Gleiten oder Schleudern kann an diesen Stellen durch die Trägheit des Zugs und die benötigte Rechenzeit für Identifikation und Arbeitspunktberechnung durch konventionelle Regler nicht rechtzeitig verhindert werden.

Das entwickelte Konzept wurde daraufhin überarbeitet, um auch an Stellen mit sprunghaften Änderungen der Traktionsbedingungen Schleudern und Gleiten verhindern zu können. Dazu wurde ein prädiktiver Ansatz genutzt: In einem ersten Schritt werden lokale Traktionsbedingungen identifiziert und in einer Karte abgelegt. Im aktuellen Projekt wird angenommen, dass diese Karte bereits gegeben ist. Der Aufbau der Karte ist Gegenstand von Folgeprojekten und erfolgt durch das Abfahren der Strecke im Regelbetrieb und die Speicherung relevanter Größen. In einem zweiten Schritt verwendet ein modellprädiktiver Regler die in der Karte hinterlegten Streckendaten, um schon vor den kritischen Stellen prädiktiv die Zugleistung zu drosseln und somit Schleudern und Gleiten zu vermeiden. Das überarbeitete Konzept ist in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt und wurde am 26.09.2022 im Rahmen eines Seminars den Projektpartnern vorgestellt. Abbildung 8 beschreibt den Aufbau einer Karte, indem zuerst Traktionsparameter der Schiene geschätzt werden und anschließend in einer Karte gespeichert werden (Inhalt Folgeprojekt). Abbildung 9 beschreibt das generelle Vorgehen unter Nutzung einer Karte: Mit Hilfe der Streckeninformationen werden optimale Trajektorien berechnet. Der Regler sorgt anschließend dafür, dass der Zug diesen Trajektorien folgt.

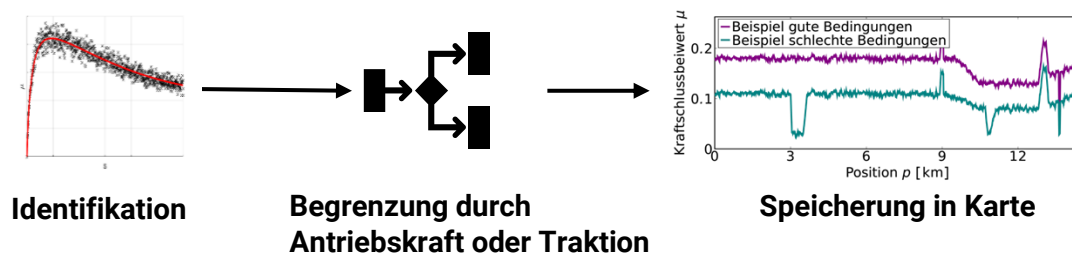


Abbildung 8: Darstellung des Konzepts zur Identifikation der Traktionsdaten und Abspeicherung in einer Streckenkarte. Im Betrieb werden die aktuellen Traktionsparameter der Schiene geschätzt und für die nächste Fahrt in einer Karte hinterlegt. Dabei muss beachtet werden, dass eine Schätzung dieser nur dann möglich ist, wenn die aktuelle Kraftübertragung Rad $\rightarrow$ Schiene durch die Traktion begrenzt ist. Ansonsten muss für die aktuelle Position ein Standardwert angenommen werden. Für die Regelung stellt dies kein Problem dar, da es nur bedeutet, dass an dieser Stelle stärker beschleunigt werden könnte, als dass es der Motor leisten kann. Es handelt sich also um eine für die Regelung unkritische Stelle.

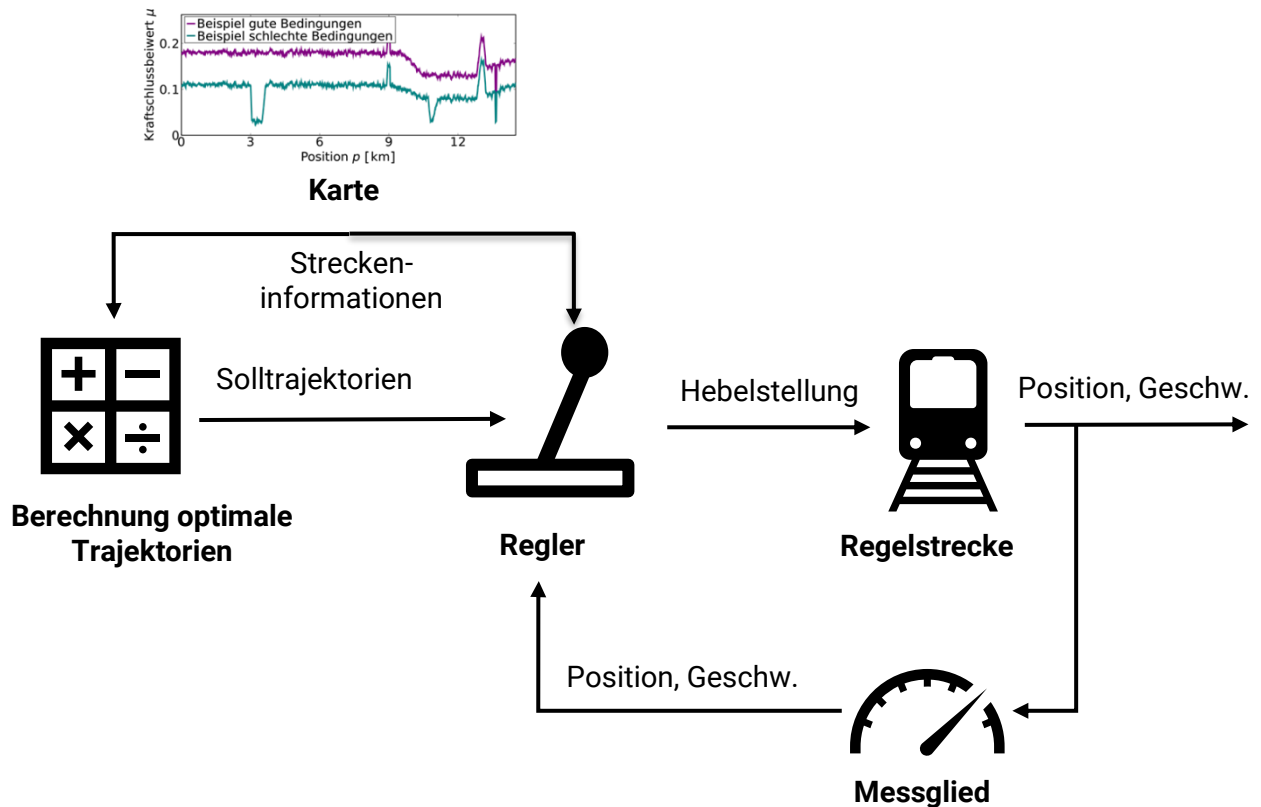


Abbildung 9: Darstellung des überarbeiteten Regelungskonzepts zur kartenbasierten prädiktiven Regelung. Mit einer Karte können optimale Trajektorien für Zuggeschwindigkeit und -position sowie Sollfahrhebelstellung berechnet werden. Ein Regler ist dann für die Umsetzung der Trajektorien verantwortlich und ist in der Lage, auf Störungen (z. B. Wetterwechsel oder Verspätungen) zu reagieren. Die Trajektorien sind so optimiert, dass es zu keinem Gleiten bzw. Schleudern kommen kann und der Zug pünktlich am Bahnhof erscheint.

Durch die langjährige praktische Erfahrung aus dem Eisenbahnsektor und durch spezielle Kenntnisse zum Rad-Schiene-Kontakt der Mitarbeiter des Instituts für Bahntechnik GmbH (IfB) konnte das überarbeitete Konzept bestätigt werden. Damit konnte der Arbeitspunkt „Konzeptbestätigung“ erfolgreich abgeschlossen werden.

AP 5: Entwicklung Traktionsregelung und Online-Adaption

Dieses Arbeitspaket umfasst die Entwicklung einer Traktionsregelung und deren Online-Adaption. Um traktionsrelevante Nebenbedingungen während der Fahrt zu berücksichtigen, wurde eine modellprädiktive Regelung entworfen. Ziel dieser modellprädiktiven Traktionsregelung ist das Verhindern von Gleiten und Schleudern während der Fahrt, um den Verschleiß an Rädern und Schienen zu minimieren. Um beides zu vermeiden, dürfen maximal erlaubte Traktionswerte nicht überschritten werden. Die Traktion ist abhängig von der Position, also dem Streckenabschnitt. Es gibt Einflussfaktoren, die teilweise im Vorfeld bestimmt werden können (z. B. durch die Topografie der Strecke oder durch die aktuelle Jahreszeit). Andere hingegen können kurzfristig eine Änderung der maximal erlaubten Traktion erzeugen. Darunter zählen bspw. Streckenverunreinigungen. Bei solchen kurzfristigen Änderungen können Gleiten und Schleudern wegen der plötzlich veränderten (und damit unbekannten) Gegebenheiten nicht immer verhindert werden, jedoch können solche Änderungen in der Karte vermerkt werden, um sie bei nachfolgenden Fahrten zu berücksichtigen.

Neben Traktionswerten entlang der Strecke sind auch weitere Streckeneigenschaften, wie etwa Steigung, Höchstgeschwindigkeit und ein Zeitplan, also wann welcher Bahnhof erreicht werden

soll, im Modell enthalten. All diese anwendungsbezogenen Nebenbedingungen müssen beim Betrieb des Zuges berücksichtigt werden, was aus mathematischer Sichtweise auf das folgende Optimalsteuerungsproblem (OSP) führt:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{station}}} u^2 dt \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \dot{x} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_2 \\ -\frac{F_r(x_2)}{m} \end{pmatrix}}_{=:f(x;m)} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_1 e^{k_2 x_2} + k_3}{m} \end{pmatrix}}_{=:g(x;m)} u \quad (2)$$

$$x(t_0) = x_0, x(t_{\text{station}}) \in \mathcal{X}_{\text{station}}, \quad (3)$$

$$f_2(x; m_{\min}) + g_2(x; m_{\min})u - a_{\max} \leq 0 \quad (4)$$

$$-(f_2(x; m_{\max}) + g_2(x; m_{\max})u) - a_{\max} \leq 0 \quad (5)$$

$$g_2(x; m_{\min})u - \mu_{\max}(x_1)g \leq 0 \quad (6)$$

$$-g_2(x; m_{\max})u - \mu_{\max}(x_1)g \leq 0 \quad (7)$$

$$x_2 - v_{\max}(x_1) \leq 0 \quad (8)$$

$$-1 - u \leq 0 \quad (9)$$

$$u - 1 \leq 0 \quad (10)$$

Gesucht ist also die optimale Lösung u^* in Form einer Fahrhebelposition, welche sich als Minimum einer Kostenfunktion bzw. eines Gütekriteriums ergibt. In diesem Gütekriterium ist die Fahrhebelstellung enthalten, welche über den gesamten Zeithorizont zwischen den Bahnhöfen minimiert werden soll. Dabei sollen die Nebenbedingungen (2)-(10) berücksichtigt werden. Gleichung (2) stellt die Beschreibung der Systemdynamik dar. Diese ist gegeben als Summe der Zugdynamik, welche aus einem Kräftegleichgewicht entsteht, sowie einer Abbildung der Fahrhebelstellung auf die Antriebskraft. Als Zustandsgrößen in (2) wurden dabei die Position des Zuges x_1 entlang der Strecke sowie die zugehörige Geschwindigkeit x_2 gewählt. In Gleichung (3) finden sich eine Startbedingung und eine Endbedingung. Letztere stellt sicher, dass der Bahnhof zur gewünschten Zeit erreicht wird. Gleichungen (4) und (5) stellen sicher, dass die aktuelle Beschleunigung kleiner als eine aus Sicherheitsaspekten gegebene Maximalbeschleunigung ist. In den Gleichungen (6) und (7) wird die Beschleunigung durch die maximal erlaubte Traktion entlang der Strecke beschränkt. Dass die Nebenbedingungen für alle zulässigen Massen erfüllt sind, wird durch die Berücksichtigung der minimalen Masse $m_{\min}$ (also dem Leergewicht) und der maximalen Masse $m_{\max}$ (dem Leergewicht sowie der maximalen Zuladung) gewährleistet. Diese Herangehensweise sichert eine Robustheit, sodass man zulässige Lösungen unabhängig von der tatsächlichen Personenzahl erhält. Gleichung (8) stellt die Höchstgeschwindigkeit entlang der Strecke dar. Zuletzt beschränken Gleichungen (9) und (10) die Fahrhebelstellung, welche per Definition zwischen -100% und 100% liegt.

Die Lösung des OSPs stellt sich als zeitaufwändig heraus, da eine Lösung über den gesamten Optimierungshorizont, also bis zum nächsten Bahnhof, berechnet werden muss. Da dadurch die Echtzeitfähigkeit des Ansatzes nicht gegeben ist, wurde der Ansatz erweitert. Dazu wurde zuerst offline (also vor Fahrtantritt) mithilfe eines Mehrfachschießverfahrens eine zulässige Lösung ermittelt, d. h. ein zeitlicher Verlauf für die Fahrhebelstellung, unter deren Anwendung alle Beschränkungen eingehalten werden und somit der Zug pünktlich und ohne Gleiten und Schleudern die jeweiligen Zielbahnhöfe erreicht. Dieser Verlauf (vergleiche Abbildung 10) dient als Referenztrajektorie, der eine modellprädiktive Regelung (MPC) folgen soll. Dieser zweistufige Ansatz besitzt zwei Vorteile: Zum einen benötigt MPC weniger Rechenzeit als das Lösen des OSPs über

den gesamten Zeithorizont und zum anderen können auch Störungen durch MPC berücksichtigt werden. Zu solchen Störungen zählen beispielsweise veränderte Wetterbedingungen, die durch Nutzung einer neuen Karte während der Optimierung einbezogen werden können. Ein anderes Beispiel ist eine kürzere Fahrzeit, die durch eine verspätete Abfahrt bedingt ist. Die Fähigkeit der MPC, auf solche Störungen zu reagieren, liegt in dem sich verändernden Prädiktionshorizont, d. h., dass für eine gewisse Zeit (beispielsweise 15 Sekunden) das Systemverhalten prädiziert wird, was eine Steuerfolge liefert, deren erstes Element als Steuerung angewendet wird. Im Anschluss wird der Prädiktionshorizont verschoben und eine neue Berechnung erfolgt, bei der die erwähnten, plötzlich auftretenden Störungen berücksichtigt werden können. Um Schwierigkeiten zu vermeiden, die mit zeitkontinuierlichen nicht-linearen Modellen eintreten können, wurde die Zugdynamik zuerst entlang der ermittelten Referenztrajektorie linearisiert und anschließend zeitlich diskretisiert. Als Ergebnis erhält man eine Standardformulierung, die mit bekannten Methoden gelöst werden kann. Als Lösung erhält man eine Fahrhebelstellung, die der Triebfahrzeugführer dann einstellt. Im besten Falle wird diese Fahrhebelstellung direkt auf den Zug angewendet, also ohne den Triebfahrzeugführer. So werden auch Verzögerungen verhindert, die ein Gleiten und Schleudern erzeugen könnten, falls der Fahrhebel nicht wie berechnet gestellt wird.

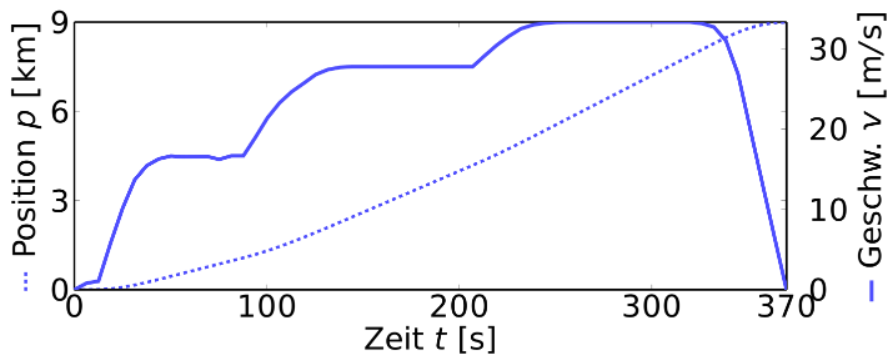


Abbildung 10: Ermittlung eines Referenzprofils für Position und Geschwindigkeit, dem der Regler folgen soll.

Um zu zeigen, dass der Ansatz den Anforderungen genügt, wurden Simulationsstudien durchgeführt. Dabei wurden Wettereinflüsse betrachtet, die einen signifikanten Einfluss auf die Traktionswerte entlang der Strecke haben. Es wurde zuerst eine Referenztrajektorie basierend auf guten Wetterbedingungen ermittelt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl bei gleichen Wetterverhältnissen (siehe Auswertung in den Abbildungen 11 und 12) als auch bei schlechteren Wetterverhältnissen (wie etwa plötzlich einsetzendem Regen) der Referenz gefolgt werden kann. Im letzten Fall kann man erkennen, dass der Zug wegen der schlechteren Traktionsbedingungen näher vor dem Schleudern/Gleiten war, diese Zustände aber nie aufgetreten sind (siehe Abbildung 13). Außerdem wurde gezeigt, dass Verspätungen unter Einhaltung aller Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbeschränkungen reduziert werden können (siehe Abbildung 14), sofern der Fahrplan dies hergibt. Die Ergebnisse wurden in einer Publikation mit dem Titel „A map-based model predictive control approach for train operation“ zusammengefasst und auf einer renommierten Regelungstechnikkonferenz, der European Control Conference 2023 (ECC 2023), vorgestellt, was die Sichtbarkeit der Technischen Universität Chemnitz und des Vorhabens signifikant erhöhte.

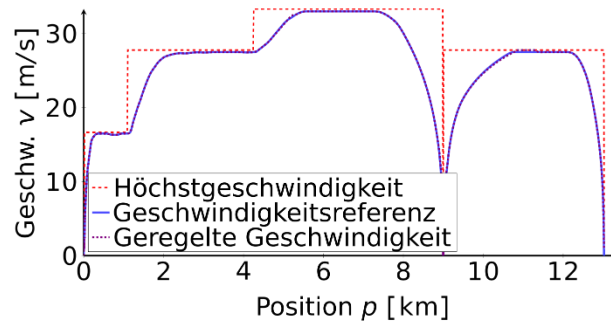


Abbildung 11: Darstellung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit (rot) entlang der Strecke, der offline (im Voraus) berechneten Referenzgeschwindigkeit (blau) sowie der von der modellprädiktiven Regelung online (während der Fahrt) berechneten Geschwindigkeit (lila). Man erkennt, dass an jedem Punkt der Strecke die Höchstgeschwindigkeit eingehalten wurde.

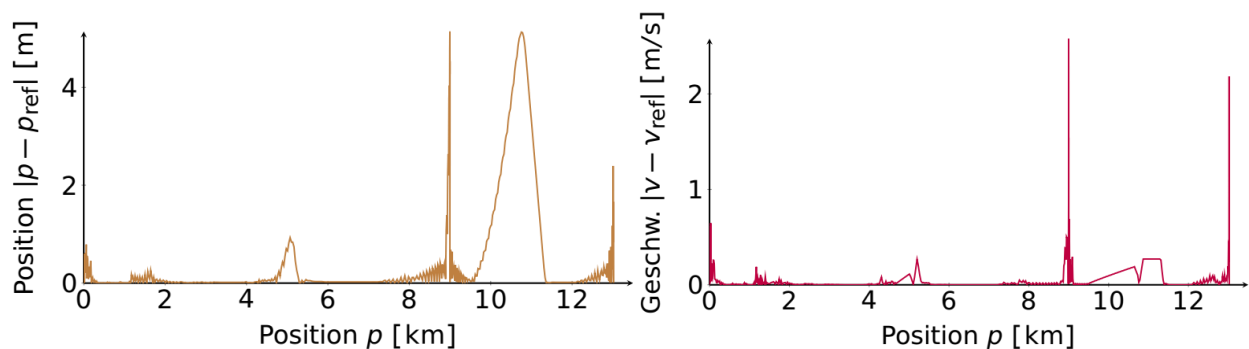


Abbildung 12: Darstellung der Differenz zwischen der Position (links in braun) und Geschwindigkeit (rechts in weinrot) des Zuges entlang des Streckenabschnitts und der Referenzposition/-geschwindigkeit, die er zum pünktlichen Erreichen der jeweiligen Endstation an den verschiedenen Streckenabschnitten benötigt. Man kann sehen, dass bei dem betrachteten Ansatz die Differenz zwischen der berechneten Referenzposition und der tatsächlichen Position fast überall weniger als einen Meter beträgt. Die Differenz zwischen Sollgeschwindigkeit und tatsächlicher Geschwindigkeit beträgt stets weniger als 2,5 Meter pro Sekunde, was für den Ansatz spricht, zumal diese hohen Abweichungen nur sehr kurz auftreten.

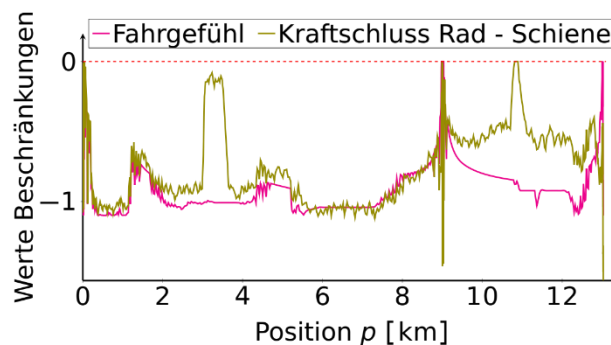


Abbildung 13: Darstellung der geltenden Beschränkungen auf der Strecke Chemnitz–Cranzahl, wobei negative Werte bedeuten, dass die Beschränkungen eingehalten wurden. Beschränkungen gelten zum einen durch die Motorleistung und zum anderen durch die Traktion. Durch die Regelung konnte für alle simulierten Schienenbedingungen Gleiten und Schleudern verhindert werden.

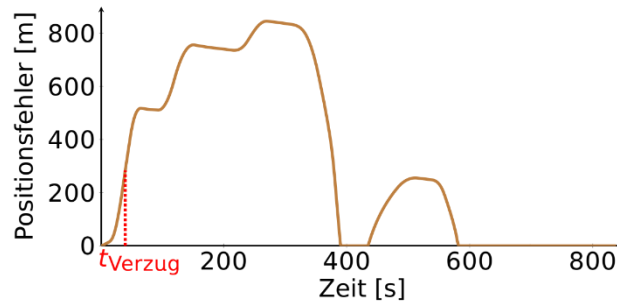


Abbildung 14: Darstellung der Abweichung zwischen Referenzposition und tatsächlicher Position bei einer Verspätung von $t_{\text{Verzug}} = 40 \text{ s}$. Nach knapp 400 s erreicht der Zug den ersten Bahnhof. Unter Verwendung der modellprädiktiven Antriebsregelung konnte hier die Verspätung auf 19 s reduziert werden. Der zweite Bahnhof wird nach etwa 580 s planmäßig erreicht. Unter Verwendung der entwickelten Regelung kann der Zug Verspätungen durch eine Fahrt an der maximalen Kraftschlussgrenze aufholen, ohne dabei die gegebenen Beschränkungen durch die Traktion und das Fahrgefühl der Gäste zu überschreiten.

Der zweite Teil des Arbeitspaketes umfasste die Online-Adaption an veränderliche Bedingungen des Zuges. Als veränderliche Bedingungen wurden eine veränderliche Masse des Zuges durch Zuladung mit Personen sowie Wettereinflüsse betrachtet.

Eine veränderliche Zugmasse wurde bereits in der Publikation betrachtet, indem eine robuste Referenztrajektorie generiert wurde, also eine Referenz, der man mit jeder zulässigen Zuladung folgen kann. D. h., dass – sofern die maximale Zuladung eingehalten wird – mit dem Ansatz stets eine zulässige Fahrhebelstellung gefunden wird, sodass Gleiten und Schleudern verhindert und der Fahrplan eingehalten werden kann. Ebenso wurden Wettereinflüsse durch unterschiedliche Traktionswerte in der zu Grund liegenden Karte berücksichtigt (Abbildung 15): Für gute Wetterbedingungen sind die Traktionswerte entlang der Strecke hoch, sodass auf Grund des proportionalen Zusammenhangs der Werte mit der Beschleunigung des Zuges stärker beschleunigt werden darf. Für schlechte Wetterbedingungen oder schlechte Streckenbedingungen werden niedrigere Traktionswerte in der Karte vermerkt, wodurch die erlaubte Beschleunigung an den verschiedenen Stellen niedriger ist. Dass der Algorithmus auch wechselnde Wetterbedingungen berücksichtigen kann, wurde ebenfalls in der Publikation gezeigt. Damit wurde das Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen.

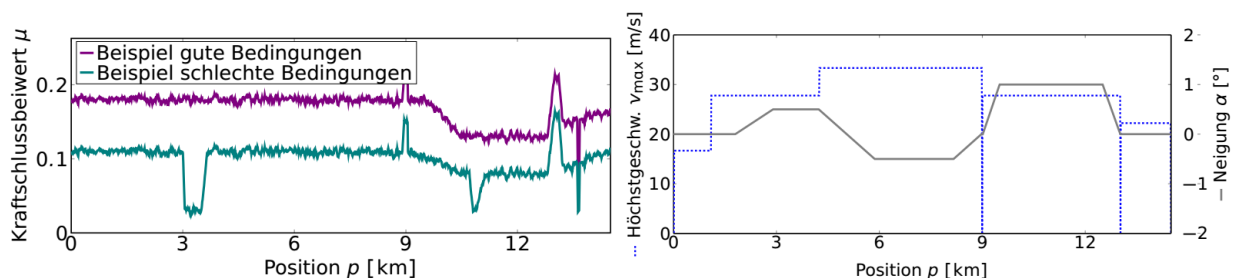


Abbildung 15: Darstellung der Karte. Kraftschlussbeiwerte entlang der Strecke werden für verschiedene Wetterbedingungen gespeichert und können während der Fahrt aktualisiert werden. Ebenso werden Höchstgeschwindigkeiten und Neigungen gespeichert.

AP 6: Implementierung der Regelung

Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Implementierung des Reglers im Zug. Da es zu Verzögerungen beim Umbau des Zuges kam, stand er zum Projektende noch nicht zur Verfügung, weshalb dieses und die weiteren Arbeitspakete nicht wie geplant bearbeitet werden konnten. Die Regelung wurde daher stattdessen in MATLAB implementiert und an einem Simulationsmodell getestet.

Um die Kommunikation zwischen MATLAB und einem realen System nachzustellen, wurde ein in der Professur vorhandenes Sensorfahrzeug genutzt, mit dem über ROS (robot operating system) kommuniziert wurde. So wurde untersucht, wie mittels ROS Sensorwerte eines realen Systems ausgelesen und somit in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink empfangen werden können sowie anschließend zur Verfügung stehen, um den erforderlichen Eingang (also eine Fahrhebelstellung) zu berechnen. Außerdem wurde getestet, wie die berechneten Stellsignale an das Fahrzeug geschickt werden können, sodass basierend auf dem Wert des Signals die Räder angesteuert werden und das Fahrzeug antreiben. Diese Versuche waren erfolgreich, jedoch kann nicht gesagt werden, wie viel Zeit es zusätzlich in Anspruch nimmt, die Regelung auf den Zug anzuwenden, sobald dieser bereitsteht.

AP 7: Integration im Zug und AP 8: Validierung und Durchführung von Experimenten

Durch das Fehlen des Forschungszuges konnten auch die Arbeitspakete 7 und 8 nicht wie geplant durchgeführt werden. Stattdessen wurde mehr Zeit in die Bearbeitung anderer Arbeitspakete gesteckt. Ein Grund dafür liegt in dem Mangel an verwertbaren Daten zur Modellierung. Dadurch entstand ein signifikanter Mehraufwand, da beispielsweise Vorbereitungen verschiedener Versuche durchgeführt wurden. Diese wurden zu den jeweiligen Zeitpunkten geplant, um nach Fertigstellung des Zuges die erforderlichen Parameter identifizieren zu können. Da sich die Fertigstellung und damit die Bereitstellung des Forschungszuges für Messfahrten immer wieder verzögerte, musste auch die Literaturrecherche ausgedehnt werden, um die erforderlichen Parameter zu erhalten. Da diese Parameter jedoch unsicher sind, stellte dies einen weiteren Mehraufwand während des Projektes dar, da verschiedene Ansätze für die möglichen Parameter betrachtet werden mussten. Der damit verbundene Mehraufwand sorgte dazu, dass die veranschlagten Personenmonate insbesondere bei frühen Arbeitspaketen nicht ausreichten.

Trotz des Mehraufwandes konnte eine simulative Validierung der erarbeiteten Inhalte durchgeführt werden, sodass die geplanten Inhalte der beiden letzten Arbeitspakete in abgewandelter Form umgesetzt werden konnten.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur Regelungstechnik und Systemdynamik durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betrugen insgesamt 472.650,55 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 94.530,11 €). Sie liegen damit 136.967,24 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter (310.873,84 €) und die Vergabe von Aufträgen (155.251,08 €) verwendet.

Wesentliche Abweichungen gegenüber den ursprünglich geplanten Ausgaben gab es bei den Pos. 0834 (Mieten und Rechnerkosten) und 0835 (Vergabe von Aufträgen): Aufgrund der Verzögerungen beim Umbau des Forschungszuges stand der Triebwagen nicht wie geplant für Tests zur Verfügung, so dass die Testfahrten zur Validierung der entwickelten Reglerlösung nicht im geplanten Umfang stattfinden konnten. Ein regulärer Triebwagen konnte für den Test eines Reglers aus technischen Gründen auch nicht genutzt werden. Zudem waren beim Umbau des Forschungszuges technische Modifikationen erforderlich, welche zum Zeitpunkt der Beantragung des Projektes nicht absehbar waren. Die daraus resultierende Änderung in der Architektur des Forschungszuges erforderte andere Schnittstellen, damit der Regler im Zug implementiert und getestet werden kann, und ein anderes Vorgehen zum Einsatz des Zuges auf der Eisenbahninfrastruktur des Bundes. Daher wurden stattdessen ein externer Dienstleister beauftragt – zum einen

mit der Entwicklung der entsprechenden technischen Schnittstelle, zum anderen mit der Beschreibung des Vorgehens (u. a. Rahmenbedingungen) und deren Qualifikation (Gutachten), um den Zug auf bundeseigener Eisenbahninfrastruktur (ohne Fahrgäste) einsetzen zu können.

In der Position 0834 wurden daher nur 3.350,89 € statt der ursprünglich geplanten 166.000 € verausgabt, in der Position 0835 waren es 155.251,08 € statt der geplanten 122.608,73 €.

Wegen der COVID-19 Pandemie und der damit eingeschränkten Mobilität konnten keine Dienstreisen in den ersten Monaten der Projektlaufzeit unternommen werden, weshalb ein großer Teil der dafür eingeplanten Mittel (Pos. 0846: Verausgabung i. H. v. 1.073,95 € statt der geplanten 5.000 €) ungenutzt blieb. Durch die sich ergebenden digitalen Möglichkeiten zum Austausch konnten hier generell Mittel eingespart werden. Dennoch wurden mehrere Konferenzen besucht, bei denen auch Projektergebnisse vorgestellt wurden, so zum einen die Digital Rail Convention 2021 und 2023 (Annaberg-Buchholz) sowie die European Control Conference 2023 (Bukarest).

Ein Teil dieser Mittel wurde zusammen mit einem Teil der Mittel aus der Pos. 0812 in die ursprünglich nicht geplante Position 0850 umgewidmet, um notwendige IT-Technik für Mess- und Validierungsfahrten des Projekts anzuschaffen. Für die Durchführung und Auswertung der Experimentierfahrten (Auslesung Messdaten, Protokollierung Testszenarien) wurden Laptops mit hoher Rechenleistung und über dem Standard liegender Akkukapazität sowie unabhängiger Stromversorgung während der Testfahrten angeschafft. Die angeschaffte Technik soll auch in den Folgeprojekten ELFE und 5D.Rail eingesetzt werden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen. Sie entsprechen im Wesentlichen der im Projektantrag dargelegten Planung und den im Arbeitsplan formulierten Aufgaben. Die durch die TU Chemnitz durchgeführten Arbeiten hätten ohne die bereitgestellte Förderung nicht durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse und die bei der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse bieten der TU Chemnitz aufgrund ihrer Relevanz einen unmittelbaren Mehrwert. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewendet werden.

Von Seiten der Eisenbahnverkehrsunternehmen ist bekannt, dass der Kraftstoffverbrauch und der Verschleiß unter gleichen Bedingungen zwischen Triebfahrzeugen deutlich variieren können. Dies führt zu höheren Umweltbelastungen und Kosten gegenüber einem gleichmäßig geringen Verbrauch bzw. Verschleiß. Daher bietet eine energieeffiziente, verschleißärmere und gegenüber veränderten Betriebsbedingungen, wie z. B. Wetter oder hohen Fahrgastzahlen, unempfindliche (robuste) Antriebsregelung eine Möglichkeit, um die Kosten und die Umweltbelastung zu senken, welche in Zeiten des Klimawandels ein besonders wichtiges Unterfangen darstellt.

Da ein großer Teil der Gesamtleistung des Dieselmotors in Antriebsleistung umgewandelt wird, besteht hier ein großer Optimierungsbedarf. Eine optimale und robuste Antriebsregelung kann aber nicht nur Leistungsverluste reduzieren, sondern insbesondere Gleiten und Schleudern verhindern, sofern Traktionsbedingungen bekannt sind. Dadurch wird der Verschleiß in Form von Schienenschäden verringert, der durch Gleiten und Schleudern entsteht.

Praxisberichte zeigen, dass es einerseits selbst mit modernen Drehstromlokomotiven teilweise nicht möglich ist, die Fahrzeiten einzuhalten und stets rechtzeitig zum Stillstand zu kommen, andererseits kommt es durch die Kraftschlusshochausnutzung zu Schienenschäden. Daher bestand das Ziel darin, eine Steuer-/Regelungstechnik zu entwickeln, die auf der Zugebene über dem Schleuder- bzw. Gleitschutz ansetzt. Das hat den Vorteil, dass Gleit- und Schleuderschutz gar

nicht erst zum Ansprechen gezwungen werden, indem das Fahrzeug effizient und vorausschauend gesteuert wird. Dadurch werden Traktionsverluste verhindert, die Räder und Schienen schädigen und die Energieeffizienz (Laufwerkwirkungsgrad) verringern.

Eine Regelung stellt auch einen ersten Schritt zum automatisierten Fahren von Zügen dar. Durch automatisiertes Fahren kann man dem Fachkräftemangel entgegen, da weniger Triebfahrzeugführer gebraucht werden, was auch die Kosten der Betreiber reduziert. Ebenso kann die Kundenzufriedenheit gesteigert werden, da durch eine Automatisierung ein effizientes Fahren und somit eine Kompensation von Verspätungen erfolgen kann. Nicht zuletzt beschränken die vorhandenen Triebfahrzeugführer die Frequenz der Bahnfahrten. Ohne sie können Züge häufiger fahren, was die Mobilität erhöht und somit mehr Menschen von der Straße auf die Schiene bringt. Ebenso kann die Sicherheit gesteigert werden, da durch die Müdigkeit oder andere Ablenkungen der Triebfahrzeugführer Unfälle möglich sind.

All diese Faktoren stärken das Forschungsvorhaben, nicht zuletzt da der technische und wissenschaftliche Stand der Technik hinsichtlich Gleit- und Schleuderschutzes bei Schienenfahrzeugen zeigt, dass auf diesem Gebiet Verbesserungspotenzial und somit Forschungsbedarf besteht.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Nach drei Jahren Projektlaufzeit liegt nun ein Konzept vor, welches einen ersten Schritt zum automatisierten Fahren von Zügen liefert. Zum einen existieren theoretische Ergebnisse in Form einer modellprädiktiven Regelung, welche es ermöglicht, Gleiten und Schleudern zu verhindern, sowie Energieverluste und damit auch damit verbundene Kosten für Ersatzteile und Wartung reduziert. Zum anderen existiert ein Schnittstellenkonzept, welches eine Kommunikation mit dem Zug ermöglicht und somit die Schnittstelle zwischen Theorie und Praxis liefert. Des Weiteren existieren diverse Ansätze zur Parameteridentifikation und Validierung, welche nach Fertigstellung des Forschungszuges Anwendung finden können.

Diese Kombination aus theoretischen Ergebnissen und deren Anwendung in der Praxis bereichert auch Lehrveranstaltungen. So wurden bereits einige Projektinhalte in Vorlesungen und Übungen der Professur Regelungstechnik und Systemdynamik verwendet. Damit wurden den Studierenden Aufgaben des SRCCs präsentiert, woraus Abschlussarbeiten und Anstellungen folgen können. Außerdem bietet sich der Forschungszug des SRCCs auch als Zielort für Exkursionen und Praktika an. Damit verbessert sich langfristig die Qualität des Studiums an der TU Chemnitz.

Da die Projektergebnisse auch außerhalb der TU Chemnitz präsentiert wurden, setzt der Projekterfolg ein über die Region hinaus sichtbares Zeichen für Innovation im Erzgebirge und sorgt damit dafür, dass die Region auch für junge Menschen interessant wird. Konkret wurden die Ergebnisse sowohl international (European Control Conference 2023 in Bukarest) als auch national bzw. lokal (Eröffnung des nördlichen Kopfbau in Annaberg-Buchholz 2023; Fakultätsverknüpfungstag der TU Chemnitz 2023) vorgestellt. Durch diese Strahlkraft können auch Hersteller und Betreiber aus dem Bereich der Schienenfahrzeuge überzeugt werden und Kooperationen starten. Einen weiteren Beitrag dazu sollen auch Nachfolgeprojekte leisten. So sind bereits die Projekte ELFE und 5D.Rail bewilligt, in denen zum einen die exakte Lokalisierung und Bremsregelung eine Rolle spielt, zum anderen der Aufbau einer Karte, welche aktuell noch als gegeben betrachtet wird, aber einen wichtigen Beitrag zur Verhinderung des Gleitens und Schleuderns liefert.

5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die erzielten Ergebnisse der energieeffizienten Antriebsregelung wurden in einer Publikation veröffentlicht. Sie wurde bei einer bedeutenden Konferenz, der European Control Conference, im Juli 2023 in Bukarest vorgestellt. Die Vorstellung sorgte dafür, dass das Vorhaben einem breiten Fachpublikum präsentiert wurde, was zur Sichtbarkeit des Projektes und der Region beigetragen hat. Inhalt der Veröffentlichung war zum einen die Herleitung eines Modells, das die Dynamik des Zuges beschreibt. Basierend darauf wurde eine modellprädiktive Regelung entworfen, welche eine optimale Fahrhebelstellung unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen, wie etwa Fahrkomfort und Verhindern von Gleiten und Schleudern, ermittelt. Dabei wurde ein zu Grunde liegendes Optimalsteuerungsproblem formuliert, dessen Lösung eine Referenztrajektorie liefert, also einen zeitlichen Verlauf, welcher vorgibt, zu welchen Zeitpunkten sich der Zug an welchen Punkten der Strecke befinden soll und mit welcher Geschwindigkeit. Diese Berechnung ist zeitaufwändig, wird aber nur einmal vor der Fahrt durchgeführt. Während der Fahrt ist die modellprädiktive Regelung aktiv, welche die optimale Fahrhebelstellung ermittelt, um dieser Trajektorie zu folgen. Dabei werden alle Nebenbedingungen berücksichtigt. Außerdem kann der Zug auch auf andere Bedingungen reagieren, wie etwa belegte Gleise, wechselndes Wetter und eine veränderliche Auslastung. Das Ergebnis zeigte, dass all diese Nebenbedingungen eingehalten werden und es somit nicht zu Gleiten und Schleudern kommen kann. Außerdem wurde gezeigt, dass Verspätungen kompensiert werden können.

Weitere Veröffentlichungen sind in anderen Projekten geplant, welche auf den Erkenntnissen des aktuellen Projektes aufbauen.