

Hochdynamische Regelung eines Prüfstands für  
Stromabnehmer von Hochgeschwindigkeitszügen

# Kontakt- sport

bei 300 km/h

Elektrische Schienenfahrzeuge dürfen selbst bei hoher Geschwindigkeit nicht den Kontakt zur Stromversorgung verlieren. Die komplexe Interaktion mit der Oberleitung stellt in der Entwicklung und Kalibrierung von Stromabnehmern allerdings eine große Herausforderung dar. Die TU Wien und Siemens arbeiten daher an einem neuartigen Prüfstand, der einen Teil der üblichen Testfahrten ins Labor holt – mit dabei: Werkzeuge von dSPACE.



Der Schienenverkehr dringt heute in immer neue Geschwindigkeitsbereiche vor. So sind 300 km/h für moderne Triebzüge längst keine Herausforderung mehr – für ihre zuverlässige Stromversorgung hingegen schon. Vor allem die dynamische Interaktion zwischen den Stromabnehmern, sogenannten

Pantographen, und der Oberleitung ist hier von zentraler Bedeutung: Dieses elastische, gekoppelte System wird besonders bei hohen Geschwindigkeiten zu Schwingungen angeregt. Zu geringe Kontaktkräfte führen in der Folge unweigerlich zum Kontaktverlust und damit zu Lichtbögen und starker Abnutzung der

Schleifleisten. Zu große Kontaktkräfte wiederum verursachen einen erhöhten mechanischen Verschleiß und starke dynamische Belastungen in der Oberleitung und den Stromabnehmern. Darüber hinaus stellen unterschiedliche Bahnstromsysteme, OberleitungsbaufORMen und nationale Vorschriften zusätzliche Herausforderungen dar, insbesondere bei grenzüberschreitendem Bahnverkehr. Moderne Hochleistungsstromabnehmer bieten daher zunehmend die Möglichkeit einer aktiven Regelung, um die Kontaktkraft auch noch bei hohen Geschwindigkeiten optimal anpassen zu können. Komplexe dynamische Simulationen konnten diese Entwicklungen und das mechatronische Design bislang zwar unterstützen, aber aufwendige und kostspielige Testfahrten nicht ersetzen. In der Entwicklung solcher Regelungen setzt der Pantographen-Hersteller Siemens daher möglichst früh auf dynamische Hardware-in-the-Loop-Tests realer Stromabnehmer im Labor. Bei diesen Tests, in denen der Pantograph als Prüfling in Interaktion mit einer virtuellen Oberleitung tritt, können realistische Testaussagen mit Vorteilen der Laborentwicklung, zum Beispiel Reproduzierbarkeit, kombiniert werden. Speziell im Fall der Oberleitungsdynamik sind die Beschreibung des Verhaltens und die Realisierung einer korrekten Kopplung zum Prüfling allerdings äußerst anspruchsvoll. Gelingt dies jedoch in hoher Qualität, so können derartige Prüfstände rasche, aussagekräftige Tests im Sinne virtueller Testfahrten durchführen und ein tieferes Verständnis der gekoppelten Interaktionsdynamik von Stromabnehmern und Oberleitung im Einsatz liefern. So helfen sie, die aufwendigen und teuren Streckentests für Neufahrzeuge in der Erprobungsphase zu reduzieren.

### Hohe Dynamik auch auf dem Prüfstand

Das Institut für Mechanik und Mechatronik der Technischen Universität

>>

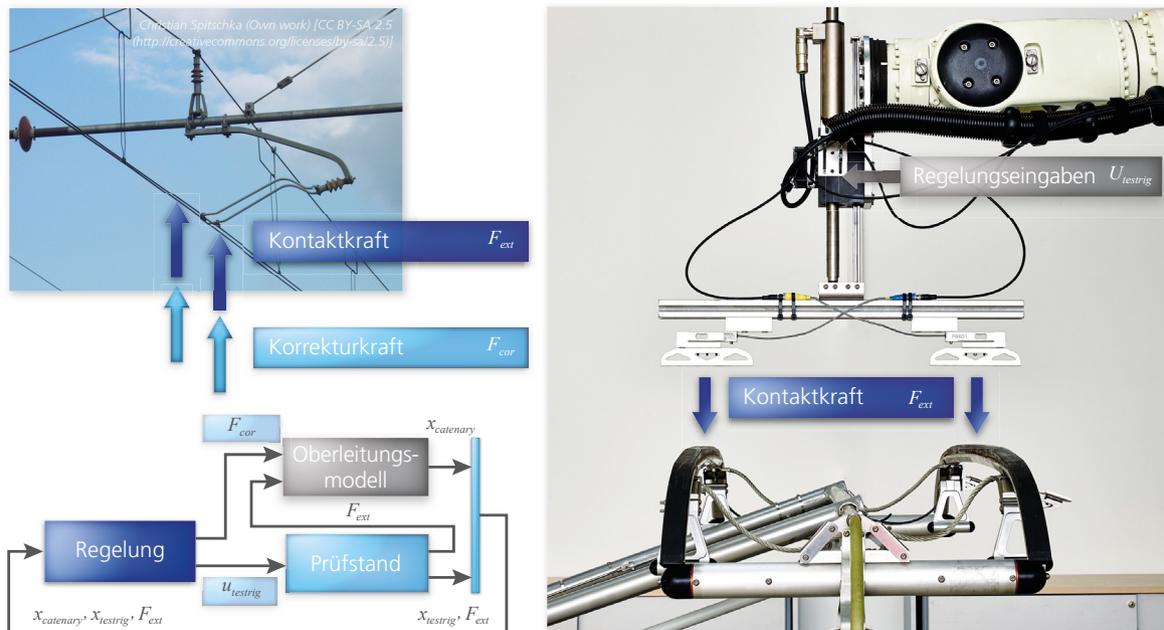


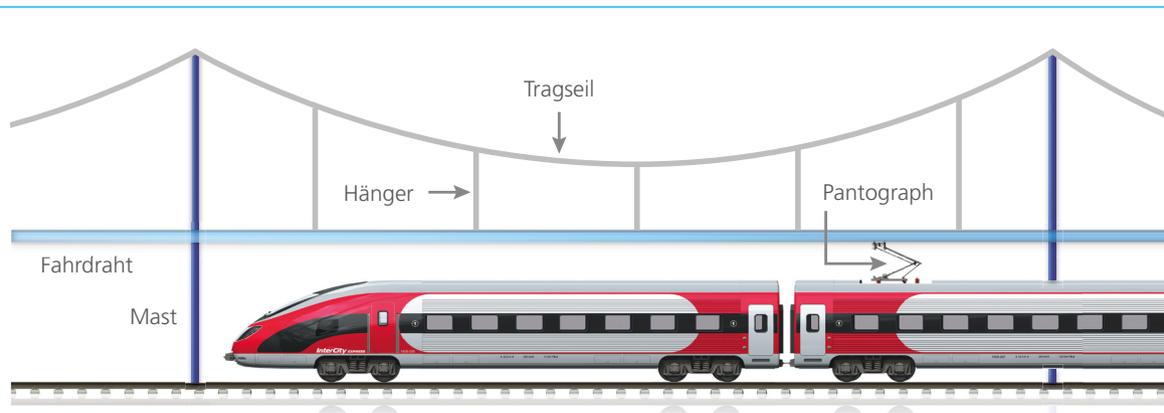
Abbildung 1: Auf dem Siemens-Pantographenprüfstand können mittels von der TU Wien entwickelter Methoden realistische Hochgeschwindigkeitszugfahrten emuliert werden.

(TU) Wien hat deshalb gemeinsam mit Siemens einen hochdynamischen Stromabnehmerprüfstand weiterentwickelt, in dem das komplexe Verhalten mit einer virtuellen Oberleitung in Echtzeit emuliert wird. Echte Pantographen können so in virtuellen Testfahrten realistisch und reproduzierbar getestet werden. Dabei übernimmt ein Industrieroboter in Kombination

mit einem Linearmotor die Rolle der Oberleitung. Mittels einer kombinierten Regelung stellen diese beiden Aktuatoren das Oberleitungsverhalten im aktuellen Kontaktpunkt des Pantographen akkurat nach, wobei gleichzeitig die resultierende Kontaktkraft gemessen wird (Abbildung 1). Der Stromabnehmer als Prüfling erfährt dabei dieselben Belastungen,

die dynamisch im Kontakt mit einer realen Oberleitung entstehen würden. Um dies realistisch zu gewährleisten, muss zunächst ein extrem effizientes mathematisches Modell der Oberleitungsdynamik entwickelt werden, das neben Nachgiebigkeiten auch Wellenausbreitungsphänomene berücksichtigt und letztendlich in Echtzeit berechenbar sein muss. Die wesentlichen

Abbildung 2: Sämtliche Komponenten einer realen Oberleitung, die hier vereinfacht dargestellt wird, mussten in der Modellierung der virtuellen Oberleitung berücksichtigt werden.





Quelle: © Technische Universität Wien

Abbildung 3: Im Prüfstandsystem von Siemens, das den Test von realen Pantographen ermöglicht, setzt die TU Wien auf ein DS1006 Processor Board mit zahlreichen I/O-Erweiterungen.

Komponenten der realen Oberleitung sind Fahrdrabt und Tragseil, verbunden durch sogenannte Hänger (Abbildung 2). Zur Formulierung eines mathematischen Modells ihres dynamischen Verhaltens werden zunächst die Bewegungsgleichungen (hier sogenannte partielle Differentialgleichungen) betrachtet. Sie werden hier speziell in mitbewegten Koordinaten formuliert, sodass nur die Oberleitungsbewegung in der Nähe des Stromabnehmer-Kontaktpunktes betrachtet werden muss. Diese Gleichungen können nun mithilfe geeigneter Näherungsverfahren (Finite Differenzen, Finite Elemente) gelöst werden. Speziell optimierte Randbedingungen sorgen dafür, dass angeregte

Wellen aus dem betrachteten Abschnitt hinauslaufen können. Dadurch ist es möglich, nur ein kurzes Oberleitungsstück tatsächlich berechnen zu müssen, aber dennoch die komplexe Oberleitungsdynamik komplett und realitätsgetreu in einem echtzeitfähigen Modell abzubilden. Natürlich müssen dabei die relativen Positionen der Hänger korrekt berücksichtigt werden. In Summe ergibt sich somit eine zeitvariante Systemstruktur, die eine umfangreiche und automatisierte Vorverarbeitung der Modelldaten erfordert.

#### Kopplung von virtueller und realer Welt

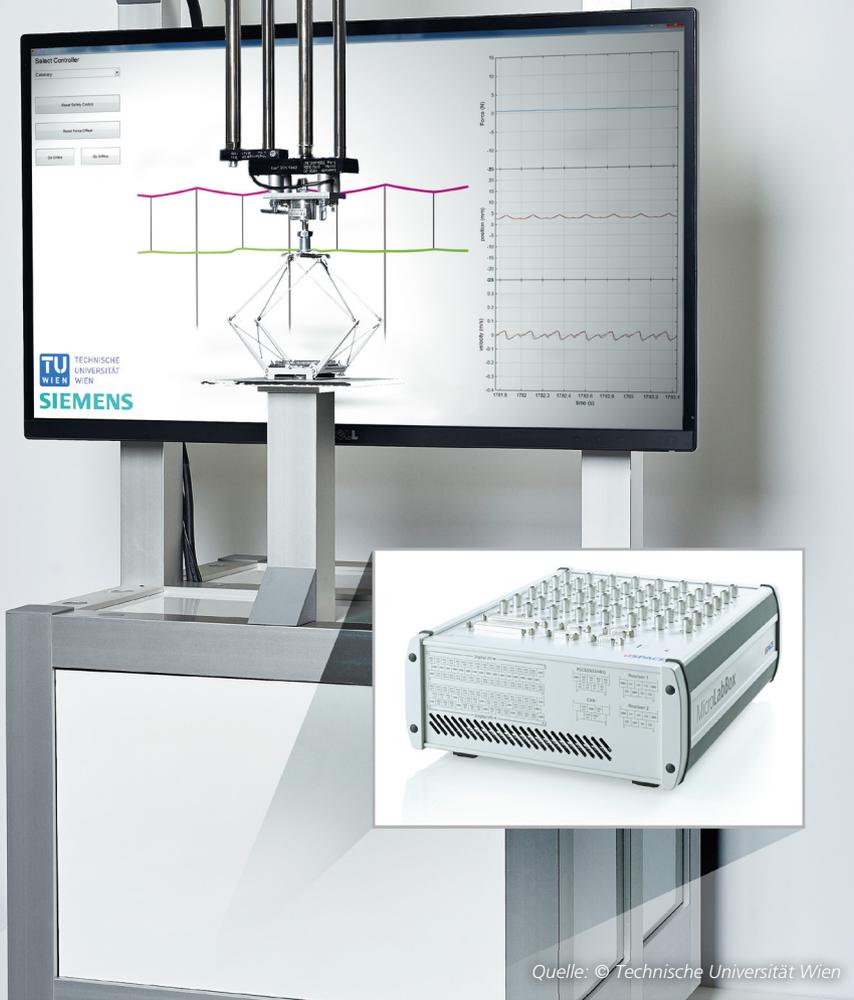
Die Regelung des Prüfstands muss

nun die virtuelle Oberleitung – physikalisch korrekt – mit dem realen Prüfling koppeln. Dabei wird ein modellbasierter prädiktiver Regler verwendet, der mithilfe genauer Modelle der Oberleitungsdynamik und der Prüfstandsaktuatorik deren jeweiliges Verhalten vorhersieht und schon vorab die richtigen Regelentscheidungen fällt, um die Oberleitung bestmöglich am Prüfstand zu emulieren. Außerdem können durch dieses Regelsystem physikalische Beschränkungen (beispielsweise der maximal zulässige Motorstrom oder Positionsbegrenzungen) verlässlich im Regler eingehalten werden. Dazu werden in jedem Rechenintervall komplexe mathematische Optimie-

>>

„Die dSPACE Werkzeuge decken nicht nur zuverlässig unseren hohen Bedarf an Rechenleistung, sondern verschaffen uns auch die größtmögliche Flexibilität beim Einsatz für unterschiedlichste Teilaufgaben.“

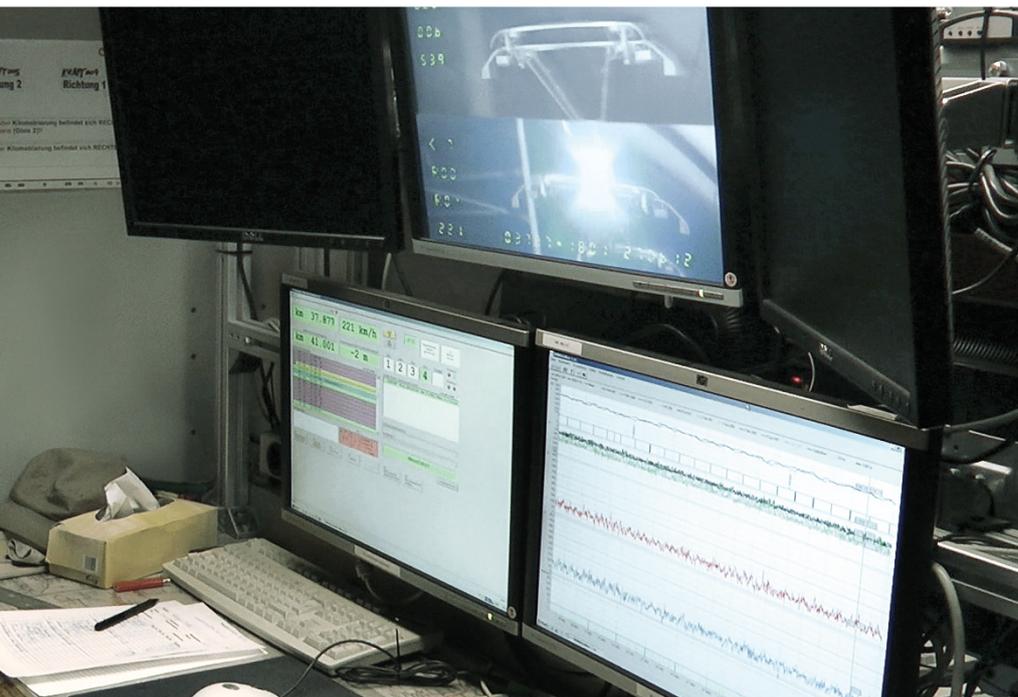
Professor Stefan Jakubek, Technische Universität Wien



Quelle: © Technische Universität Wien

Abbildung 4: Auf Basis einer MicroLabBox wurde ein verkleinertes Demonstratormodell des Pantographen-Prüfstands konstruiert. Die einfache Portierung der entwickelten Regelungskonzepte vom Prüfstandssystem auf den Demonstrator ermöglicht den anschaulichen Einsatz in der universitären Lehre.

Abbildung 5: Im Zuge von Streckentests kann die Wirksamkeit der neuentwickelten Pantographen zur erfolgreichen Unterbindung von Lichtbögen an den Stromabnehmern demonstriert werden.



rungsprobleme gelöst. Um speziell auch in schwierigen, hochdynamischen Testfällen, in denen der Prüfstand der virtuellen Oberleitung etwa nicht immer schnell genug folgen kann, physikalisch korrekte Ergebnisse zu liefern, wurden auch neuartige Erweiterungen bisher üblicher Hardware-in-the-Loop-Regelkonzepte erforscht und realisiert. Durch eine gesonderte Formulierung werden die physikalischen Erhaltungsgrößen Impuls und Energie direkt als Regelgröße behandelt. Damit wird sichergestellt, dass die virtuelle Oberleitung und der reale Pantograph diese Erhaltungsgrößen stets konsistent austauschen – die Testergebnisse werden so noch aussagekräftiger. Das Nachstellen der komplexen Interaktion von virtueller Oberleitung mit realem Pantographen stellt zum einen hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Modells, zum anderen muss jedoch die Modellkomplexität ausreichend niedrig gehalten werden, um es weiterhin in Echtzeit berechnen zu können. Darüber hinaus muss das Echtzeitsystem auch noch die Aufbereitung der Messsignale durch Zustandsbeobachter oder die Schätzung von Störkräften und Reibung übernehmen. Um alle diese Aufgaben optimal in Echtzeit zu lösen, waren für die TU Wien nicht nur neu entwickelte numerische Methoden notwendig, sondern auch eine extrem leistungsfähige Echtzeitplattform.

**Flexible dSPACE Werkzeugkette**

Dabei fiel die Wahl auf Echtzeitwerkzeuge von dSPACE. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde das Prüfstandskonzept letztendlich auf zwei verschiedenen dSPACE Plattformen entwickelt. Das Rückgrat des Prüfstandssystems, auf dem Pantographen in Originalgröße getestet werden können, bildet ein DS1006 Processor Board (Abbildung 3). Dessen mit 2,8 GHz getakteter Quad-Core-Prozessor ermöglicht kom-

plexe Systemsimulationen und Regelungen mit hohen Abtastfrequenzen, da die anfallende Rechenlast effizient verteilt werden kann. Ein Rechenkern übernimmt etwa die grundlegende Prüfstands-anbindung und -regelung (5 kHz Abtastfrequenz), ein weiterer die prädiktive Impedanzregelung (200 Hz). Auf einem weiteren Kern wird schließlich ein präzises Oberleitungsmodell simuliert (200 Hz), aus dessen Zuständen der Prüfstandsregler in jedem Abtastschritt initialisiert wird. Für die maßgeschneiderte Kommunikation mit den Prüfstandskomponenten kommen ein DS4302 CAN Interface Board (Linearmotor), ein DS3002 Incremental Encoder Interface Board (Positionssensor), ein DS2201 Multi-I/O Board (Regler-Stellgrößen) und ein DS4121 ECU Interface Board (Industrieroboter) zum Einsatz. Die entwickelten Algorithmen wurden zu großen Teilen in MATLAB®/Simulink® implementiert und direkt von dort kompiliert. Die einfache Einbindung von externen Bibliotheken zur effizienten Lösung anspruchsvoller mathematischer Probleme wurde dabei ebenfalls ausgenutzt. Eine mit der Experimentiersoftware dSPACE ControlDesk® entworfene Benutzeroberfläche ermöglicht dem Anwender zudem eine intuitive Kontrolle der virtuellen Testfahrten am Prüfstand. Zusätzlich zum Prüfstandssystem wurde für die Entwicklung sowie den Lehrbetrieb ein verkleinerter Laborversuch der Pantographen-Oberleitungs-Interaktion realisiert (Abbildung 4), an dem sich die Grundlagen der Impedanzregelung anschaulich demonstrieren und tatsächlich begreifbar machen lassen. Dabei setzt die TU Wien erstmals die neue, kompakte dSPACE MicroLab-Box ein. Die hohe Kompatibilität und Durchgängigkeit der dSPACE Werkzeugkette ermöglicht eine reibungslose Portierung der Algorithmen vom Prüfstandssystem auf den verkleinerten Labor-Demonstrator.

### Ergebnisse und Ausblick

Mit den beschriebenen Werkzeugen lässt sich ein hochdynamischer und leistungsfähiger Pantographenprüfstand effektiv realisieren. Insbesondere ist es etwa dank der erweiterbaren Oberleitungsmodelle möglich, den Einfluss von Mehrfachtraktion, also der Fahrt mit mehreren, gleichzeitig gehobenen Pantographen, schon am Prüfstand zu untersuchen. Die Leistung von zukünftigen Pantographen-Neuentwicklungen kann so schon am Prüfstand verlässlich und frühzeitig quantifiziert werden. Der gemeinsam mit der TU Wien weiterentwickelte Stromabnehmerprüfstand von Siemens ist der weltweit erste Hardware-in-the-Loop-Prüfstand, der die Systemdynamik von partiellen Differentialgleichungen konsistent in Erhaltungsgrößen auf einem realen Prüfling abbilden kann. Die dadurch möglich gewordenen realitätsnahen, hochdynamischen Tests und deren volle Reproduzierbarkeit leisten einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung von Hochleistungsstromabnehmern und damit für die zukünftige Entwicklung eines noch effizienteren Schienenverkehrs. Die einfache Portierbarkeit auf den verkleinerten Demonstrator ermöglicht es darüber hinaus, die Regelungsmodelle auch in der universitären Lehre einzusetzen und so talentierten Ingenieur-nachwuchs für die Bahntechnik zu begeistern. Gut möglich also, dass der Schienenverkehr auch zukünftig in immer neue Geschwindigkeits- und Effizienzbereiche vorstoßen wird. ■

*Prof. Stefan Jakubek, Dr. Alexander Schirrer, Dipl.-Ing. Guilherme Aschauer, Technische Universität Wien  
M.Sc. Christian Saliger, Siemens AG Österreich*

*Im Video erleben Sie den gemeinsamen Pantographen-Prüfstand von Siemens und der TU Wien in Aktion und erfahren mehr über die hochdynamische Regelung derartiger Prüfstände von Stromabnehmern für Hochgeschwindigkeitszüge.  
[www.dspace.com/go/dMag\\_20161\\_tuwien\\_d](http://www.dspace.com/go/dMag_20161_tuwien_d)  
(© Strukt GmbH)*



#### *Prof. Stefan Jakubek*

*Stefan Jakubek ist Universitätsprofessor für Regelungstechnik an der Technischen Universität Wien.*



#### *Dr. Alexander Schirrer*

*Alexander Schirrer ist Universitätsassistent im Bereich Regelungstechnik an der Technischen Universität Wien.*



#### *Dipl.-Ing. Guilherme Aschauer*

*Guilherme Aschauer ist Projektassistent im Bereich Regelungstechnik an der Technischen Universität Wien.*



#### *Christian Saliger, M.Sc.*

*Christian Saliger ist Entwicklungsingenieur im Bereich Stromabnehmer bei der Siemens AG Österreich.*

