

# SmartPanto

## Stromabnehmer 5.0

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017  
**VIF 2017**

April 2023



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien

 **ÖBB**  
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Austro Tower  
Schnirchgasse 17  
1030 Wien

 **ASFiNAG**

### Für den Inhalt verantwortlich:

Siemens Mobility Austria GmbH  
SMO RS CP BG&P PN  
Siemensstraße 90  
1210 Wien

 **SIEMENS**

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# SmartPanto Stromabnehmer 5.0

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung

VIF 2017

**Autorinnen und Autoren:**

**Guilherme Aschauer**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Siemens Mobility Austria GmbH

## EINLEITUNG

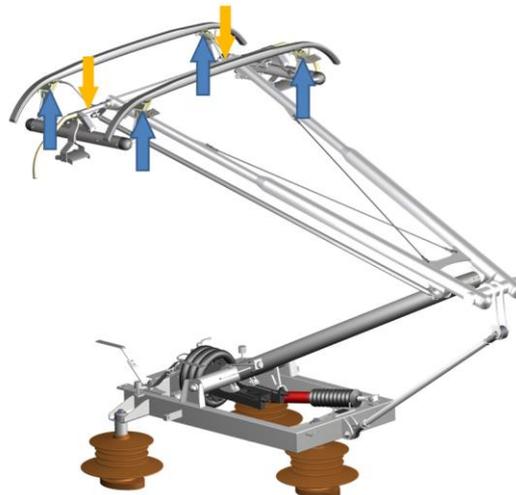
Ziel von SmartPanto war es, einen Prototyp eines direkt kraftgeregelten autonomen Stromabnehmers (Pantograph) zu realisieren, der auch unter schwierigsten Verhältnissen eine Nachführung der mittleren Kontaktkraft erlaubt.

Dafür wurde eine dezidierte faseroptische Messtechnik entwickelt und eingesetzt, die sich durch leichte Nachrüstbarkeit auszeichnet und einen Einsatz im Regelbetrieb erlaubt, da keine zusätzliche elektrische Potentialtrennung im Hochspannungsumfeld notwendig ist.

Eine direkte Kontaktkraftregelung verbessert die Kontaktkraftgüte und reduziert Verschleiß an Oberleitung und Schleifleisten. Zusätzlich sollten die Aeroakustik des Stromabnehmers untersucht und relevante Einflusskomponenten am Stromabnehmer identifiziert und Verbesserungen untersucht werden.

## SENSORIK

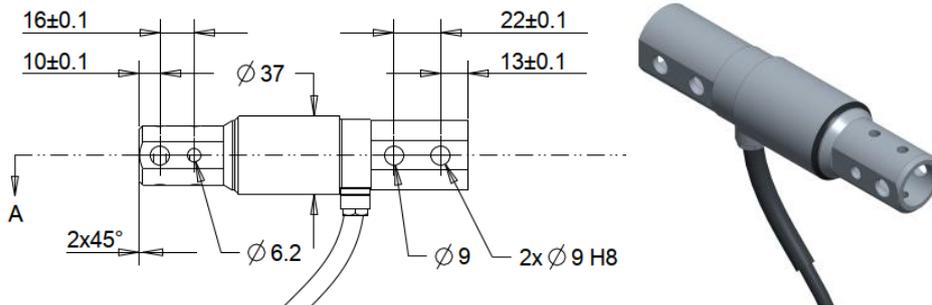
Wesentliches Ziel des Projekts ist es, mit nur zwei Kraftsensoren auszukommen. Gegenüber einer komplizierten, hochpreisigen normkonformen Messung, die aus je 4 Kraft- und Beschleunigungssensoren besteht, können so erhebliche Einsparungen bei einer Ausstattung einer schon bestehenden Flotte erzielt werden. Die prinzipielle Position der jeweiligen Messungen ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1** Position der Kraft- und Beschleunigungssensoren (je 4 Stück) für eine normkonforme Messung nach EN 50317 (in blau) und Position der neu entwickelten Sensoren (2 Stück Kraftsensoren, in gelb) um eine kostengünstige Kontaktkraftmessung zu ermöglichen.

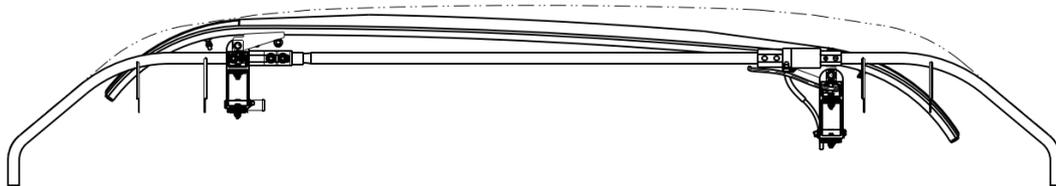
Die Sensorposition und das Design wurden so gewählt, dass eine Nachrüstung auf schon bestehende Stromabnehmer über verschiedene Typen hinweg leicht möglich ist. Dazu wurde

der Kraftsensor bzw. dessen Aufnahmen möglichst schlank gestaltet, sodass über Adapter verschiedenste Scheitelrohre und Wippenkästen zum Einsatz kommen können. Abbildung 2 zeigt den Sensor in seiner schlussendlich realisierten Ausführung.



**Abbildung 2 2D-Ableitung des Kraftsensors (links) sowie ein 3D-Rendering (rechts)**

Der Durchmesser des eigentlichen Sensorbereichs wurde dabei so groß wie nötig und so klein wie möglich gewählt, damit auch bei Wippen mit einem großen Federweg der Fahrdrabt nicht den Sensor beschädigen kann. Abbildung 3 zeigt Untersuchungen zur Einfederung an einer solchen Wippe. Dabei wurde eine maximal einseitige Einfederung angenommen und kontrolliert, ob der Sensor keinen Schaden davontragen kann.



**Abbildung 3 Einseitige Einfederuntersuchungen an einer Wippe**

Abbildung 4 zeigt einen gefertigten Kraftsensor und in Abbildung 5 ist eine Testapparatur zur genauen Untersuchung des Verhaltens der Kraftsensoren abgebildet. Abbildung 6 zeigt einen Testaufbau in einer Temperaturkammer zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Messergebnis. Abbildung 7 zeigt beispielhaft das Ergebnis eines Dauertests unter Belastung über einen Zeitraum von 24 h. Die Ungenauigkeit lag dabei deutlich unter 1 % des Messwertes.



Abbildung 4 Abbildung des Kraftsensors

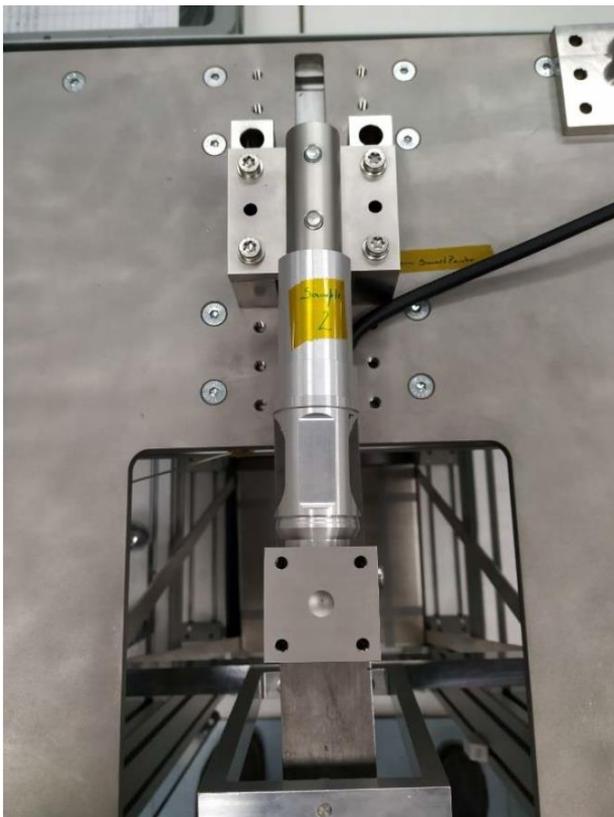


Abbildung 5 Testaufbau zur Prüfung der Kraftsensoren

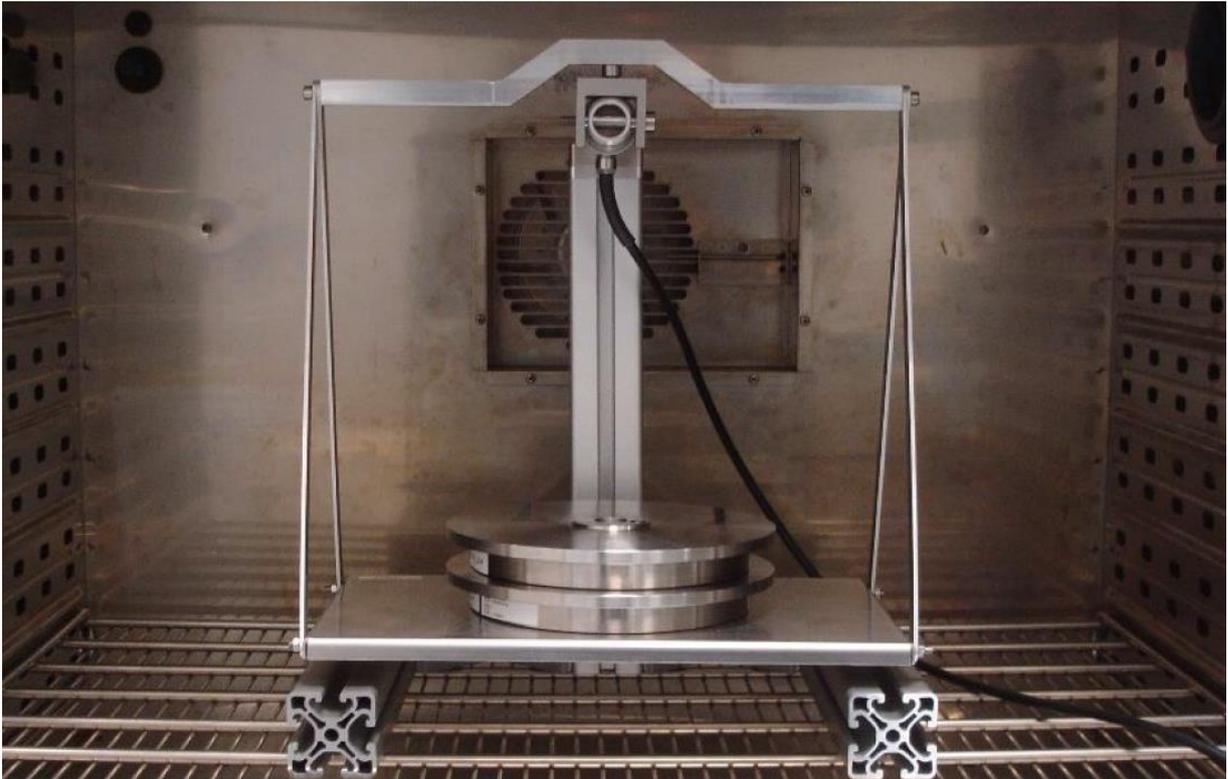


Abbildung 6 Testaufbau zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Sensorik

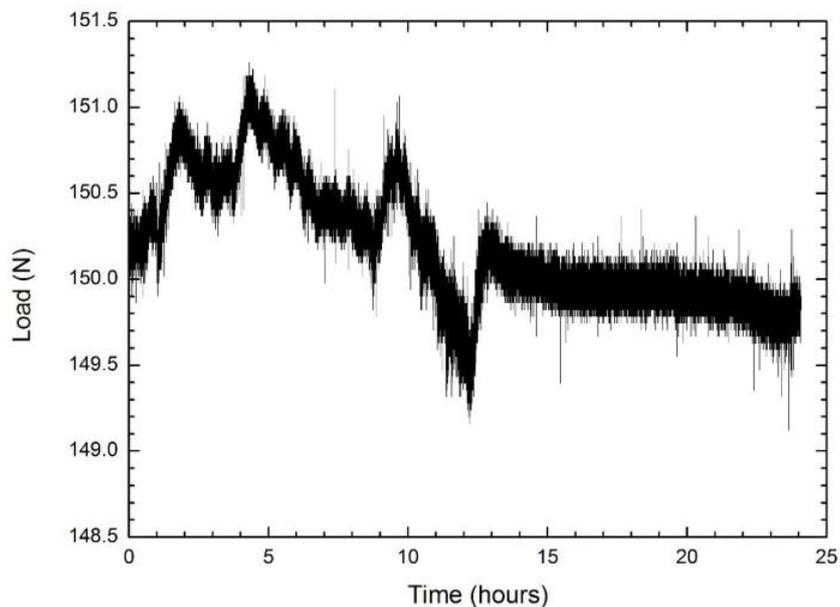


Abbildung 7 Beispielhafte Messergebnisse der Prototypenlieferung: Dauertest unter Temperatureinfluss

Um die Messwerte auf optischer Basis, die über elektrisch isolierende, faseroptische Leitungen ins Fahrzeuginnere übertragen werden, in gebräuchliche Stromsignale umwandeln zu können, wurde eigens für dieses Projekt ein sogenannter optischer Interrogator entwickelt, der genau diese Aufgabe übernimmt. Dieser stellt gleichzeitig die Laserlichtquelle und interpretiert

weitere die Verschiebung des Wellenlängenbereichs des von der im Kraftsensor eingelassenen Faser reflektierten Lichts. Abbildung 8 zeigt ein Rendering sowie ein Bild eines realisierten Prototyps des SmartPanto-Interrogators.



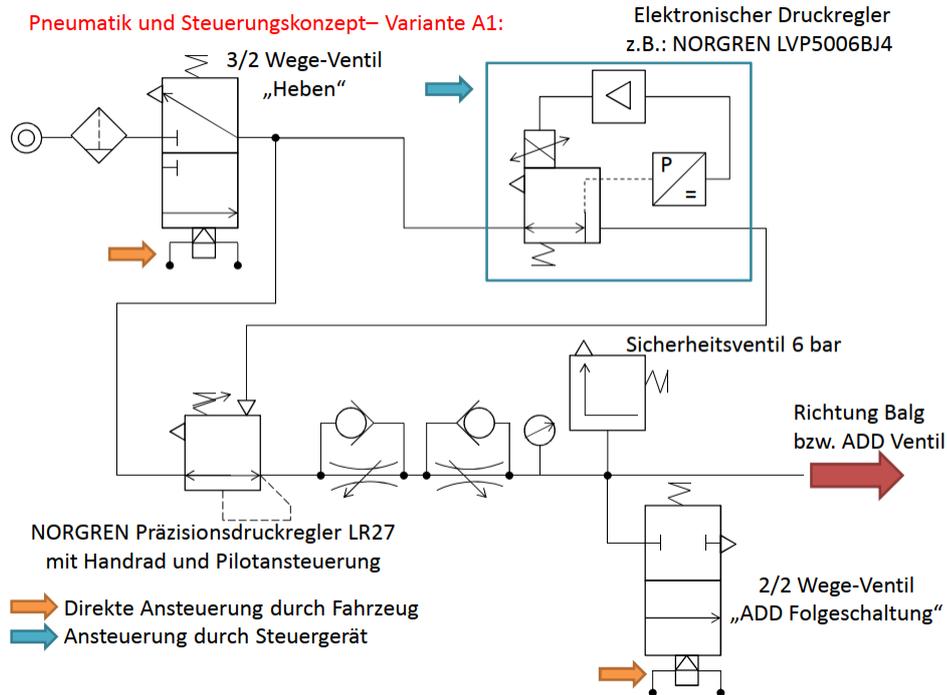
**Abbildung 8 Faser-Optischer Interrogator für das SmartPanto-Projekt**

## AKTORIK

Zur geforderten Realisierung einer automatischen, pneumatischen Rückfallebene, die verhindert, dass durch Ausfall eines Steuergerätes bzw. eines Softwarefehlers der Stromabnehmer seine Grundfunktionalität (Kontakt zur Oberleitung herstellen) nicht erfüllen kann, wurde das in Abbildung 9 dargestellte pneumatische Ansteuerkonzept entwickelt.

Dabei wird der Versorgungsdruck wie gehabt zuerst über einen Filter und Kondensatabscheider zu einem 3/2-Wege-Ventil („Hebeventil“) geführt. Nach diesem Hebeventil wird jetzt allerdings eine Abzweigung verbaut. Zweig A (in Abbildung 9 die untere Abzweigung) führt in einen Präzisionsdruckregler mit gewohnter Handradeinstellung, der in dieser Ausführung aber zusätzlich noch über einen Pilotdruckeingang verfügt. Wird dieser Eingang mit Druckluft beaufschlagt, kann der über das Handrad eingestellte Basisdruck temporär erhöht werden.

Dieser Piloteingang wird über Zweig B (oberer Zweig in Abbildung 9) angesteuert, wo ein elektronischer Druckregler einen, über ein Strom- bzw. Spannungssignal einstellbaren, Druck zwischen z.B. 0-2 bar generiert, der dann zur gewünschten Erhöhung des Basisdrucks führt.

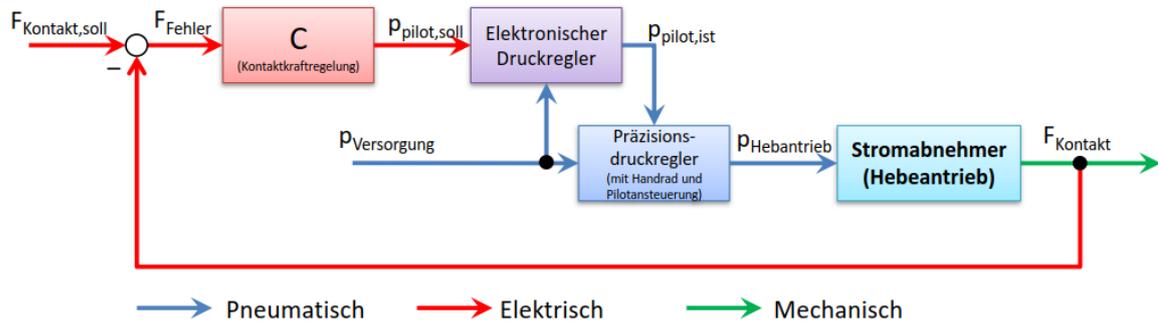


**Abbildung 9 Pneumatikplan des neu entwickelten Kontaktkraftregelungskonzeptes**

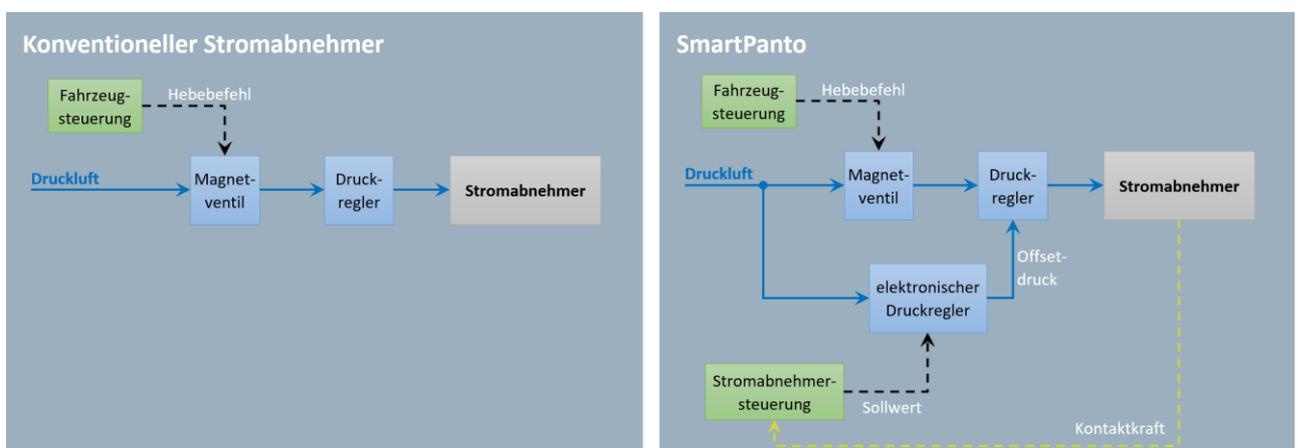
Nach dem Präzisionsdruckregler folgen eine Hebe- und eine Senkdrossel (Drosselrückschlagventile) zur Einstellung der Hebe- und Senkzeiten des Stromabnehmers. Anschließend ist die Platzierung eines Sensors und eines Sicherheits-Überdruckventils vorgesehen. Bei Bedarf kann auch noch ein Entlüftungsventil zur Schnellabsenkungs-Folgeschaltung verbaut werden, bevor die Druckluft schließlich zum Stromabnehmer geführt wird.

Selbst bei einem kompletten Ausfall des gesamten Zweig B (elektronischer Druckregler) ist über den Präzisionsdruckregler stets ein Mindestdruck vorhanden und das Pneumatiksystem entspricht jenem eines gewöhnlichen Stromabnehmers. Über das Sicherheitsventil kann darüber hinaus sichergestellt werden, dass keine zu hohen Drücke beim Stromabnehmer anliegen.

Abbildung 10 zeigt das Aktorikkonzept noch einmal als Blockschaltbild. Hier ist zu sehen, dass bei einem Ausfall der Steuerung bzw. der Software die geschlossene Regelschleife unterbrochen wird und die von herkömmlichen Stromabnehmern gewohnte Kontaktkrafteinstellung gültig ist.



**Abbildung 10** Blockschaltbild der Aktorik



**Abbildung 11** Vereinfachte Gegenüberstellung der Ansteuerung des Stromabnehmers: links: konventionell, rechts: SmartPanto

Abbildung 11 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der Ansteuerung eines konventionellen Stromabnehmers und den Vergleich zur Realisierung am SmartPanto. In beiden Fällen schaltet die Fahrzeugsteuerung zum Heben des Stromabnehmers ein Magnetventil und über einen Druckregler gelangt dann die Luft zum Stromabnehmer. Beim SmartPanto gibt es jedoch noch einen parallelen Zweig (inkl. der Rückführung „gemessene Kontaktkraft“ zur Regelung), wo der eingestellte Druck erhöht werden kann.

## Komponentenauswahl

Die Auswahl der elektronischen Druckregler erfolgte derart, dass diese mit den in Bahnanwendungen üblichen Spannungsniveaus betrieben werden können:

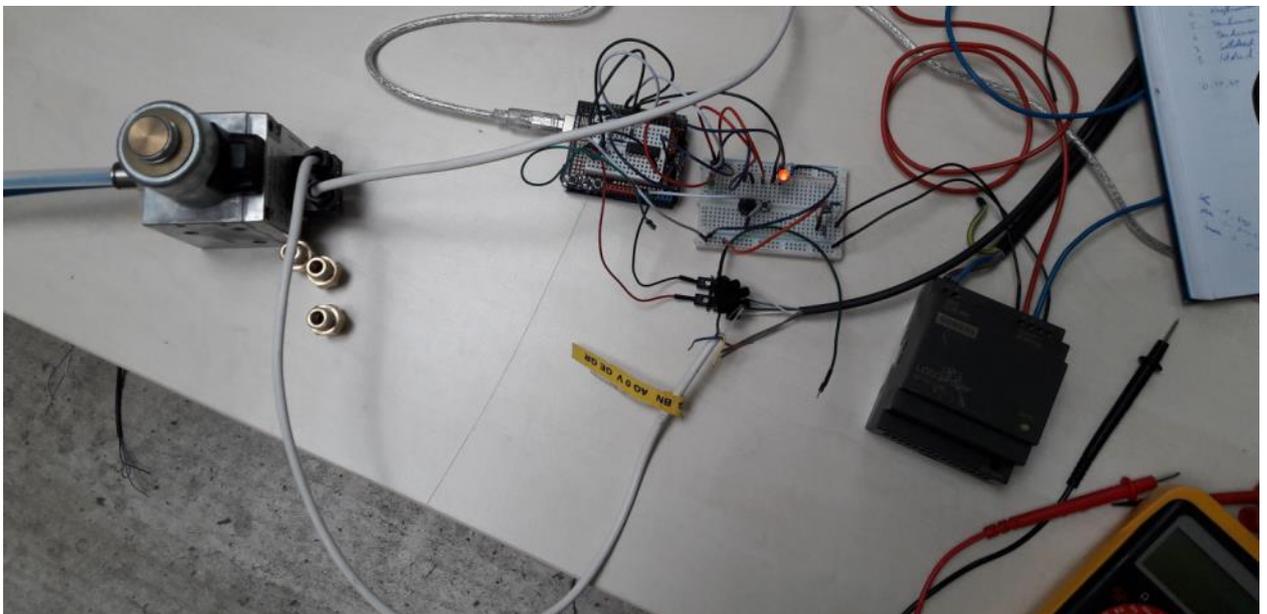
- 0..24 V Versorgung (Gleichspannung)
- 4..20 mA bzw. 0..10 V Referenzdruckvorgabe
- 4..20 mA bzw. 0..10 V Istwertrückgabe

Der Regler wurde dazu benutzt den Druck in einem Tank (siehe Abbildung 12 links) zu regeln. Mittels Drucksensoren (siehe Abbildung 12 rechts) wurde der Druck direkt vor und nach dem Regler gemessen.

Abbildung 13 zeigt den Aufbau der Elektronik und den Anschluss eines Druckreglers für die ersten Komponententests.



**Abbildung 12 Bild des 5 Liter Drucktanks (links) und eines Drucksensors (rechts)**



**Abbildung 13 Elektronik aus Abbildung 1 und Druckregler (links im Bild)**

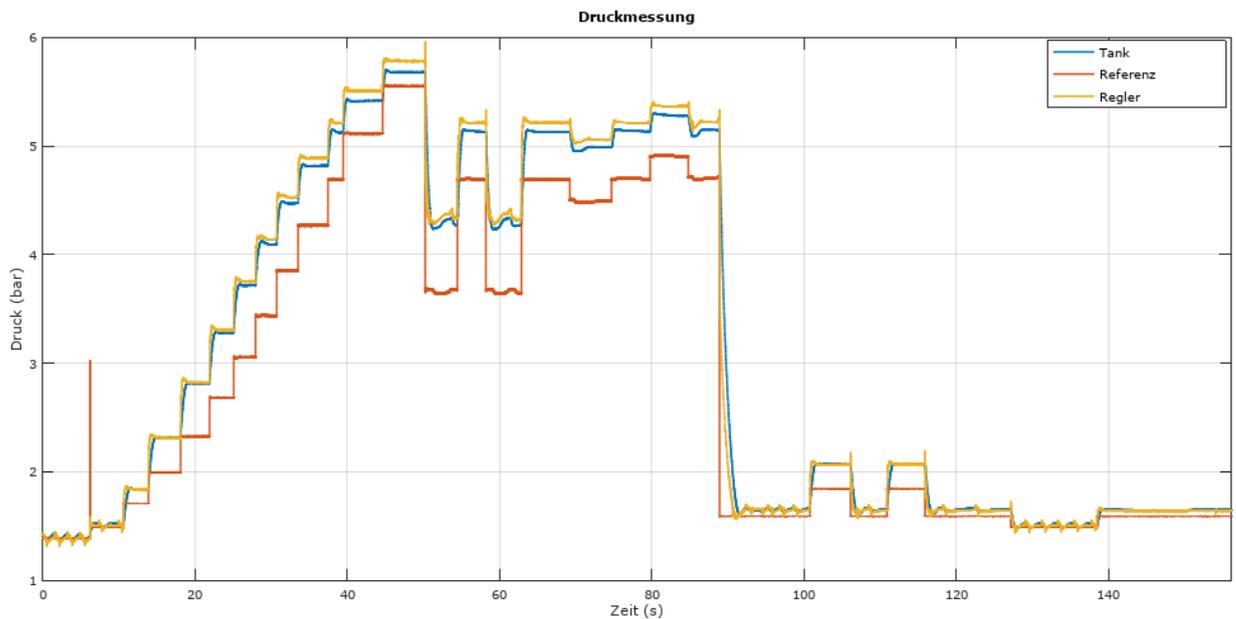
### Aventics ED007

Abbildung 14 zeigt den angeschlossenen Aventics Druckregler. Links in den Regler läuft die 10 bar Druckluftversorgung und rechts aus dem Regler kommt die geregelte (0-6 bar) Druckluft in den Tank (nicht im Bild) und mittels eines T-Stücks ist ein Drucksensor angeschlossen.



**Abbildung 14 Aventics ED07 Druckregler und Druckregler (rechts)**

Über das UART Interface wurden über einen PC die Referenzdrücke variiert und das Verhalten des Drucksensors gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 15 Ergebnisse mit dem Aventics ED07 Druckregler**

Auffällig ist die schlechte Regelgüte bei niedrigen Drücken (bis ca. 15 Sekunden), sowie die steigende Abweichung vom Referenzwert bei höheren Drücken. Die Wiederholgenauigkeit ist jedoch sehr gut und auch schnellen Änderungen im Referenzsignal wird schnell gefolgt. Bemerkenswert ist auch die mit steigenden Drücken größer werdende Diskrepanz zwischen dem mittels Sensoren gemessenen Tankdruck und jenem Wert, den der Regler als Istwert ausgibt.

### **Aventics ED05**

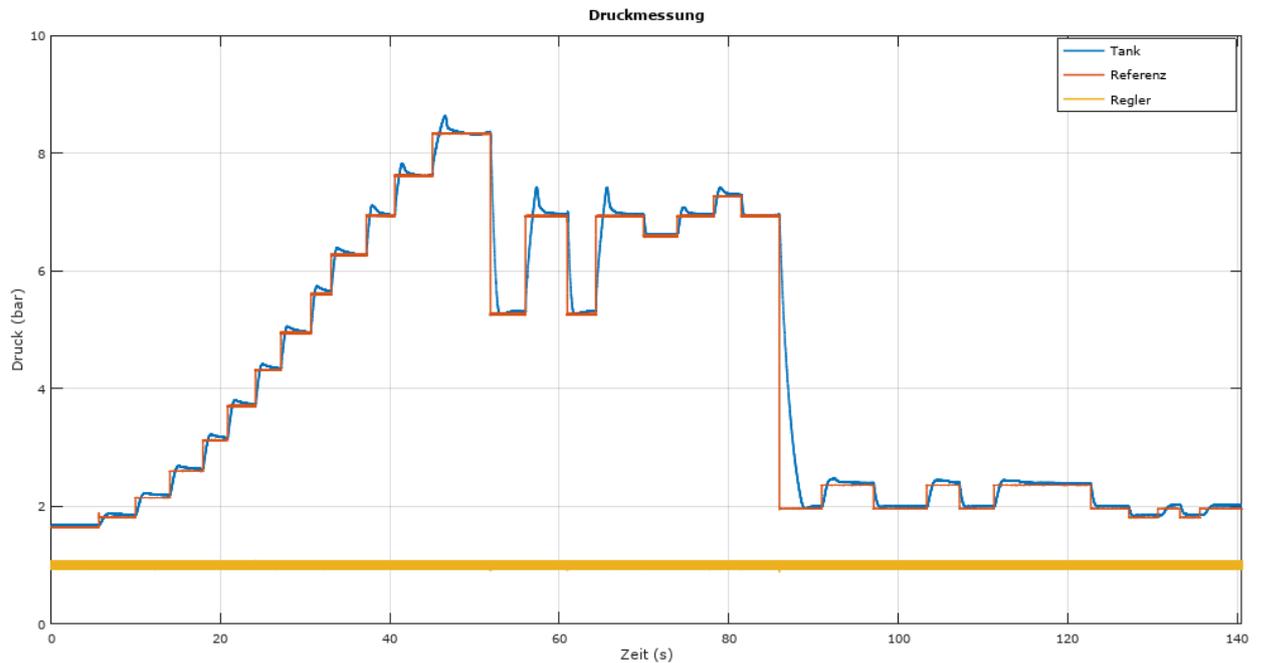
Dieser Regler ist in Abbildung 16 abgebildet. Er benötigt deutlich weniger Einbauraum als der zuvor getestete Aventics ED07, allerdings lieferte der eingebaute Sensor kein Signal über den eingeregeltten Druck.



**Abbildung 16 Aventics ED 05 Druckregler**

Die Messergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Im Vergleich zum Aventics ED07 folgt der Regler dem Referenzwert bei niedrigen und hohen Drücken besser (ohne bleibenden Offset). Allerdings ist die Regelgüte, insbesondere bei schnellen Sollwertänderungen, etwas schlechter als beim Aventics ED07, der deutlich mehr Volumen pro Minute regeln kann (und darum auch deutlich größer baut).

Niedrige Drücke werden hier besser eingeregelt (ohne Schwankungen um den Sollwert).



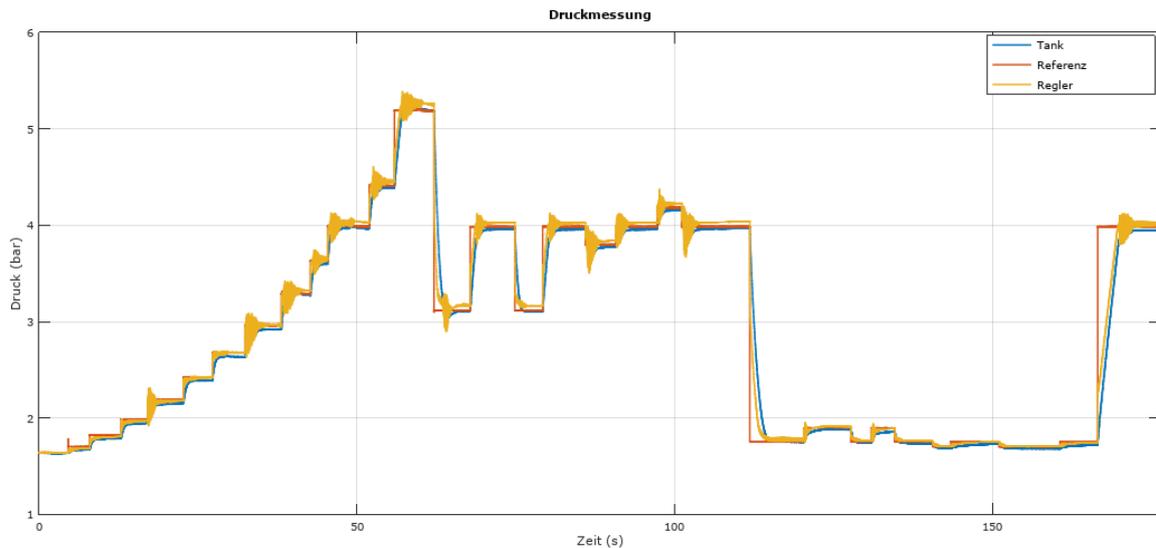
**Abbildung 17 Ergebnisse mit dem Aventics ED05 Druckregler**

### **Norgren LVP50**

Der Norgren LVP50 ist in Abbildung 18 gemeinsam mit dem Drucktank abgebildet. Er ist deutlich kleiner als die beiden Aventics Regler, ist allerdings auch für niedrigere Durchflussmengen ausgelegt, was vor allem bei schnellen Sollwertänderungen nachteilig sein könnte.



**Abbildung 18 Norgren LVP50 Druckregler mit angeschlossenem Drucktank**



**Abbildung 19 Ergebnisse mit dem Norgren LVP50 Druckregler**

Der Norgren LVP50 folgt dem Referenzsignal im Großen und Ganzen zufriedenstellend, allerdings zeigt der eingebaute Sensor wieder gewisse Abweichungen bei höheren Drücken. Außerdem ist ein seltsames Überschwingen und hochfrequentes Rauschen nach einem Sprung im internen Drucksignal zu sehen. Die Wiederholgenauigkeit ist jedoch gut und auch niedrige Drücke werden zufriedenstellend eingeregelt.

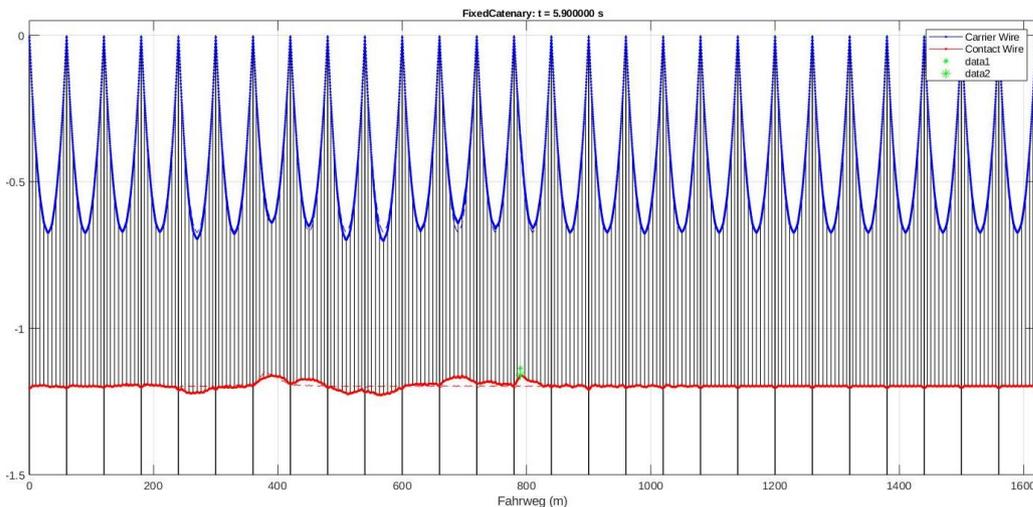
## Fazit

Aufgrund der kompakten Bauweise und des zufriedenstellenden guten Gesamteindruckes und der Bahntauglichkeit wird im weiteren Projektverlauf der Norgren LVP50 eingesetzt.

## MODELL- UND REGLERENTWICKLUNG

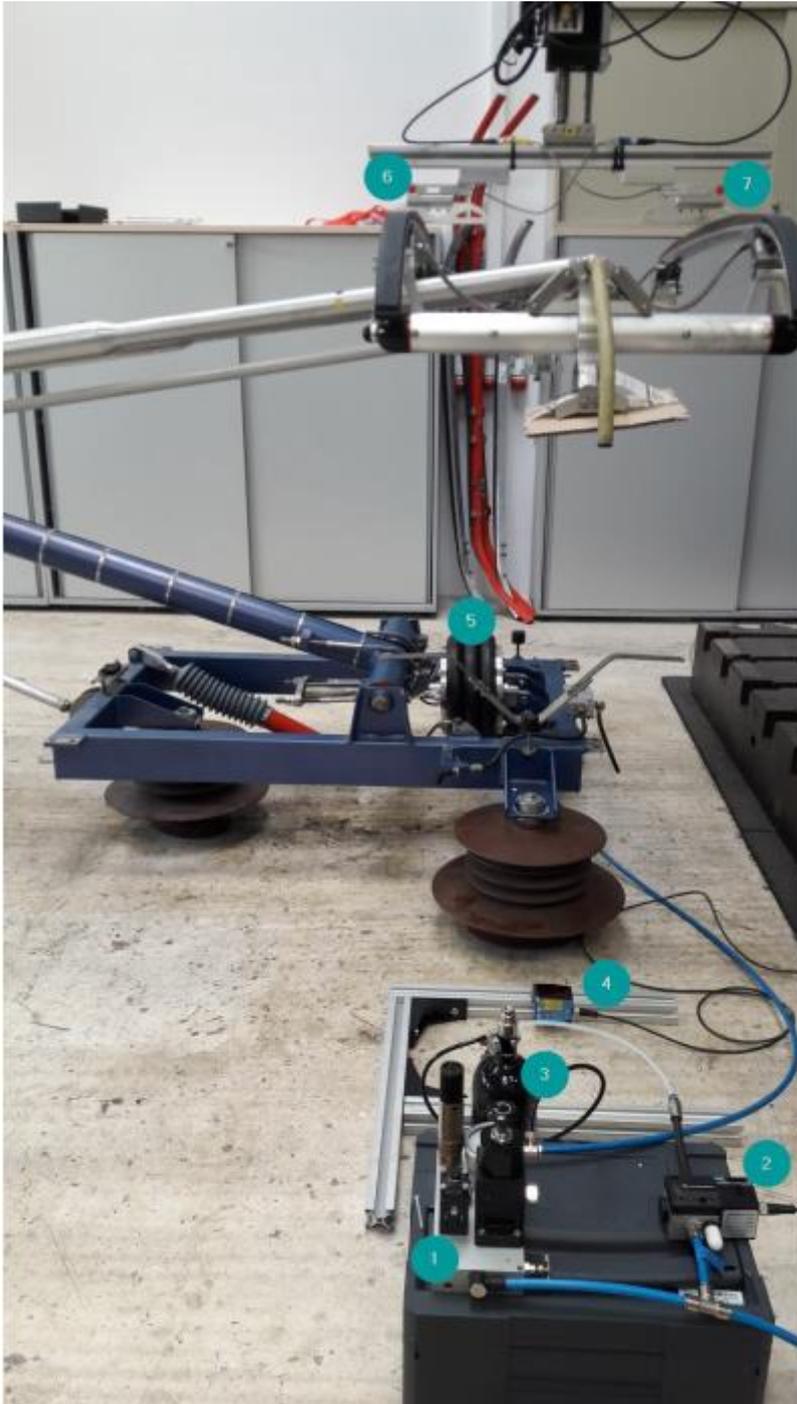
Eine Simulationsumgebung zur Untersuchung der dynamischen Interaktion zwischen Oberleitung und Pantographen wurde um die Funktionalität eines Stromabnehmers mit aktiver Kontaktkraftreglung erweitert. Darauf aufbauend wurde ein erstes Parameter tuning des Reglers vorgenommen.

Abbildung 11 zeigt einen typischen Ausschnitt einer solchen Simulation. Der rote Verlauf zeigt die vertikale Lage des Fahrdrachts, der durch die vertikalen Hänger mit dem blauen Tragseil des Kettenwerks verbunden ist. Im gezeigten Ausschnitt befindet sich der als grüner Punkt dargestellte Kontaktpunkt zum unter der Oberleitung simuliert entlangfahrenden Stromabnehmers nahe der 800 m Marke des auf der x-Achse dargestellten Fahrwegs.

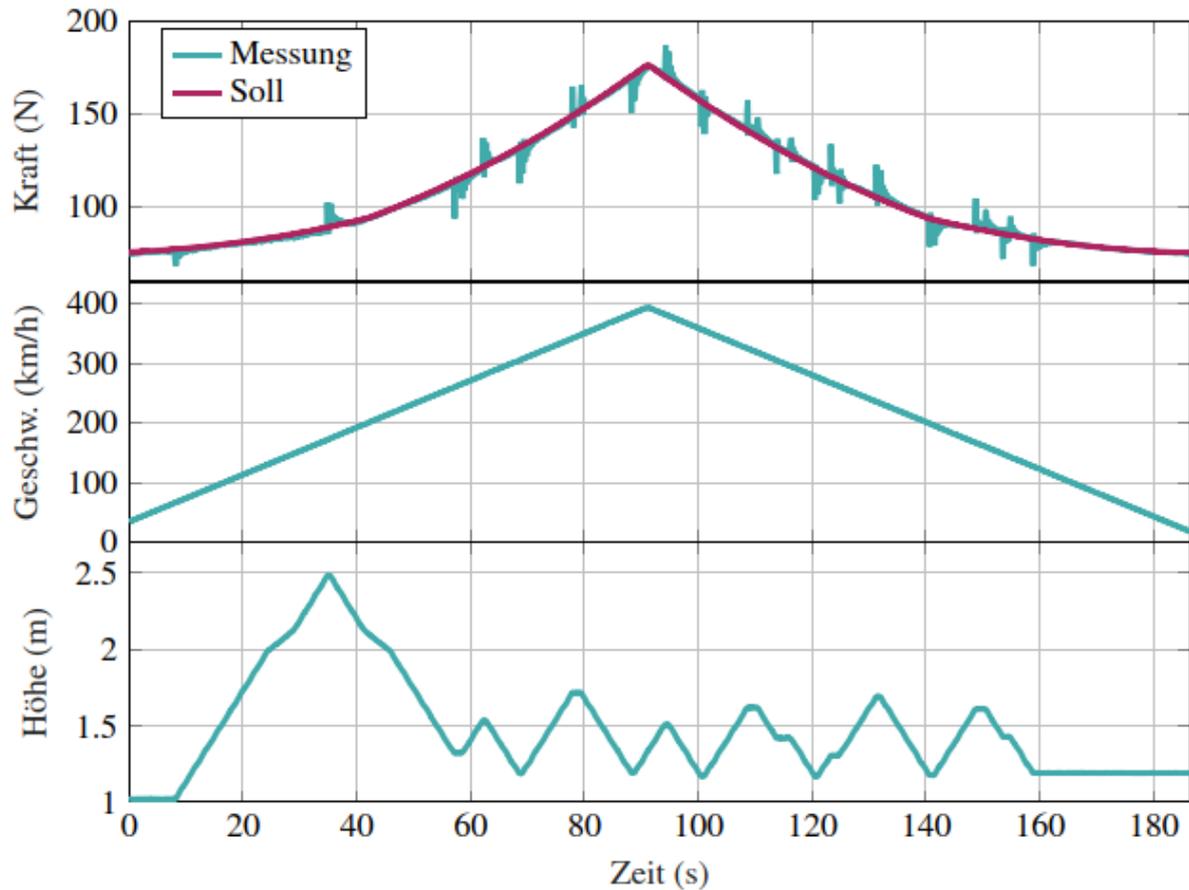


**Abbildung 20 Ausschnitt einer Oberleitungssimulation mit einem kraftgeregelten Stromabnehmer, hier dargestellt durch einen grünen Punkt**

Die in der Simulation erhaltenen Reglerparameter wurden zunächst Vorab-Tests auf einem anderen Stromabnehmermodell unterzogen, was in Abbildung 21 gemeinsam mit einer prototypischen Realisierung des Ansteuerkonzeptes zu sehen ist. Die Resultate dieser ersten Tests sind in Abbildung 22 zu sehen. Es wird auf dem Mikrocontroller eine Geschwindigkeit simuliert, woraus eine Kontaktkraft laut Norm resultiert. Zusätzlich wird mit dem Roboter eine veränderliche Fahrdrachthöhe simuliert, was idealerweise keine Auswirkungen auf die resultierende Kontaktkraft haben sollte. Die Geschwindigkeit wird rampenförmig verändert (konstante Beschleunigung von 0 km/h  $\rightarrow$  400 km/h  $\rightarrow$  0 km/h) und zusätzlich noch die Arbeitshöhe über den Roboter verändert. Der Regler ist trotz der beiden Störeinflüsse in der Lage, die Kontaktkraft sehr genau am gewünschten Wert einzuregeln.



**Abbildung 21** Vorab-Tests des Reglers auf einem anderen Stromabnehmer inkl. prototypischer Realisierung des Ansteuerkonzepts (im Bild unten zu sehen)



**Abbildung 22 Ergebnisse der ersten Reglertests (Kontaktkraft, simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit und Oberleitungshöhe)**

In einem nächsten Testfall wird die Arbeitshöhe konstant gelassen, dafür aber die Geschwindigkeit sprunghaft verändert. Dies führt zu sehr hohen, plötzlichen Regelfehlern, die zwar im Betrieb so nicht zu erwarten sind, aufgrund der geforderten Robustheit des Reglers allerdings trotzdem von diesem bewältigt werden müssen. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigt Abbildung 23. Die gemessene Kontaktkraft folgt den Sollwertsprüngen sehr schnell ( $\approx 3$  s), was bedeutet, dass der Regler im Produktivbetrieb sogar noch etwas konservativer (sicherer) gestellt werden kann.

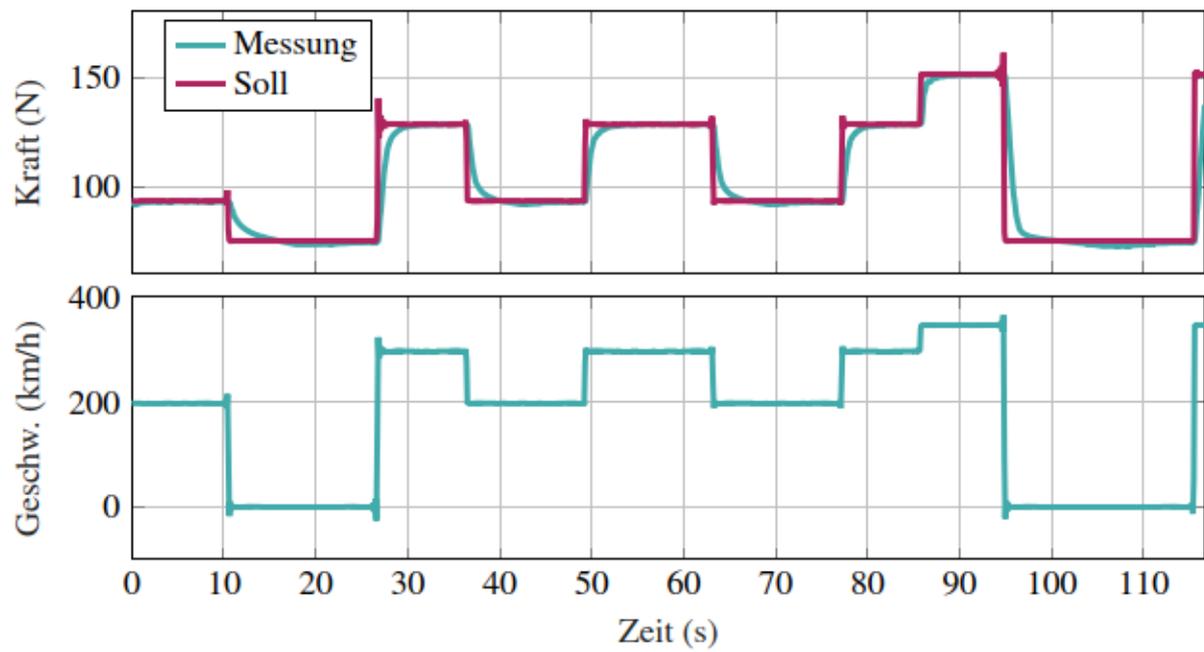
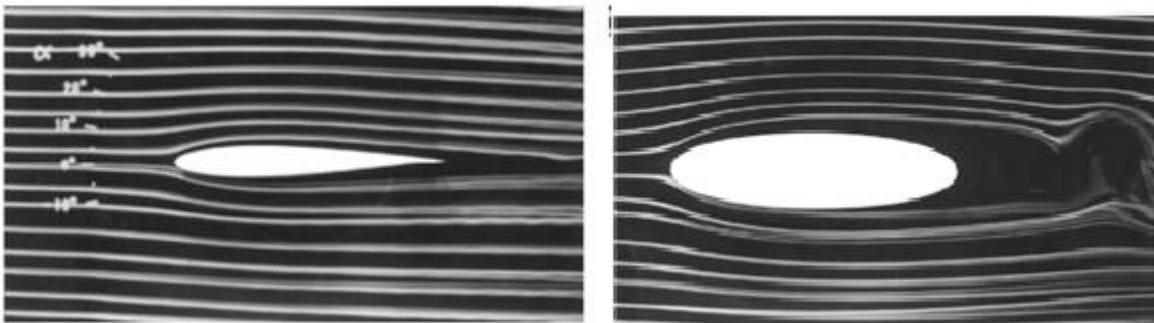


Abbildung 23 Ergebnisse der ersten Tests auf sprungförmige Sollwertänderungen

## KONSTRUKTION

Das Thema wurde zunächst in Form einer Literaturrecherche betrachtet, um geeignete Optimierungsmaßnahmen für die weitere Konstruktion vorab zu identifizieren. Abbildung 24 zeigt die laminare Anströmung einer optimierten Tragflügelform und einer Ellipse. Während erstere aufgrund der Bidirektionalität des Stromabnehmers (Betrieb in beide Fahrrichtungen) für den Stromabnehmer nicht verwendet werden kann, wäre es durchaus möglich, gewisse Rohre (z.B. das Scheitelrohr) elliptisch und somit aerodynamisch optimiert auszuführen. Allerdings ist die Neigung des Scheitelrohrs über die Höhe des Stromabnehmers nicht konstant, sodass im Endeffekt höhenabhängiger Auf- bzw. Abtrieb generiert werden würde, welcher bei klassischen Stromabnehmern unerwünscht ist und nur schwer durch Windleitbleche kompensiert werden könnte. Im vorliegenden Projekt wäre hingegen eine Kompensation durch die eingesetzte Kraftregelung leicht möglich.



**Abbildung 24 laminare Anströmung eines schlanken, aerodynamisch optimierten Körpers (links) und eines elliptischen Zylinders (rechts), Quelle: TU Braunschweig/Institutes für Strömungsmechanik**

Das Gestänge, bestehend aus Oberarm und Unterarm bietet ebenfalls Potential für Aerodynamikoptimierungen. In Abbildung 25 ist ein Auszug einer Publikation zu sehen. Durch die Verwendung eines Einarm-Oberarms ließe sich z.B. der Luftwiderstand um 13 % reduzieren.

Die Wippe, die auch die Schleifleisten beinhaltet und damit den Kontakt zur Oberleitung herstellt, ist besonders exponiert und nach Abbildung 26 auch hauptsächlich für die Strömungsgeräusche verantwortlich. Die Geschwindigkeit geht dabei in sechster Potenz ein, was den Schallpegel bei höheren Geschwindigkeiten drastisch erhöht.

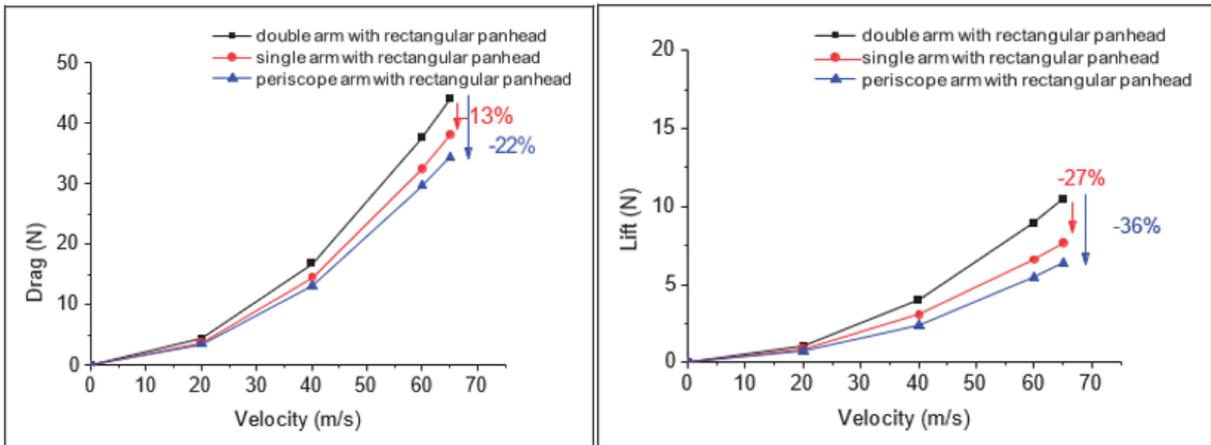


Abbildung 25 Einfluss von Stromabnehmerrealisierungen auf den Widerstand (links) und den Auftrieb (rechts) nach Lee et al., 2013

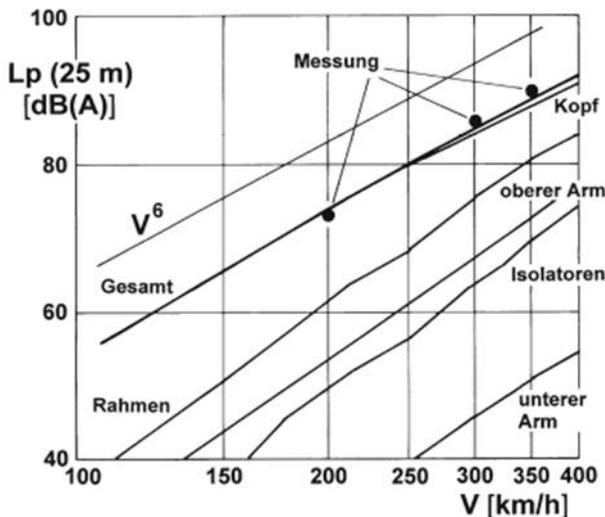


Abbildung 26 Berechneter Anteil der einzelnen Bauteile eines Stromabnehmers am Strömungsgeräusch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit nach Lölgen, 1997.

Aufgrund der tlw. oben dargelegten Erkenntnisse wurde zunächst der Einsatz einer aerodynamisch optimierten Drehfederwippe mit möglichst wenig rechteckigen Querschnitten und insgesamt wenig Staufflächen geplant. Im Projektverlauf hat sich jedoch herauskristalliert, dass aufgrund von Zulassungsthemen nur äußerst marginale Modifikationen am Stromabnehmer möglich sind, weshalb aerodynamische Optimierungen weitestgehend zu unterlassen haben und vor allem keine gravierenden Eingriffe in so zentrale Bauteile wie der Wippe möglich sind.

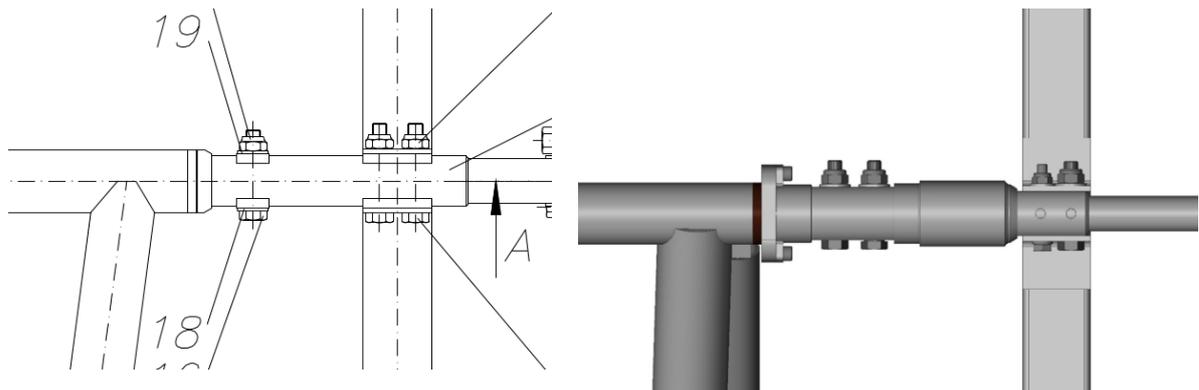
Für die Integration der Sensorik sind jedoch einige Anpassungen vorgenommen worden. Um den notwendigen Einbauraum für die Integration der Sensoren zu realisieren, war es

notwendig, einen schmäleren Oberarm zu verwenden. Er ist bis auf die Breite des Scheitelrohres ident mit dem Serienoberarm und ist in anderen Projekten bereits seit Jahren im Einsatz und daher ausreichend erprobt. Der schmalere Oberarm ist um 0,57 kg leichter als der Serienoberarm und verhält sich dynamisch nahezu ident mit dem Standardoberarm. Abbildung 27 zeigt einen Vergleich zwischen ursprünglichem Serienoberarm und dem adaptierten sowie die zum Einsatz kommende Parallelführungsstange (musste aufgrund der geänderten Oberarmbreite angepasst werden).



**Abbildung 27 Vergleich der Oberarme und Parallelführungsstange (links Serienstromabnehmer; rechts SmartPanto)**

Durch den schmäleren Oberarm ist nun ausreichend Platz zwischen Scheitelrohr und Wippe, um den Sensor montieren zu können. Dies ist in Abbildung 28 visualisiert, wo in der rechten Abbildung bereits die Wippe über den Kraftsensor montiert ist.



**Abbildung 28 Vergleich der Wippenanbindung zwischen Serienstromabnehmer (links) und dem SmartPanto (rechts)**

## INTEGRATION UND ERPROBUNG

Abbildung 29 zeigt den fertigen Stromabnehmer, wobei die Sensorkabeln noch mit Stahlkabelbinder fixiert werden müssen.



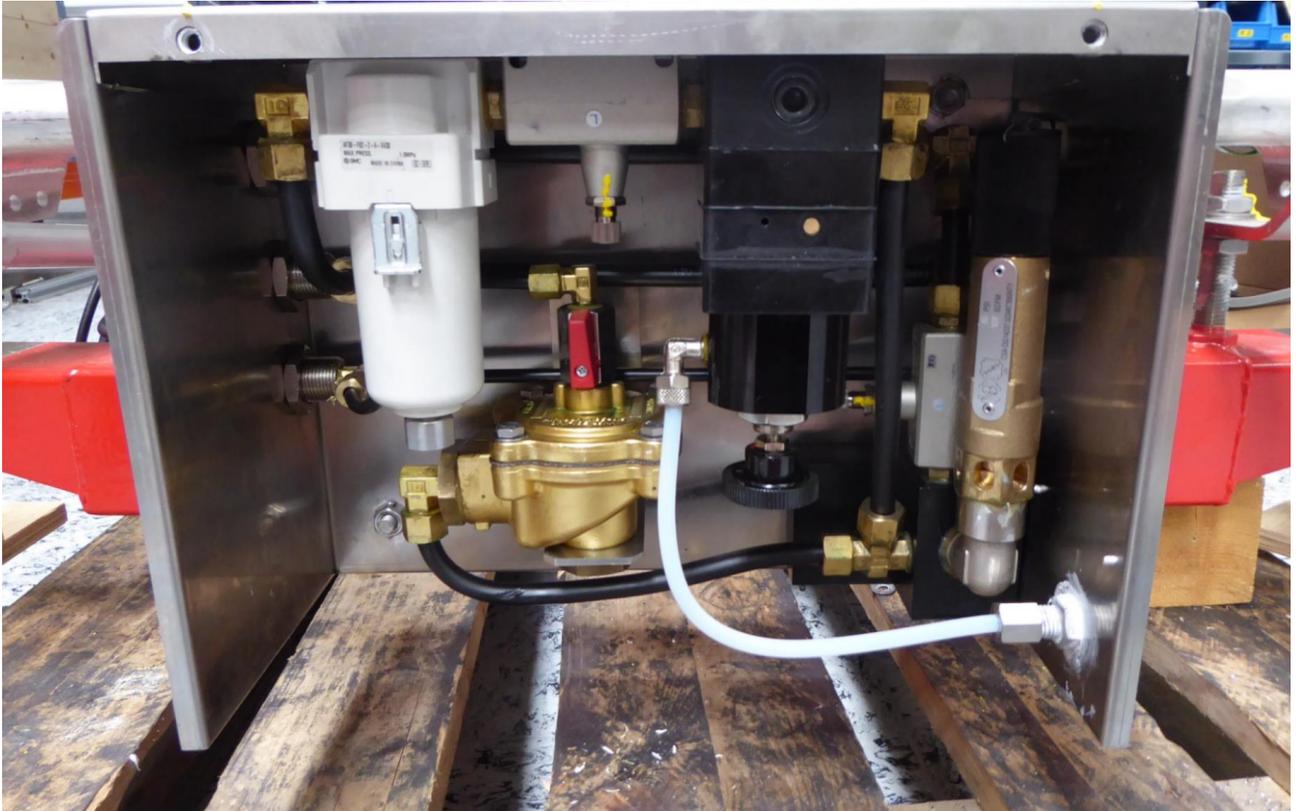
**Abbildung 29** Seitenansicht mit Hauptaugenmerk Scheitelrohr/Wippenmontage des aufgebauten SmartPantos

Für die Integration ins Fahrzeug wurden zwei Möglichkeiten vorgeschlagen:

- Adaptierung des vorhandenen Ventilkastens: Austausch des Druckreglers (auf einen mit Piloteingang) und Einbau des elektronischen Druckreglers im Wageninneren (erfordert noch eine zusätzliche Dachdurchführung (neben jener für die Sensorleitungen) für den Offsetdruck)
- Verlegung des gesamten Ventilkastens ins Wageninnere: Sämtliche Komponenten des Ventilkastens (inkl. der Erweiterung um den elektronischen Druckregler) werden ins

Fahrzeuginnere verlegt.

Variante 1 wurde der Vorzug gegeben, da sich diese Nahe am Serienstromabnehmer befindet. Abbildung 30 zeigt den modifizierten Ventilkasten.



**Abbildung 30** Foto des modifizierten Stromabnehmer-Ventilkastens: der neue Druckregler (in schwarz) mit seinem Offset-Piloteingang (weißer PTFE-Schlauch) ist in der rechten Hälfte zu sehen.

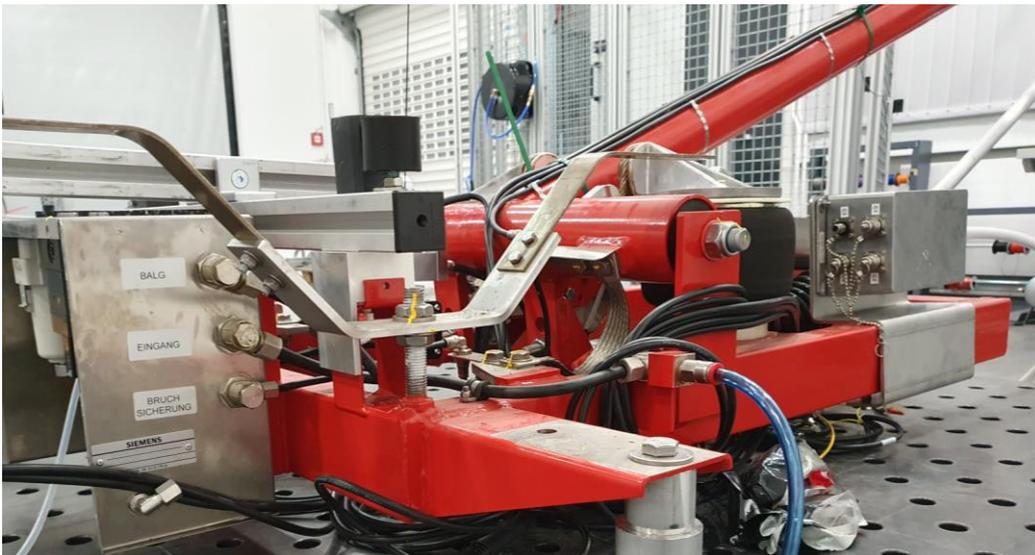
Die Sensorkabeln verlaufen entlang des Ober- und Unterarms bis zum Grundrahmen. Auf diesem wird eine Verbindungsbox (siehe Abbildung 31) montiert, von der wiederum ein PTFE Schlauch mit einer bereits montierten Kabelverschraubung für die Dachdurchführung ins Fahrzeuginnere führt. An diesem Kabel wird im Wageninnere der Interrogator (Abbildung 8) angeschlossen.

Sämtliche Materialien der optischen Verbindung (sowohl der PTFE-Schlauch als auch die Sensorkabeln an sich) wurden einem elektrischen Hochspannungstest unter Beregnung nach EN 50124-1 unter Stoßspannungen von 125 kV und Wechselspannungen von 50 kV unterzogen und sind somit auch für den Einsatz unter 25 kV Oberleitungen geeignet.

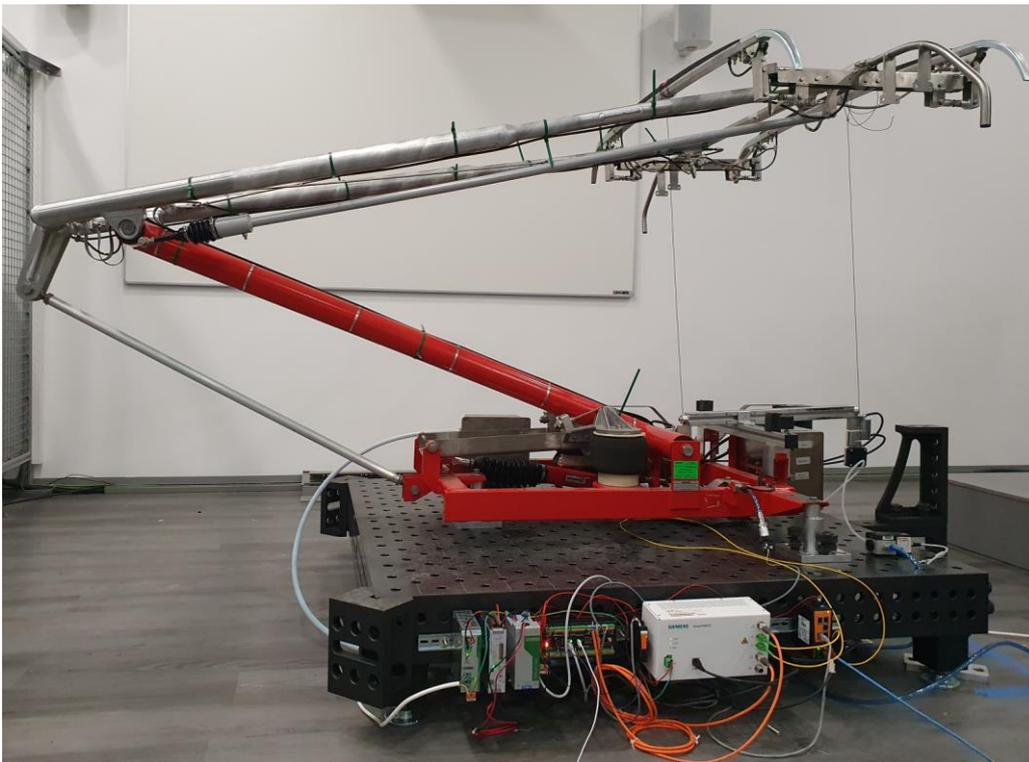


SCALE 1 : 5

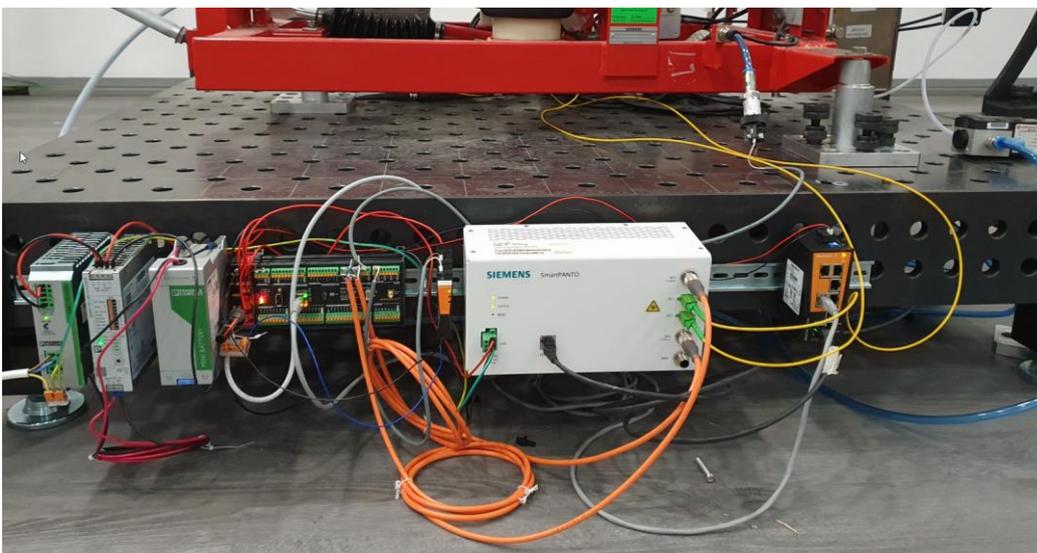
**Abbildung 31 Verbindungsbox, die am Grundrahmen montiert wird und die das Kabel für die Dachdurchführung besitzt**



**Abbildung 32 Detailaufnahme des Grundrahmens des gehobenen Stromabnehmers: links im Bild ist der Ventilkasten (ohne Abdeckung) und rechts am Grundrahmen ist die Verbindungsbox der optischen Kraftmesseinrichtung**



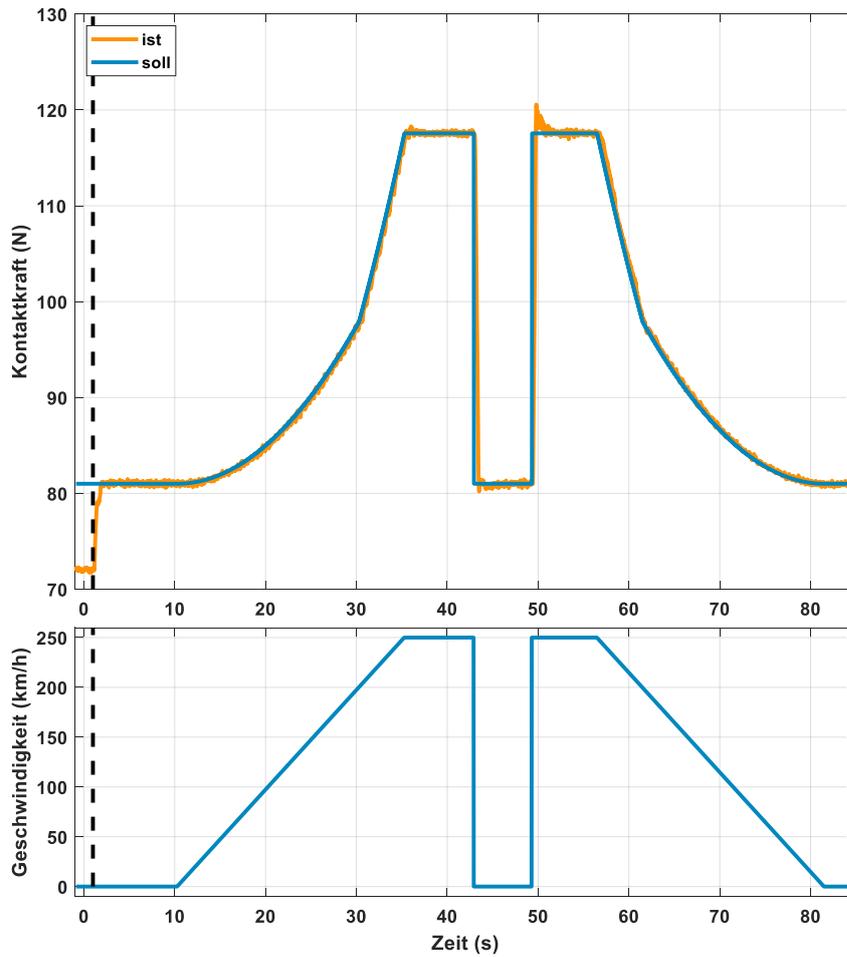
**Abbildung 33** Bild des mit Messtechnik ausgestatteten fertig aufgebauten Stromabnehmers, inkl. Komponenten im Wageninneren (unten im Vordergrund) sowie den Vorbereitungen zu einer Schnurmessung zur Ermittlung von aerodynamischen Korrekturfaktoren



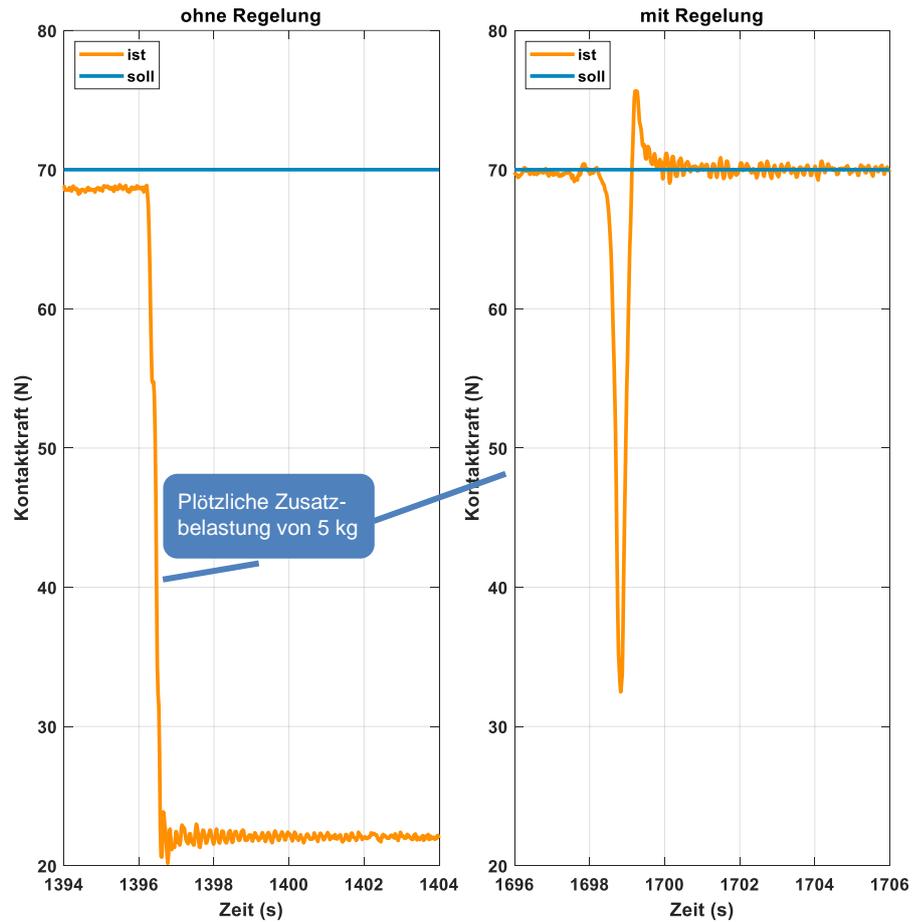
**Abbildung 34** Bild der im Wageninneren vorgesehenen Komponenten

Abbildung 35 zeigt Prüfstandergebnisse vom fertig aufgebauten kraftgeregelten Stromabnehmer. Es wurde eine rampen- und sprungförmige Geschwindigkeitstrajektorie simuliert, aus der sich der in Abbildung 35 oben (in blau) dargestellte Sollkraftverlauf ergibt. Die tatsächliche Kontaktkraft (in gelb) folgt dem Sollwert sehr gut. Zusätzlich bei  $t=1$  s zu sehen ist, wie die Regelung aktiviert wird und die statische Kontaktkraft im Stillstand sofort nachgeführt wird. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsanstieg und Sollkraftvorgabe ist auf die normativen Vorgaben aus EN 50367: 2020, bzw. konkret Abbildung A.10, zurückzuführen.

Abbildung 36 zeigt den Fall einer sprungförmig wirkenden Störgröße, die mit einem 5 kg Gewicht, das ruckartig auf das Scheitelrohr wirkt, realisiert wurde. Links im Bild sieht man das Ergebnis bei deaktivierter Regelung, was dem Verhalten eines herkömmlichen Stromabnehmers entspricht, wo die Kontaktkraft um ca. 50 N abnimmt. Rechts im Bild ist der gleiche Versuch bei aktivierter Regelung zu sehen, wo der Einfluss der Störung rasch durch die Regelung eliminiert wird und bereits nach ca. 1 s wieder die Sollkontaktkraft anliegt. Dieser Testfall einer plötzlich auftretenden, und dann anhaltenden, Störgröße ist mit dem Übergang zwischen Betrieb auf freier Strecke und einem Tunnelabschnitt vergleichbar, da sich die Änderung der aerodynamischen Anströmung direkt auf die Kontaktkraft eines Stromabnehmers auswirkt, sofern dieser nicht über die hier dargestellte Regelung verfügt.



**Abbildung 35 Prüfstandsergebnisse des kraftgeregelten Stromabnehmers: unten ist der simulierte Geschwindigkeitsverlauf abgebildet, aus dem sich die Sollkontaktkraft (oben, blau) berechnet und in gelb ist die tatsächliche Kontaktkraft dargestellt**



**Abbildung 36 Prüfstandsergebnisse: Stromabnehmer wird einer plötzlichen Belastung von 5 kg am Scheitelrohr ausgesetzt: links: Verhalten ohne Regelung, rechts: Verhalten mit aktivierter Regelung**

Formale Vorgaben:

<b>Einrichtung der Seite</b>	<b>Abstand in cm</b>
Oben:	3,5
Unten:	3
Links:	3
Rechts:	2,5

<b>Formatvorlage</b>	<b>Schriftart</b>	<b>Schriftgröße</b>
Hauptkapitelüberschriften	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Überschriften	Arial, fett	13pt
Standardtext	Arial, 1,5-zeilig, Blocksatz	11pt
Überschriften von Verzeichnissen	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Inhaltsverzeichnis Abbildungsverzeichnis Tabellenverzeichnis Literaturverzeichnis	Arial	12pt
Fußnotenzeichen	Arial, hochgestellt	10pt
Fußnotentext	Arial	10pt
Untertitel von Tabellen und Abbildungen	Arial, fett	10pt
Quelle von Tabellen und Abbildungen	Arial	8pt
Seitennummerierung	Arial, zentriert, Seitenende	10pt