

# Einflussparameter auf das Verschleißverhalten von Fahrdrabt und Schleifleiste

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Biesenack<sup>1</sup>, Dr.-Ing. A. Brodkorb<sup>2</sup>,  
Dipl.-Ing. R. Matthes<sup>3</sup> und Dipl.-Ing. F. Pintscher<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,  
Institut für Elektrische Verkehrssysteme  
01062 Dresden, Deutschland  
e-mail: [hartmut.biesenack@mailbox.tu-dresden.de](mailto:hartmut.biesenack@mailbox.tu-dresden.de)  
URL: [www.tu-dresden.de/vkiew/elversys.htm](http://www.tu-dresden.de/vkiew/elversys.htm)
- <sup>2</sup> Siemens AG, Transportation Systems, Electrification, Engineering TS EL EN 4  
Postfach 32 40, 91050 Erlangen, Deutschland  
e-mail: [albrecht.brodkorb@ts.siemens.de](mailto:albrecht.brodkorb@ts.siemens.de)  
URL: [www.siemens.de/ts/ts\\_d/produkte\\_loesungen/bahn\\_elektrifizierung/](http://www.siemens.de/ts/ts_d/produkte_loesungen/bahn_elektrifizierung/)
- <sup>3</sup> Siemens AG, Transportation Systems, Electrification, Engineering TS EL EN 4  
Postfach 32 40, 91050 Erlangen, Deutschland  
e-mail: [rainer.matthes@ts.siemens.de](mailto:rainer.matthes@ts.siemens.de)  
URL: [www.siemens.de/ts/ts\\_d/produkte\\_loesungen/bahn\\_elektrifizierung/](http://www.siemens.de/ts/ts_d/produkte_loesungen/bahn_elektrifizierung/)
- <sup>4</sup> TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,  
Institut für Elektrische Verkehrssysteme  
01062 Dresden, Deutschland  
e-mail: [pintsch@rcs.urz.tu-dresden.de](mailto:pintsch@rcs.urz.tu-dresden.de)  
URL: [www.tu-dresden.de/vkiew/elversys.htm](http://www.tu-dresden.de/vkiew/elversys.htm)

**Kurzfassung:** Der Kontakt Fahrdrabt – Schleifleiste hat die Aufgabe elektrischen Strom zwischen der Oberleitung und dem Stromabnehmer des Triebfahrzeuges mittels eines Gleitkontaktes zu übertragen. Dabei entsteht elektrischer und mechanischer Verschleiß. Die Einflussparameter und Zusammenhänge, die das Verschleißverhalten von Fahrdrabt und Schleifleiste beeinflussen, werden in diesem Vortrag näher betrachtet, da sie für eine gezielte Weiterentwicklung des Systems Oberleitung – Stromabnehmer die Voraussetzung bilden. Zur detaillierteren Untersuchung dieser Einflussparameter und Zusammenhänge auf das Verschleißverhalten wurde an der TU Dresden ein Versuchstand errichtet, mit dem der Kontaktwiderstand zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste unter verschiedenen Randbedingungen gemessen werden kann. Die Aufgaben und der Aufbau dieses Versuchstandes einschließlich der eingesetzten Messwertnehmer werden in diesem Vortrag vorgestellt. Den Abschluss bildet eine Präsentation der ersten Messergebnisse und deren Einfluss auf das Verschleißverhalten von Fahrdrabt und Schleifleiste.

**Schlagworte:** Verschleiß; Oberleitung; Fahrdrabt; Stromabnehmer; Schleifleiste

# 1 Einleitung

Die Zuführung der elektrischen Energie ist eine Problematik, die den Betrieb eines elektrischen Bahnsystems prägt. Diese grundsätzliche Aufgabenstellung konnte bis heute - insbesondere für den höheren Geschwindigkeitsbereich – noch nicht vollständig gelöst werden. Die am weitesten verbreitete Lösung, die Leistungszuführung mittels Oberleitung und Stromabnehmer zu realisieren, schränkt die Flexibilität des elektrischen Bahnsystems erheblich ein. Dazu zählt unter anderem die maximal zulässige Fahrgeschwindigkeit, bei der eine störungsfreie, kontinuierliche Leistungsübertragung gewährleistet werden kann. Denn das Zusammenwirken von Oberleitung und Stromabnehmer bestimmt wesentlich die Zuverlässigkeit und Güte dieser Leistungszuführung. Neben der Konstruktion der Oberleitung und des jeweiligen Stromabnehmers ist das Kontaktverhalten von einer Vielzahl von Parametern und Einflussfaktoren abhängig. Durch zusätzliche Verknüpfung dieser Einflussparameter untereinander erreicht das System Oberleitung – Stromabnehmer eine schwer fassbare Komplexität. Kenntnisse über die Parameter und Einflussfaktoren sowie deren Zusammenhänge sind aber unbedingt erforderlich, um dieses System weiter zu optimieren, zum Beispiel um die zulässige Höchstgeschwindigkeit anzuheben oder um die Aerodynamik und Aeroakustik zu verbessern. Dabei sollte auch immer die Minimierung des Verschleißes an Fahrdrabt und Schleifleiste eine herausragende Beachtung finden.

## 2 Theoretische Vorbetrachtungen

### 2.1 Kontakt Fahrdrabt – Schleifleiste

Die Übersicht in Abbildung 1 soll dazu dienen, dem Leser den Einstieg in die Problematik der Kontaktierung von Fahrdrabt und Schleifleiste zu erleichtern [4]. Das System Oberleitung – Stromabnehmer hat die Aufgabe, die erforderlich elektrische Leistung zwischen der stationären Fahrleitung und dem ortsveränderlichen Triebfahrzeug zu übertragen. Dieser Prozess hat unter ständigem mechanischen und elektrischen Kontakt, also störungsfrei zu erfolgen. Dabei sollte aber der Verschleiß an Fahrdrabt und Schleifleiste minimal sein.

Das Kontaktverhalten zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste wird geprägt durch die reale mechanische Kontaktfläche. Die Struktur dieser Kontaktfläche wird durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Fahrdrabt und Schleifleiste bestimmt. Zu diesen Eigenschaften zählen allgemeine Angaben zu den Kontakten, wie das Volumen, die Dichte und die Zusammensetzung der Kontaktwerkstoffe. Die Kontaktoberflächen werden durch deren Größe und Geometrie sowie durch die Oberflächenrauheit beschrieben. Des weiteren interessieren die mechanischen Eigenschaften der Kontaktmaterialien. Da wären die Härte, der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit zu nennen. Aus Sicht der Werkstoffkunde ist auch das Gefüge der Materialien wichtig.

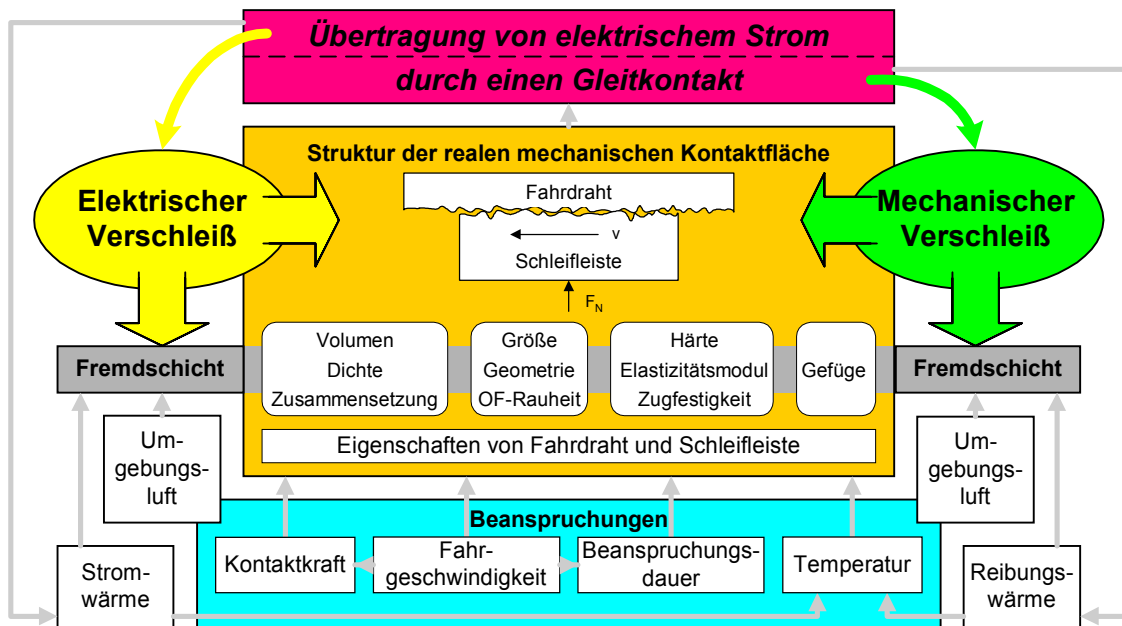


Abbildung 1: Kontakt Fahrdrabt – Schleifleiste.

Ein herausragender Punkt bei der Beurteilung der Kontaktflächen stellt die Fremdschicht dar. Charakterisiert wird sie durch deren Zusammensetzung, Struktur und Stärke. Als Fahrdrabt-

material wird heute ausschließlich reines oder niedriglegiertes Kupfer verwendet. Kupfer besitzt die Eigenschaft, sich schon innerhalb kürzester Zeit mit einer Fremdschicht zu überziehen. Bei den aus Kohlenstoff hergestellten Schleifleisten tritt dieser Vorgang nicht auf.

Bei der Fremdschichtbildung des Kupfers handelt es sich überwiegend um Oxidationsprozesse. Damit besitzt die Umgebungsluft einen wesentlichen Einfluss. Die Fremdschicht eines Kupferfahrdrabtes, die man auch als Patina bezeichnet, setzt sich aus Kupfer-I-Oxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), Kupfer-II-Oxid ( $\text{CuO}$ ) und zu geringem Umfang aus Kupfersulfat ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ) zusammensetzt. Außerdem wird in die Fremdschicht Kohlenstoffabrieb und Staub eingewalkt. Diese Kupferpatina weist gute Gleiteigenschaften auf. Ihr Reibwert ist kleiner als der von reinem Kupfer, was sich positiv auf die Abnutzung der Schleifleisten auswirkt. Die Patina ist auch härter als Kupfer und damit verringert sich der Verschleiß am Fahrdrabt. Jedoch besitzt sie einen größeren elektrischen Widerstand, da es sich bei Kupferoxiden um Halbleiter handelt.

Bei der Fremdschichtbildung ist aber auch zu berücksichtigen, dass diese Schicht bei jedem Stromabnehmerdurchgang aufgrund der Polierwirkung der Schleifleiste mechanisch beansprucht wird.

Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen bildet sich eine Wasser- bzw. Eisschicht auf den Kontakten. Aber auch unter scheinbar idealen Witterungsbedingungen setzen sich aufgrund der Luftfeuchte Wassermoleküle an den Kontaktoberflächen ab. Dieser Wasserfilm besitzt eine nicht zu unterschätzende Bedeutung als Schmiermittel.

Dieser Gleitkontakt unterliegt den folgenden äußeren Beanspruchungen: der Kontaktkraft, der Fahrgeschwindigkeit, der Beanspruchungsdauer und der Temperatur. Die Kontaktkraft stellt die Koppelgröße zwischen den Teilsystemen Oberleitung und Stromabnehmer dar. Dabei ist zu beachten, dass es sich um zwei eigenständige, schwingungsfähige Systeme handelt. Der Kontaktkraftverlauf ist ein grundlegendes Gütekriterium für das Zusammenspiel von Oberleitung und Stromabnehmer. Neben der jeweiligen Oberleitungs- bzw. Stromabnehmerkonstruktion ist die Fahrgeschwindigkeit der wichtigste Einflussparameter auf die Kontaktkraft. Ebenfalls von der Fahrgeschwindigkeit ist die Beanspruchungsdauer abhängig. In dieser Beziehung stellt der Stillstand der Fahrzeuges einen Extremfall dar. Zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste treten verschiedene Arten von Relativbewegungen auf. Dadurch beeinflusst die Fahrgeschwindigkeit die Kontaktvorgänge in direkter Weise. Infolge der Erwärmung des Kontaktbereiches durch die Strom- und Reibungswärme existiert eine entsprechende Kontaktflächentemperatur. Diese Temperatur bestimmt die physikalischen und chemischen Vorgänge bei der Kontaktierung wesentlich.

Den größten Einfluss auf den Kontakt Fahrdrabt – Schleifleiste besitzt jedoch der Verschleiß. Aus der Funktion des Kontaktes, der Übertragung von elektrischem Strom durch einen Gleitkontakt, resultieren letztendlich elektrischer und mechanischer Verschleiß sowie die Entstehung von Strom- und Reibungswärme.

## **2.2 Elektrischer Verschleiß**

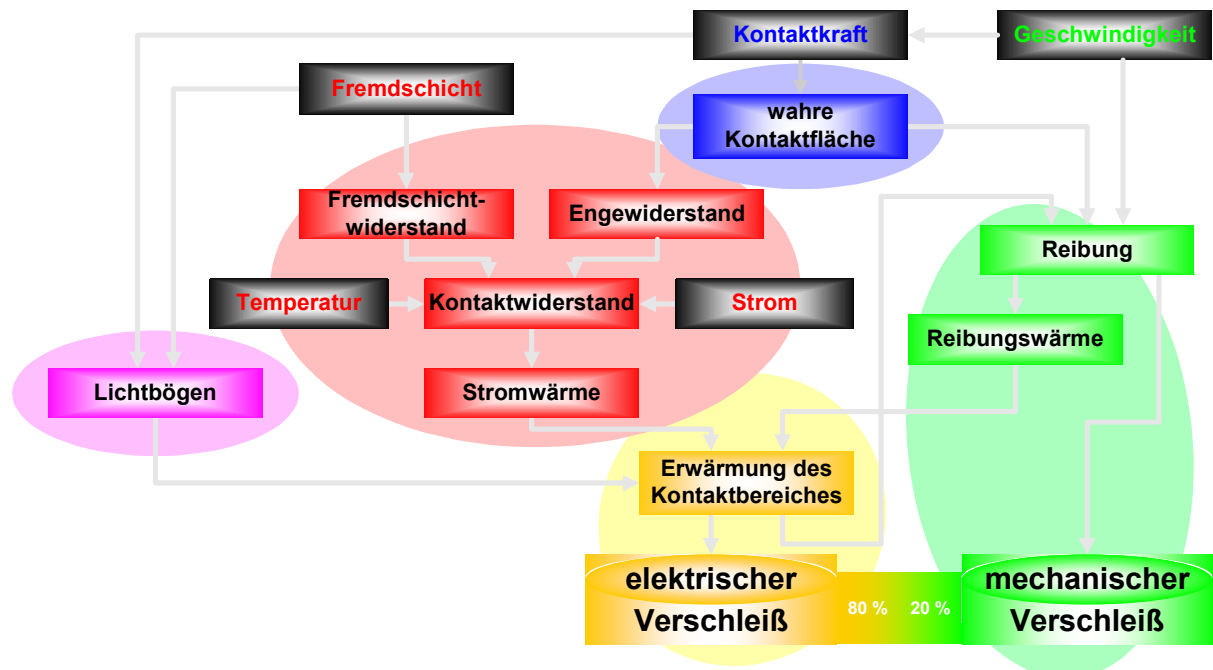
Im folgenden Abschnitt soll der elektrische Verschleiß an Fahrdrabt und Schleifleiste einer detaillierteren Betrachtung unterzogen werden (Abbildung 2). Er entsteht durch das Schmelzen, das Verdampfen oder das Verbrennen der Strombrücken, die sich zwischen den beiden

Kontakten ausbilden. Diese Prozesse stehen im unmittelbarem Zusammenhang mit der Temperatur im Kontaktbereich. Eine Wärmequelle resultiert aus den Lichtbögen. Sie entstehen einerseits bei der Unterschreitung der erforderlichen Kontaktkraft und andererseits bei einer zu großen nichtleitenden Wasser- oder Eisschicht. Im störungsfreiem Betrieb wird dem Kontakt Wärme im Form von Stromwärme- und Reibungsverlusten zugeführt.

Bekanntlich sind die Stromwärmeverluste das Produkt aus dem Kontaktwiderstand und dem Quadrat des elektrischen Stromes. Der Kontaktwiderstand, auch Übergangswiderstand genannt, ist von der Temperatur im Kontaktbereich abhängig. Er setzt sich aus zwei Teilwiderständen je Kontakt zusammen:

- Fremdschichtwiderstand,
- Enge- bzw. Ausbreitungswiderstand.

Bei der häufig verwendeten Kontaktpaarung Kupferfahrdrabt und Kohleschleifleiste kann der Engewiderstand des Fahrdrabtes vernachlässigt werden, da der spezifische elektrische Widerstand des Kupfers um Zehnerpotenzen kleiner ist als der der Kohle. Außerdem entfällt der Fremdschichtwiderstand der Schleifleiste.



**Abbildung 2:** Elektrischer und mechanischer Verschleiß.

Beim Fremdschichtwiderstand wäre zuerst die Frage der Stromübertragung in der nichtleitenden Patina zu klären. Dazu existieren zwei Theorien:

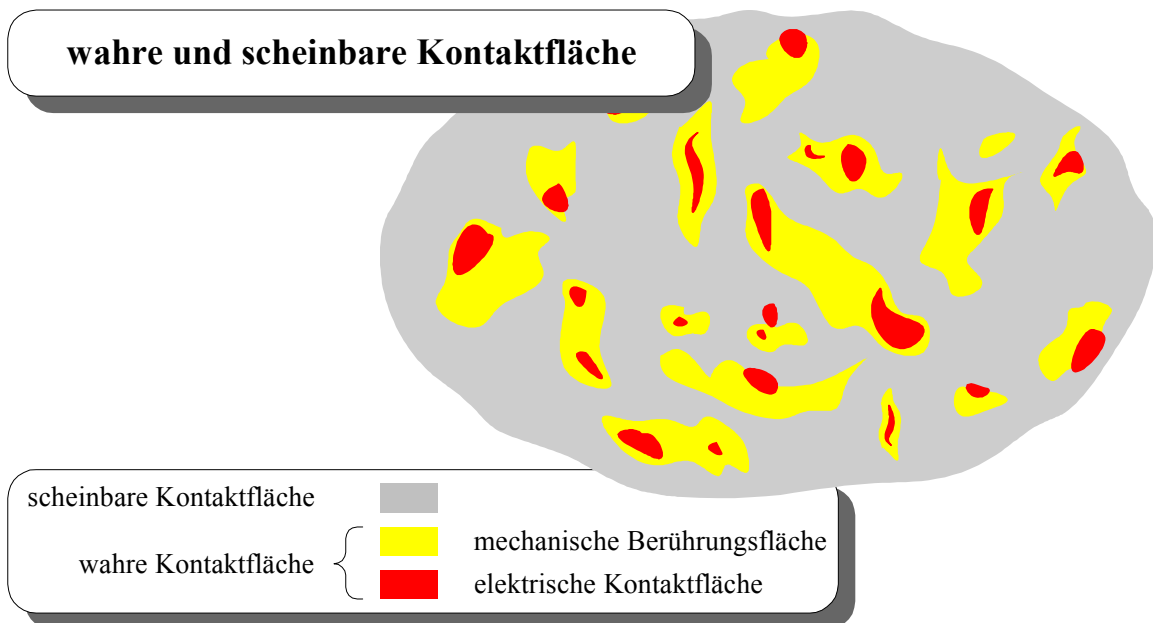
- Halbleitung,
- Frittung.

Kupfer-I-Oxid ist ein Defektelektronenleiter, d.h. die elektrische Leitfähigkeit beruht auf Löchern im Kationengitter. Übersteigt die elektrische Feldstärke bzw. die Stromdichte in der Fremdschicht einen bestimmten Grenzwert, kommt es zur lokalen Zerstörung des Kupfer-

oxidgitters. Es entstehen metallische Kanäle in der Oxidschicht. Dieser Prozess wird als Fritung bezeichnet.

Die Definition des Engewiderstandes soll an dem folgenden Beispiel erläutert werden. Den Ausgangspunkt bildet ein metallischer Stab, der quer zur Längsachse aufgetrennt wurde. Werden danach die beiden Bruchflächen wieder aufeinander gedrückt, erhöht sich der elektrische Widerstand dieses Stabes gegenüber dem ursprünglichen Wert vor dem Zerbrechen. Die sich daraus ergebende Widerstandsdifferenz wird als Engewiderstand bezeichnet. Er resultiert aus der Einengung der Stromlinien aufgrund der Existenz einer realen Kontaktfläche. Zur Nachbildung und Berechnung dieses Widerstandes kann das Ellipsoidmodell nach Holm [8] genutzt werden. Der Engewiderstand ist abhängig vom spezifischen elektrischen Widerstand der Kohle und von der Anzahl und dem Querschnitt der Strombrücken und damit von der Größe der wahren Kontaktfläche.

Zur Beurteilung der Kontaktvorgänge ist eine Analyse der Kontaktflächen unverzichtbar. Da es in der Praxis keine ideal glatten Oberflächen gibt, wird sich der Kontakt nicht über die gesamte, scheinbare Kontaktfläche ausbreiten, sondern nur auf ein paar bestimmte Punkte beschränken. Die Summe dieser Punkte wird als wahre Kontaktfläche bezeichnet. Wie Abbildung 3 verdeutlicht, ist von dieser Fläche wiederum nur ein Teil an der Übertragung des elektrischen Stromes beteiligt, woraus letztendlich der Engewiderstand resultiert. Die Größe dieser Flächen wird von der Rauheit der Oberflächen beeinflusst. In Abhängigkeit von der Höhe der angreifenden Kraft und den elastischen Eigenschaften der Kontaktwerkstoffe kommt es zu elastischen oder plastischen Verformungen bzw. zu einer Kombination von beiden, wodurch sich die entsprechenden Kontaktflächen ausbilden.



**Abbildung 3:** Wahre und scheinbare Kontaktfläche.

Da die Kontaktkraft ein herausragendes Gütekriterium für das Zusammenwirken von Oberleitung und Stromabnehmer ist, kommt ihr eine große Bedeutung zu. Sie wird von der Konstruktion des Oberleitungskettenwerkes und des Stromabnehmers sowie von der Fahrgeschwindigkeit bestimmt.

### **2.3 Mechanischer Verschleiß**

Aufgrund der Relativbewegung der Kontaktflächen zueinander kommt es zur Reibung und mechanischem Verschleiß (Abbildung 2). Unter Reibung versteht man:

- Abrasion, aufgrund von Oberflächen unterschiedlicher Härte,
- Oberflächenzerrüttung, durch Überlagerung von Normal- und Tangentialbeanspruchungen,
- Adhäsion, infolge lokaler Pressungen,
- elastische und plastische Deformationen.

Die Reibungsmechanismen haben die Erwärmung des Kontaktbereiches und mechanischen Verschleiß zur Folge.

Die Reibung und der mechanische Verschleiß werden von der Kontaktkraft, der Kontaktfläche mit ihrer Oberflächenbeschaffenheit und der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Bei der Kontaktierung eines Kupferfahrdrabtes mit einer Kohleschleifleiste müssen selbstverständlich die Zusammensetzung, die Struktur und die Stärke der Patina und die kristalline Struktur der Kohle berücksichtigt werden. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die sogenannte Stromschmierung. Dabei handelt es sich aber um einen irreführenden Begriff, denn der elektrische Strom kann niemals schmieren. Er bewirkt aber einen Anstieg der Temperatur im Kontaktbereich. Damit verbessern sich die Gleiteigenschaften der Materialpaarung durch

- eine Erhöhung der Gleitflächentemperatur,
- eine Veränderung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Kontaktmaterialien sowie
- eine Verringerung der Viskosität des permanent vorhanden Wasserfilms.

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Kohleschleifleisten der elektrische Verschleiß überwiegt. Das Verhältnis zwischen elektrischen und mechanischen Verschleiß wird mit 80 % zu 20 % angegeben [11].

### 3 Versuchsstand Fahrdraht – Schleifleiste

#### 3.1 Motivation

Messungen des Verschleißes unter Betriebsbedingungen sind nur sehr schwierig zu realisieren. Diese bis jetzt durchgeführten Untersuchungen lieferten keine befriedigenden Ergebnisse [6]. Auf dem von Adtranz, ehemals AEG Bahnfahrwegsysteme, entwickelter Versuchsstand wurden Verschleißmessungen mit der Zielstellung durchgeführt, möglichst in kurzer Zeit den Verschleiß des Fahrdrahtes unter verschiedenen Randbedingungen quantitativ zu beschreiben [1, 2, 3]. Diese Zielstellung machte es erforderlich, den zeitlichen Abstand zwischen den Schleifleistendurchgängen auf ein Minimum zu reduzieren. Damit ist es aber nicht mehr möglich, den Einfluss der Fahrdrahtpatina zu berücksichtigen.

Die Abbildung 2 zeigt sehr deutlich die zentrale Bedeutung des Kontaktwiderstandes auf den elektrischen Verschleiß. Ist dieser unter bestimmten Randbedingungen bekannt, können Aussagen zur Stromwärme und unter bestimmten Annahmen auch zur Erwärmung des Kontaktbereiches getroffen werden. Eine Hürde stellt allerdings der Zusammenhang zwischen Erwärmung und elektrischen Verschleiß dar. Der mechanische Verschleiß soll als ein Extrakapitel betrachtet werden. Er ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

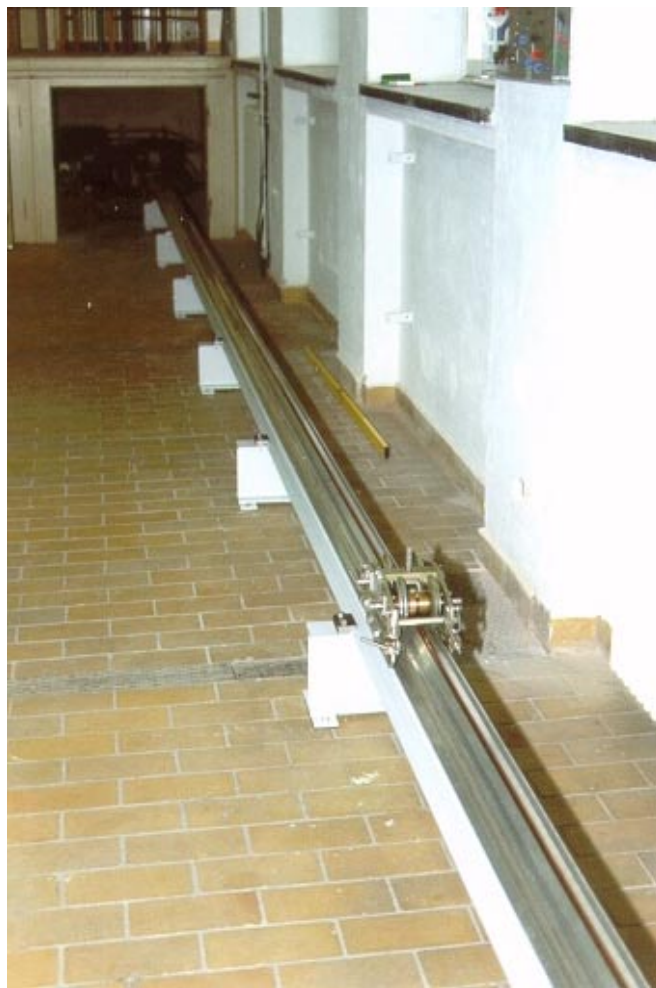
**Tabelle 1:** Veränderliche Parameter des Versuchsstandes.

Parameter	Wertbereich
Kontaktpaarung	Material / Verschleißgrad
Stromart	DC, AC 16 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> Hz, AC 50 Hz
Stromstärke	0 ... 500 A
Kontaktkraft	20 ... 200 N
Fahrgeschwindigkeit	0 ... 10 m/s
Fahrdraht-Temperatur	20 ... 80°C (optional)

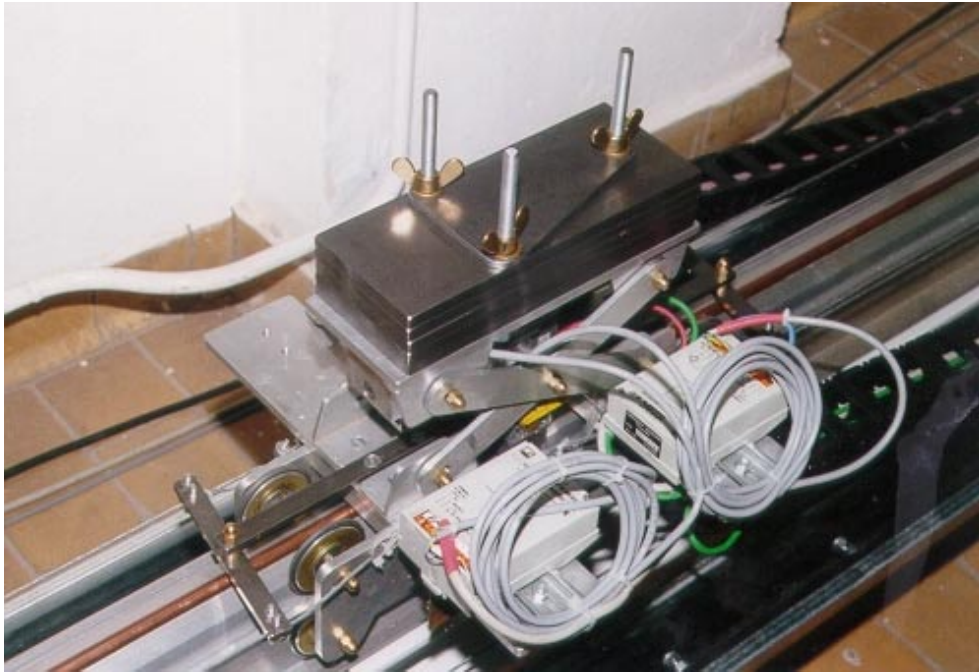
Die Schwierigkeiten bei der Messung des Verschleißes und die oben genannten grundsätzlichen Zusammenhänge bildeten den Ausgangspunkt zur Errichtung eines Versuchsstandes, mit dem der Kontaktwiderstand zwischen Fahrdraht und Schleifleiste unter verschiedenen Randbedingungen bestimmt werden kann (Tabelle 1). So ist es möglich, unterschiedliche Kontaktpaarungen einerseits hinsichtlich der Kontaktmaterialien und andererseits in Bezug verschiedener Abnutzungsgrade zu untersuchen. Des weiteren kann der Versuchsstand mit Gleichstrom DC bzw. Wechselstrom AC 16 <sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz und AC 50 Hz gespeist werden. Die Stromstärke kann zwischen 0 und 500 A gewählt werden. Die minimale Kontaktkraft von ca. 20 N ist durch den Aufbau des Versuchsstandes begrenzt. Der Kontaktwiderstand kann sowohl im Stillstand als auch bei Fahrbewegung mit Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s ermittelt werden. Als Option ist noch eine Fahrdraht-Heizung vorgesehen, mit welcher der Fahrdraht auf seine maximal zulässige Betriebstemperatur von 80°C erwärmt werden kann. Bei der Konzeption des Versuchsstandes wurde auch darauf Wert gelegt, dass der zeitliche Abstand zwischen den Schleifleistendurchgängen variiert werden kann. Damit kann die Regeneration der Fahrdrahtpatina und deren Einfluss auf den Kontaktwiderstand berücksichtigt werden.

### 3.2 Aufbau des Versuchsstandes

Im Institut für Elektrische Verkehrssysteme der TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ wurde mit Unterstützung der Siemens AG, Transportation Systems, Electrification, Engineering TS EL EN 4 der Versuchsstand zur Messung des Kontaktwiderstandes zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste errichtet. Dieser Versuchsstand besteht im wesentlichen aus einer 12 m langen Stromschieneoberleitung mit eingeklemmtem Fahrdrabt (Abbildung 4). Auf dieser Stromschiene fährt ein Messwagen (Abbildung 5), der ein ca. 75 mm langes Stück Schleifleiste trägt. Fahrdrabt als auch Schleifleiste können ausgetauscht werden, so dass jede beliebige Kombination von Kontaktpaarungen nachgebildet werden kann. Das schließt auch Kombinationen von neuen als auch abgenutzten Fahrdrähten und Schleifleisten ein. Angetrieben wird dieser Wagen von einem Elektromotor in Verbindung mit einem Endlosseil. Die entsprechende Kontaktkraft wird mittels Gewichten in Form von Stahlplatten aufgebracht.



**Abbildung 4:** Versuchstand Fahrdraht – Schleifleiste, Stromschienenoberleitung



**Abbildung 5:** Versuchstand Fahrdraht – Schleifleiste, Messwagen

### 3.3 Gemessene Größen

Eine Übersicht mit allen gemessenen Größen und deren Anordnung zeigt die Abbildung 6. Die Umgebungsbedingungen Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte werden in unmittelbarer Nähe des Versuchstandes im Laborraum aufgenommen.

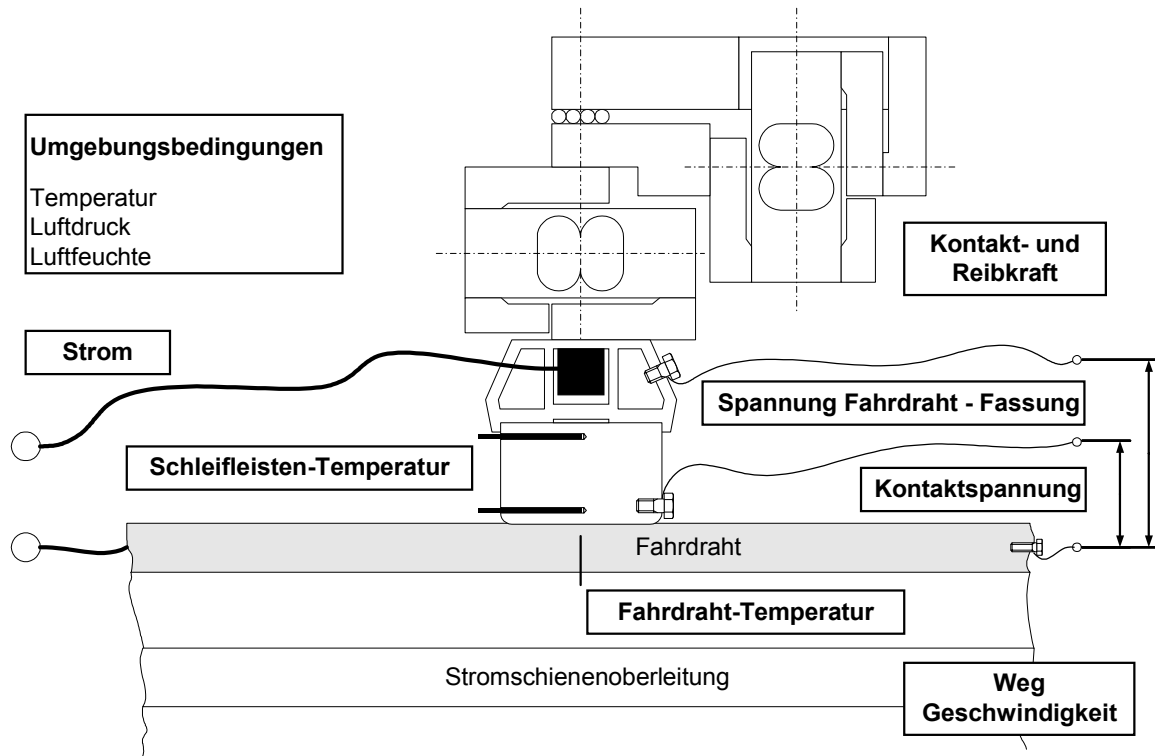
Die Temperatur wird sowohl im Fahrdraht als auch in der Schleifleiste erfasst. Die Messung im Fahrdraht erfolgt mit Temperaturfühlern NiCr-Ni Typ K. Diese Temperaturfühler wurden in Bohrungen eingeklebt, die an verschiedenen Stellen in den Fahrdraht angebracht wurden und sich 1 mm unterhalb der kontaktierten Oberfläche des Fahrdrahtes befinden.

Für die Messungen der Temperatur in der Schleifleiste wurden zwei Mantelthermoelemente NiCr-Ni vom Typ K verwendet. Dazu wurden Bohrungen von 1,2 mm Durchmesser längs zur Fahrriichtung in die Schleifleiste eingebracht, in welche das Thermoelement gesteckt wird. Das erste Thermoelement nimmt die Temperatur in unmittelbarer Nähe der Kontaktfläche auf. Mit dem zweiten wird die Temperatur des Kohlekörpers bestimmt.

Der Strom, der über den Kontakt Fahrdraht – Schleifleiste fließt, wird von einem Hochstromtransformator bereitgestellt. Er wird mit Hilfe eines Stromwandlers mit einem effektiven Primärnennstrom von 500 A gemessen.

An der Schleifleiste werden zwei Potenziale abgegriffen. Bezogen auf den Fahrdraht, der in diesem Versuchstand die Masse darstellt, ergeben sich daraus die Kontaktspannung und die

Spannung zwischen der Fassung der Schleifleiste und dem Fahrdraht. Letztere berücksichtigt den Ausbreitungswiderstand der Kohle.



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung der Messanordnung

Der Versuchsstand bietet die Möglichkeit, die senkrecht auf den Kontakt wirkende Kraftkomponente – im weiteren Verlauf als Kontaktkraft bezeichnet – und die in Bewegungsrichtung wirkende Kraftkomponente – die Reibkraft – aufzunehmen. Beide Kräfte werden mit Kraftaufnehmern mit einer Nennkraft von 200 N gemessen.

Zur Bestimmung des Weges und der Fahrgeschwindigkeit wird ein Drehimpulsgeber genutzt. Er misst die Drehzahl der Umlenkrolle der Zugseile, woraus online der Weg und die Geschwindigkeit ermittelt werden.

Die Messstrecke, auf welcher die entsprechenden Größen während der Messfahrt gemessen wurden, ist 2m lang. Die restliche Strecke wird zum Beschleunigen und Bremsen des Messwagens benötigt. Die Messstrecke kann somit mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden.

Alle Messsignale werden von dem Messsystem  $\mu$ -Musics aufgenommen, vorverarbeitet und gespeichert. Die Auswertung der Messwerte erfolgt mit dem Datenanalyseprogramm FAMOS.

## 4 Messungen des Kontaktwiderstandes

### 4.1 Verwendeter Fahrdraht und benutzte Schleifleisten-Stücken

Für alle Messungen wurde ein neuer Fahrdraht Ri 107 verwendet. Er besteht aus Elektrolyt-Kupfer, welches einen spezifischen elektrischen Widerstand von  $1,777 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  besitzt. Für die Messungen standen mehrere Stücken neuer und betrieblich abgenutzter DB-Einheitsschleifleisten zur Verfügung. Diese Schleifleisten besteht aus Kohlenstoff-Graphit (Hartkohle) und sind 35 mm breit. Die Tabellen 2 und 3 enthalten eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Kontaktmaterialien.

**Tabelle 2:** Verwendeter Fahrdraht [9].

Material	Kurzbezeichnung	Zustand	Spez. elektrischer Widerstand
Elektrolytkupfer	Ri 107	neu	$1,777 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$

**Tabelle 3:** Benutzte Schleifleisten [10].

Material	Kurzbezeichnung	Zustand	Spez. elektrischer Widerstand
Hartkohlenstoff	PT 5082	abgenutzt	$< 4,0 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$
Kohlenstoff-Graphit	SKT BH 424	neu, abgenutzt	$3,5 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$
Kohlenstoff-Graphit, metallimprägniert	SKT BH 424 C	neu	$0,3 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$

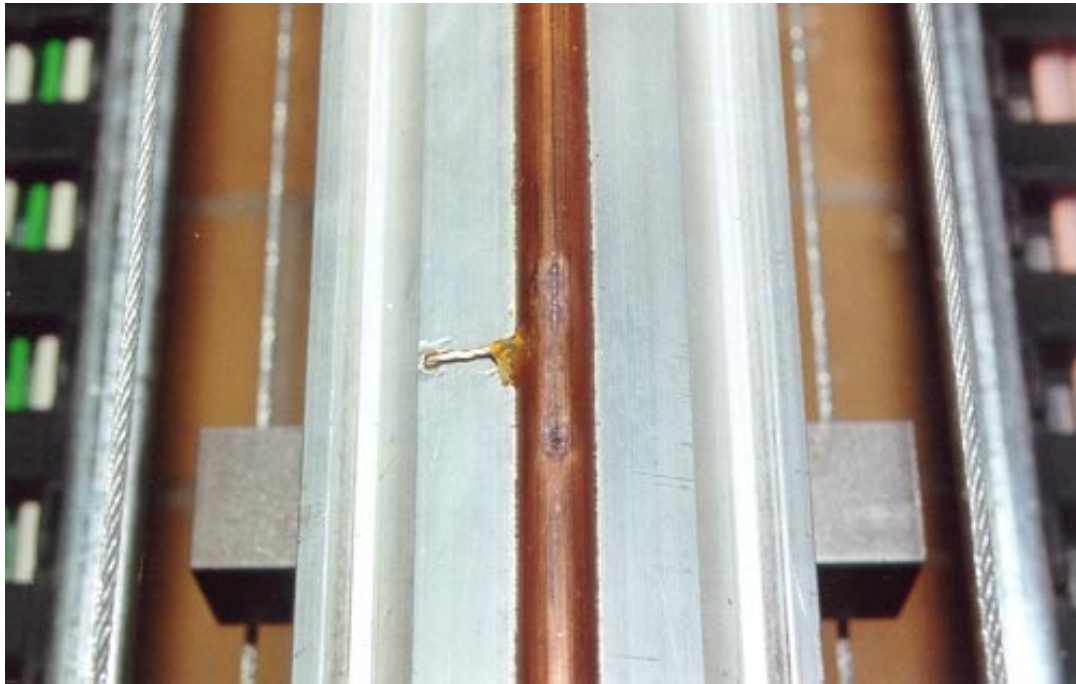
PT – SGL PanTrac

SKT – Schunk Kohlenstofftechnik GmbH

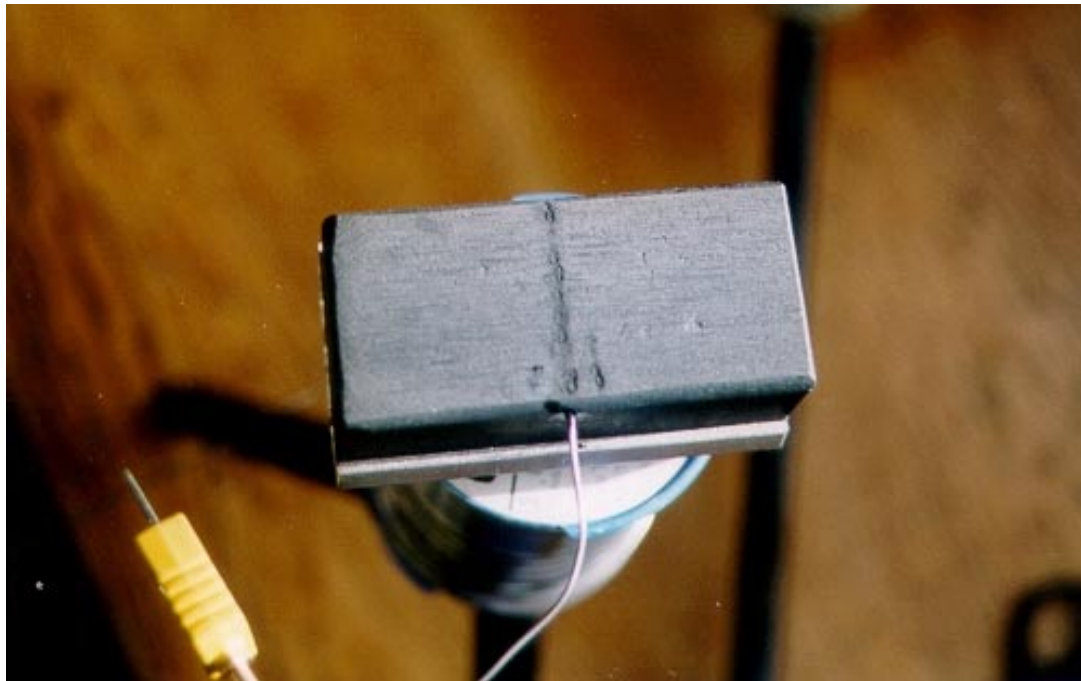
### 4.2 Beanspruchung der Kontakte während der Messungen

Eine Extrembeanspruchung stellt die Kontaktierung im Stillstand dar, da es dabei zu keinem Wechsel der Kontaktflächen sowohl beim Fahrdraht als auch bei der Schleifleiste aufgrund der Fahrbewegung kommt. Ist in diesem Fall auch noch die Kontaktkraft klein (hier ca. 20 N), erwärmt sich der Kontakt aufgrund der relativ kleinen wahren Kontaktfläche am stärksten. Dabei beträgt die maximale Stromstärke 75 A. Überschreitet der Strom diesen Grenzwert, kommt es bei einer Dauerbelastung zu einer Erwärmung des Fahrdrahtes über den zulässigen Maximalwert von 80°C.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den Fahrdraht und ein Schleifleistenstück nach 10 Messungen mit den oben genannten Randbedingungen.



**Abbildung 7:** Fahrdraht nach mehreren Messungen im Stillstand.



**Abbildung 8:** Schleifleiste nach zehn Messungen a 15 min im Stillstand,  $F_K = 20 \text{ N}$ ,  $I = 75 \text{ A}$ .

### 4.3 Auswertung der Messungen

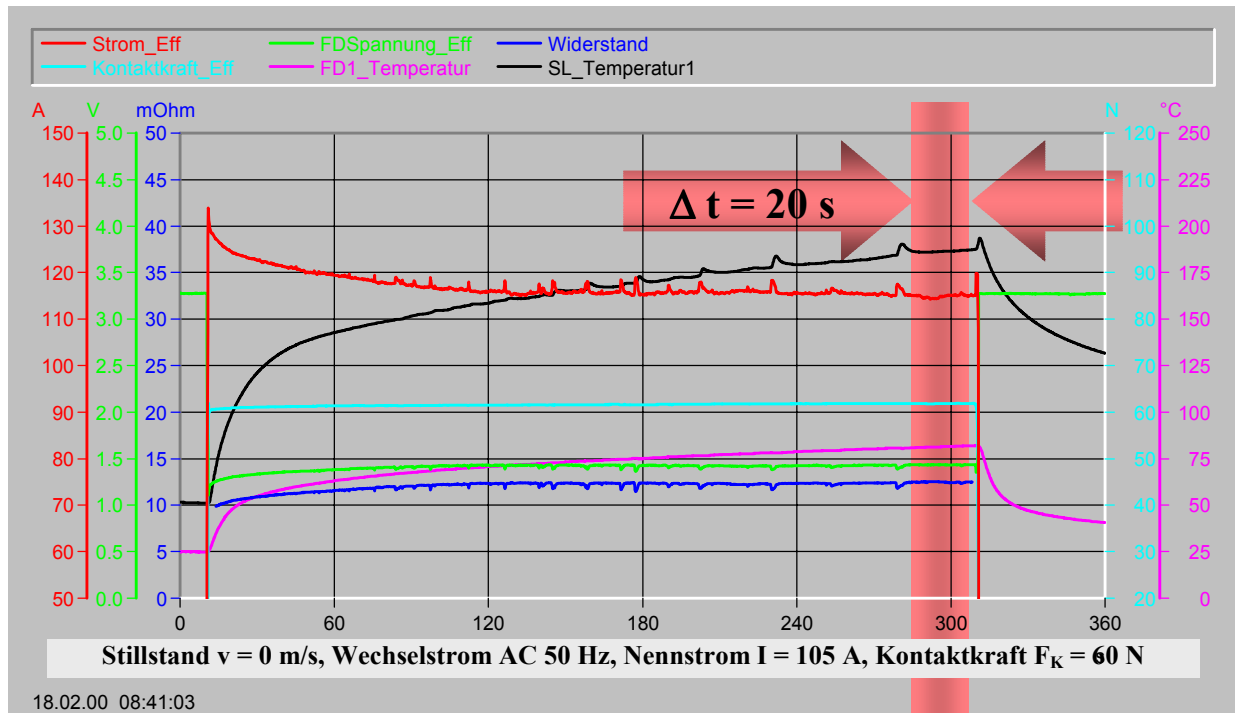


Abbildung 9: Auswertung der zeitlichen Verläufe einer Messung im Stillstand

Eine Messung im Stillstand dauerte 300 s. In einer Reihe von Vorversuchen konnte nachgewiesen werden, dass sich am Ende dieser Zeit sich die zeitlichen Verläufe, insbesondere des Kontaktwiderstandes und des Kontaktstromes, stabilisiert haben. Damit ist in diesem Bereich eine Auswertung in einem 20-s-Fenster möglich. In diesem Zeitfenster wurden die arithmetischen Mittelwert:

- des Kontaktwiderstandes,
- des Effektivwertes des Kontaktstromes,
- des Effektivwertes der Kontaktspannung,
- der Kontaktkraft,
- der Schleifleisten- und Fahrdrabttemperatur.

Die Messung bei Fahrt wurden während der Zeit ausgewertet, während sich der Messwagen mit konstanter Geschwindigkeit innerhalb der Messstrecke bewegte.

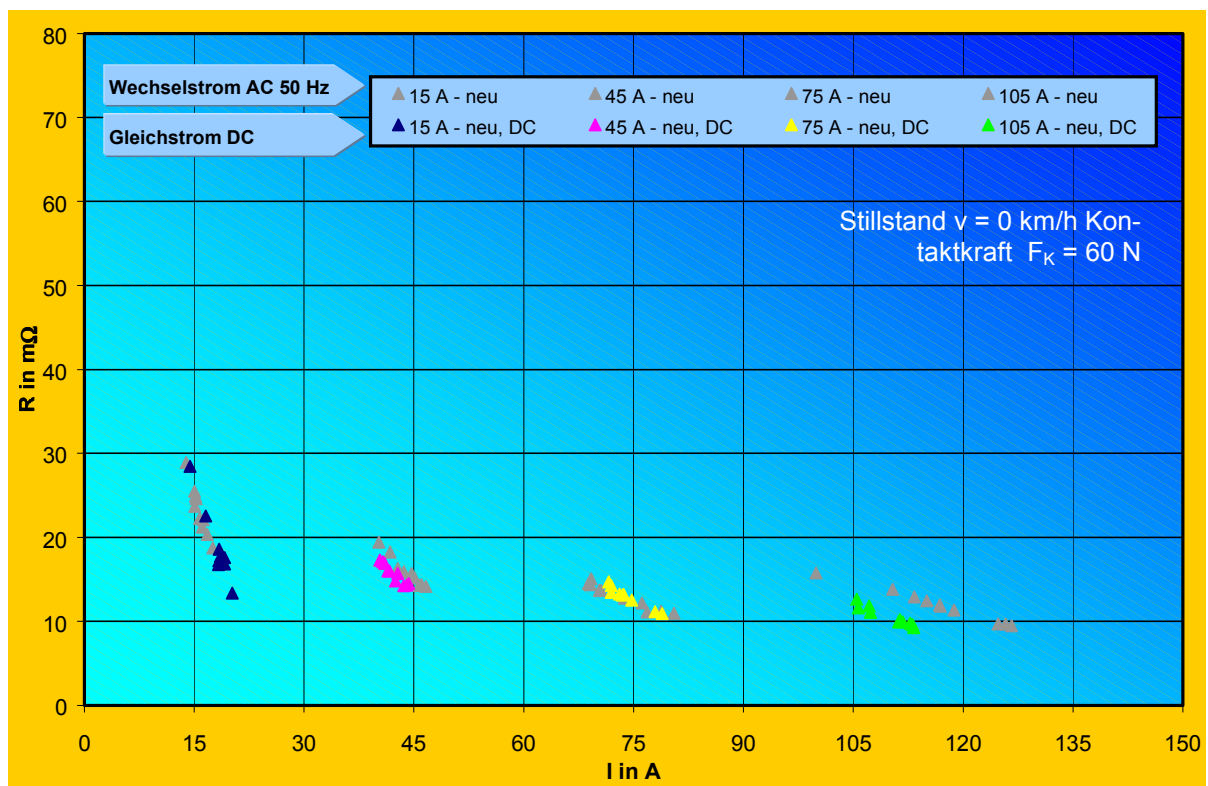
### 4.4 Ergebnisse der Messungen

Für die Kontaktkraft wurden die Werten 20 N, 60 N und 100 N gewählt. Die Kontaktkraft von 20 N entspricht der für einen Stromabnehmer mit zwei Schleifleiste geforderten fahrdynamischen Mindestanpresskraft von 40 N nach dem Merkblatt UIC 608 E nach [9].



Werten bei 60 N und 100 N sind nicht mehr so ausgeprägt wie zwischen 20 N und 60 N. Offensichtlich ist mit 60 N eine Kontaktkraft erreicht, die zur Ausbildung einer erforderlichen Kontaktfläche genügt.

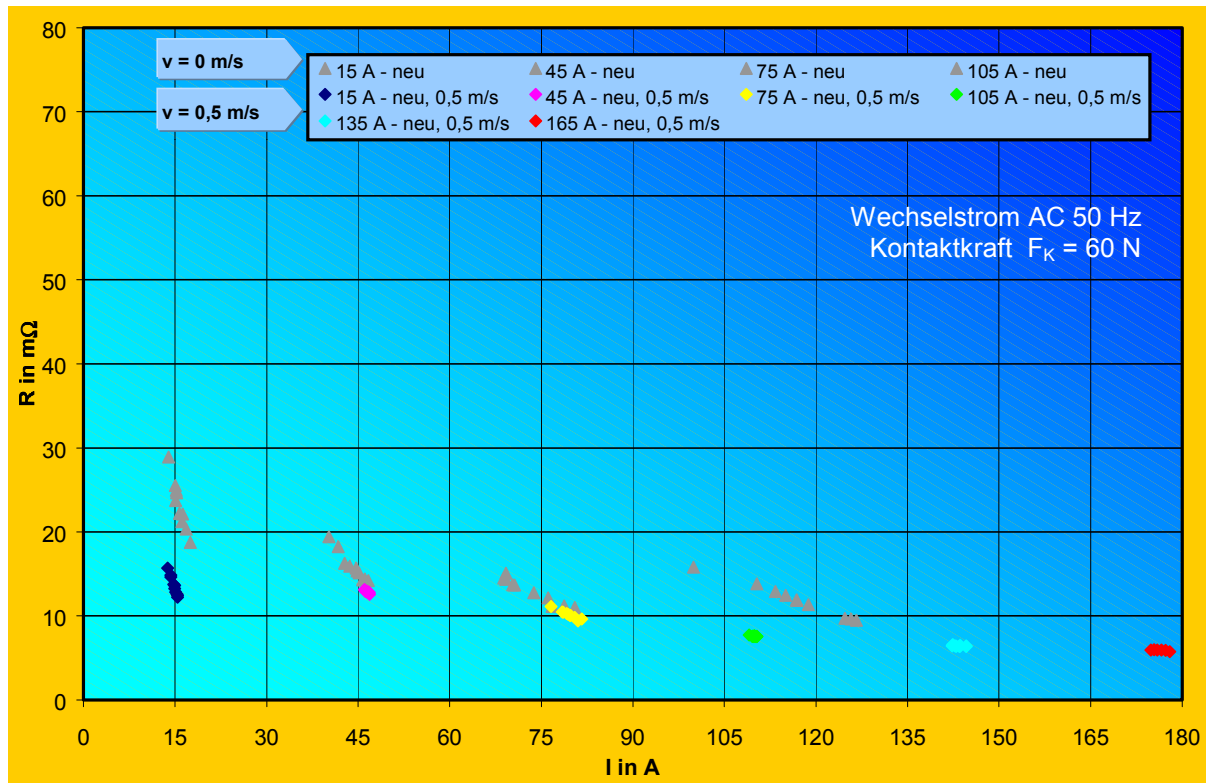
Vergleichbare Messungen wurden 1996 von der Slowakischen Bahn ZSR im Rahmen von Untersuchungen zu der Wechselwirkungen Stromabnehmer/Fahrdraht des Europäischen Instituts für Eisenbahnforschung ERRI durchgeführt. Im Gegensatz zu den hier vorgestellten Messungen wurden von der ZSR metallisierte Schleifleisten, sowohl neue als auch abgenutzte, verwendet. Die Kontaktkraft lag bei 25 N bzw. 27 N und als Kontaktstrom wurden 30 A gewählt. Für die gemessenen Kontaktwiderstände wurden Streubereiche mit Mittelwerten angegeben, die so in Abbildung 10 dargestellt sind. Es zeigt sich, dass beide Messungen in der gleichen Größenordnung liegen.



**Abbildung 11:** Kontaktwiderstand zwischen Fahrdraht Ri 107 und neuer Schleifleiste SKT BH 424 in Abhängigkeit vom Stromstärke und Stromart bei Stillstand  $v = 0$  m/s und einer Kontaktkraft 60 N [5]

Im nächsten Komplex soll der Einfluss der Stromart auf der Kontaktwiderstand gezeigt werden. Dazu wurden in Abbildung 11 die Messwerte für eine Kontaktkraft von 60 N und Wechselstromspeisung AC 50 Hz aus Abbildung 10 übernommen und grau gezeichnet. Farbig wurden der Kontaktwiderstand für Gleichstromspeisung DC und ebenfalls 60 N Kontaktkraft dargestellt. Unverändert blieben auch die anderen Parameter: Fahrdraht Ri 107, neue Schleifleiste SKT BH 424 und Stillstand  $v = 0$  m/s.

Es ist kein gravierender Unterschied bei den entsprechenden Strömen zwischen beide Stromarten festzustellen. Lediglich bei 105 A treten Differenzen beim Kontaktwiderstand auf, was auf die abweichenden Stromstärken zurückzuführen sind. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Stromart keinen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Kontaktwiderstandes besitzt.



**Abbildung 12:** Kontaktwiderstand zwischen Fahrdrabt Ri 107 und neuer Schleifleiste SKT BH 424 in Abhängigkeit vom Strom und Geschwindigkeit bei Wechselstrom AC 50 Hz und einer Kontaktkraft 60 N [5]

Einen weiteren Schwerpunkt der Messungen bildete die Untersuchung des Einflusses der Fahrgeschwindigkeit auf das Kontaktverhalten von Fahrdrabt und Schleifleiste. Im Vordergrund steht dabei die Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes im Stillstand und bei Bewegung. Deshalb wurde eine relativ geringe Fahrgeschwindigkeit von 0,5 m/s gewählt. Aber auch unter dem Gesichtspunkt, dass die Anfahrt eines Triebfahrzeuges eine Extrembelastung für den Kontakt Fahrdrabt – Schleifleiste darstellt, ist die Entscheidung für diese kleine Geschwindigkeit gerechtfertigt. Diese Fahrgeschwindigkeit von 0,5 m/s wurde während der Messung konstant gehalten, so dass der Messwagen 4 s benötigte, um die 2 m lange Messstrecke zu durchfahren. Es wurden wieder der Fahrdrabt Ri 107 und ein neues Schleifleistenstück SKT BH 424 verwendet. Der Kontakt wurde wieder mit Wechselspannung, deren Frequenz 50 Hz betrug, gespeist. Entsprechend der mittleren Anpresskraft für Stromabnehmer von Wechselstrombahnen (120 N) wurde eine Kontaktkraft von 60 N für eine Schleifleiste

eingestellt. Analog zu den Messungen im Stillstand wurde der Strom beginnend mit 15 A in 30-A-Schritten pro Messreihe erhöht. Aufgrund der Bewegung und der daraus resultierenden geringeren thermischen Belastung des Fahrdrahtes, konnte ein Maximalwert des Stromes von 165 A erreicht werden.

Auch diese Messungen bestätigen, dass der Kontaktwiderstand mit steigendem Strom abnimmt. Bei größeren Strömen ist aber diese Abhängigkeit nicht mehr so ausgeprägt. Es ist zu vermuten, dass sich die Kennlinie des Kontaktwiderstandes mit diesen Parametern einem Grenzwert nähert, der im Bereich von 4 ... 5 m $\Omega$  liegt.

In Abbildung 12 ist der Vergleich mit den Kontaktwiderständen im Stillstand (grau), die mit den gleichen Kontaktmaterialien und ebenfalls mit einer Kontaktkraft von 60 N aufgenommen wurden, dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass bei gleichem Strom die Kontaktwiderstände bei Fahrbewegung kleiner sind als im Stillstand. Dafür können mehrere Gründe verantwortlich sein. Zum einen führt vermutlich die kürzere Beanspruchungsdauer und die damit verbundene geringere Erwärmung zur Veränderung des Kontaktwiderstandes. Zum anderen begünstigt auch die durch die Fahrbewegung entstehende Gleitreibung die Ausbildung der wahren mechanischen Berührungsfläche und damit der elektrischen Kontaktfläche. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die wahre Kontaktfläche viel kleiner ist als die scheinbare Kontaktfläche, die durch die Geometrie der Kontakte bestimmt ist.

Auffallend sind die geringen Schwankungen der Werte innerhalb einer Messreihe. Aufgrund der Bewegung variiert die Größe der Kontaktfläche von Messung zu Messung nur wenig.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Beschreibung des Verschleißverhaltens von Fahrdraht und Schleifleiste kommt dem Kontaktwiderstand, wie eingangs erläutert, eine große Bedeutung zu. Deshalb wurde mit den hier beschriebenen Versuchen das Ziel verfolgt, den Einfluss mehrerer unterschiedlicher Parameter auf diesen Widerstand zu bestimmen. Dazu wurden die Kontaktkraft, die Stromart und -stärke sowie die Fahrgeschwindigkeit variiert. Wie zu erwarten war, wird der Kontaktwiderstand bei einer Vergrößerung der Kontaktkraft kleiner. Ebenso führt die Nachbildung einer Fahrbewegung zur Abnahme des Kontaktwiderstandes. Außerdem nimmt dieser Widerstand generell mit steigendem Strom ab. Dagegen hat die Stromart, egal ob Wechselstrom AC 50 Hz oder Gleichstrom DC, keinen entscheidenden Einfluss auf die Größe des Kontaktwiderstandes. Bei diesen Versuchen spielt auch die Beanspruchungsdauer und die Regenerationszeit der Kontakte zwischen den Messungen eine wichtige Rolle.

Mit den durchgeführten Messungen kann aber nur ein Überblick über das prinzipielle Verhalten der oben genannten Einflussfaktoren gegeben werden. Weitere, gleichermaßen gravierende Parameter sind unterschiedliche Materialien und Ausführungen von Fahrdrähten und Schleifleisten sowie deren unterschiedliche Abnutzungsgrade. Die sich daraus ergebenden Kombinationen von Kontaktpaarungen wurden ebenso wenig untersucht wie der Einfluss eines vorgewärmten Fahrdrahtes. Denkbar wären in dieser Beziehung die Bestimmung des Kontaktwiderstandes kupferimprägnierter Kohleschleifleisten.

Ein weiteres zukünftiges Betätigungsfeld wurde hier nur angeschnitten: der Messung des Kontaktwiderstandes bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten. Durch die erstaunlich kleinen Schwankungen der Mittelwerte der Messungen sind sehr gute Voraussetzungen vorhanden, den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit zu bestimmen. Bei höheren Geschwindigkeiten verkürzt sich die Belastungsdauer, wodurch auch der Strom vergrößert werden kann. Jedoch soll hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass gerade die Messungen mit einer kleinen Fahrgeschwindigkeit einen sehr maßgeblichen Aussagewert besitzen, da die Anfahrt eines Triebfahrzeuges für die Beanspruchung des Kontaktes Fahrdraht – Schleifleiste entscheidend ist.

Aufgrund der Messungen an Fahrdraht und Schleifleiste auf dem Versuchsstand des Instituts für Elektrische Verkehrssysteme ist es möglich, Tendenzen zum elektrischen Verschleiß an Fahrdraht und Schleifleiste im ungestörten Betrieb (z.B. kein Bügelspringen, kein Raureif o.ä.) bei der Veränderung bestimmter Parameter anzugeben. So ist zu erwarten, dass eine Verringerung des Kontaktwiderstandes eine Abnahme der Erwärmung des Kontaktbereiches, die durch die Stromwärme hervorgerufen wird, zur Folge hat. Damit sind auch tendenzielle Aussagen zum elektrischen Verschleiß an Fahrdraht und Schleifleiste möglich.

Mit diesen Untersuchungen können dann Hypothesen zum Gesamtverschleiß an Fahrdraht und Schleifleiste im ungestörten Betrieb und damit zur erwarteten Lebensdauer gemacht werden.

## Literatur

- [1] Becker, K., U. Resch, A. Ruckwied, B.-W. Zweig, 1995, Hochgeschwindigkeitsfahrleitung – Ein Thema für die Forschung, *Eisenbahntechnische Rundschau* **44**(1-2), 64 – 71.
- [2] Becker, K., U. Resch, A. Ruckwied, B.-W. Zweig, 1996, Das Verschleißverhalten der Regeloberleitung Re 250 unter den Bedingungen des Hochgeschwindigkeits-Schienenverkehrs, *ZEV+DET Glasers Annalen* **120**(6), 244 – 251.
- [3] Becker, K., U. Resch, A. Rukwied, B.-W. Zweig, 1996, Lebensdauermodellierung von Oberleitungen, *Elektrische Bahnen* **94**(11), 329 – 336.
- [4] Biesenack, H., A. Brodkorb & F. Pintscher, 1999, Einflussparameter auf das Verschleißverhalten von Fahrdrabt und Schleifleiste, *ZEV+DET Glasers Annalen* **123**(6), 245-252.
- [5] Biesenack, H. & F. Pintscher, 2000, *Messung des Kontaktwiderstand zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste* (TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Elektrische Verkehrssysteme, Dresden).
- [6] ERRI, 1996, *Wechselwirkung Stromabnehmer/Fahrleitung – Untersuchung zur technischen Kompatibilität der Schleifleisten und Fahrdrähte* (ERRI A 186/RP 4, Europäisches Institut für Eisenbahnforschung, Utrecht).
- [7] ERRI, 1996, *Wechselwirkung Stromabnehmer/Fahrleitung – Messung des Kontaktwiderstandes des Systems Fahrdrabt - Leiste* (ERRI A 186/RP 6, Europäisches Institut für Eisenbahnforschung, Utrecht).
- [8] Holm, R., 1941, *Die technische Physik der elektrischen Kontakte* (Springer, Berlin, 1. Aufl.).
- [9] Kießling, F. u.a., 1998, *Fahrleitungen elektrischer Bahnen – Planung, Berechnung, Ausführung* (Teubner, Stuttgart, Leipzig, 2. Aufl.).
- [10] Schunk, 1997, *Kohleschleifstücke für elektrische Triebfahrzeuge* (Geschäftsbereich 4, Industrie- und Bahntechnik, Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Giessen).
- [11] Wiessler, U., 1985, *Qualität und Ausführung von Kohleschleifstücken – 100 Jahre Stromabnahme vom Fahrdrabt mit Kohlenstoff – Rückschau und Ausblick* (Schunk-Bericht aus Forschung und Entwicklung, Nr. 39, Schunk Kohlenstofftechnik, Giessen).