

In Kraftfahrzeugen ist von jeher die Übertragung der Antriebsleistung von der Energiequelle auf die Antriebswelle eine große Herausforderung. Bei den Verbrennern ist die Übertragung des Motordrehmoments über Kupplung und Getriebe von zentraler Bedeutung für die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs. In modernen Elektrofahrzeugen wird die Energie von der Batterie zum E-Motor über das HV-Bordnetz verbunden. Hier liegt die Herausforderung im Leichtbau und der Sicherstellung der Spannungsfestigkeit. Wegen seines Gewichts müssen die Leitungsquerschnitte unter Berücksichtigung der maximalen Stromtragfähigkeit minimiert werden. Für diese Optimierungsmaßnahme ist die Kenntnis der maximalen lokalen Temperatur von zentraler Bedeutung, weil die Zuverlässigkeit der Komponenten untrennbar mit der lokalen Betriebstemperatur verknüpft ist.

Die Messung der Temperatur im Hotspot beginnt mit der Auswahl der Messmethode. **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht möglicher Messverfahren für die Temperaturmessung. In der Praxis hat sich hierzu der Einsatz von Thermoelementen wegen ihres Preises und ihrer einfachen und flexiblen Handhabung etabliert. Im nächsten Schritt muss der Ort des Hotspots ermittelt werden. Dieser lässt sich durch Thermographie an offengelegten Innenleitern oder mit Hilfe einer Systemsimulation ermitteln.

Zum Messen des Hotspots muss der Sensor an der heißesten Stelle angebracht werden. Ist das aufgrund konstruktiver Gegebenheiten nicht möglich, darf laut DIN EN 60512-5-2 der Sensor in der Nähe des Hotspots angebracht werden. Neben dem Messort hat auch die Einbaulage des Sensors einen Einfluss auf die gemessene Temperatur.

### Beurteilung typischer Messabweichung

Um diesen Einfluss der Sensoranordnung zu quantifizieren, wurde ein 3D-FE Modell aufgesetzt. Modelliert wurde hierzu eine 100 mm<sup>2</sup> Kupferschiene mit für die Temperaturmessung im HV-Stecker üblichen Anordnungen (Tabelle 2). Im Modell ist der temperaturabhängige elektrische Widerstand von Kupfer berücksichtigt. Natürliche



© Rosenberger Hochfrequenztechnik

## Exakte Temperaturmessung in HV-Steckverbindern

# Lösbare Herausforderung

Die Auslegung des Hochvolt-Bordnetzes ist erheblich für die Energieeffizienz von E-Fahrzeugen. Mit der Systemsimulation lassen sich Leiterquerschnitte im Bordnetz optimieren. Diese theoretische Auslegung muss im Realbetrieb abgesichert werden. Die Kombination aus Simulation und realem Versuch ist eine vielversprechende Lösung.

*Christian Dandl und Peter Schupfner*

Konvektion und Strahlung wurde auf Basis des VDI-Wärmeatlasses hinterlegt. Die Temperaturverteilung wurde mit 600 A für den stationären (**Bild 1**) und 800 A für den transienten Lastfall (**Bild 2**) berechnet.

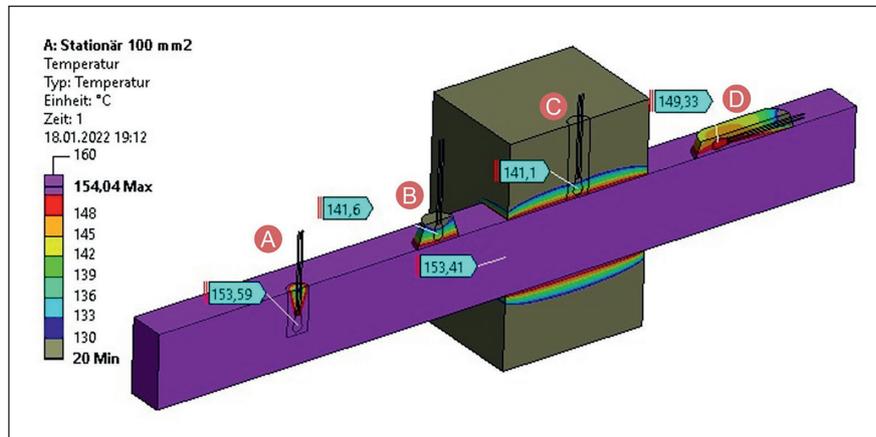
Die Temperaturverteilung im Sensorbereich offenbart die Sensitivität der Temperaturmessung in Bezug auf die

Sensoranordnung. Der Sensor in der Bohrung (A) misst die tatsächliche Schienentemperatur sehr genau. Die Messung mit den Anordnungen B und C führen zu einer um 10 °C zu niedrigeren Temperatur.

Der transiente Temperaturverlauf offenbart einen weiteren entscheidenden Faktor bei der Temperaturmessung. Die

durchgezogenen Linien zeigen den transienten Temperaturverlauf bei 800 A. Die Abweichung der Sensortemperatur zur Schienentemperatur ist gepunktet dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Abweichung zeigt, dass die Sensoranordnung einen erheblichen Einfluss auf die Ansprechzeit des Sensors hat. So zeigt die Sensoranordnung A nach 10 s die Temperatur mit einem Fehler von < 10 Prozent an, die Anordnung C hat selbst nach 600 s eine Abweichung von 15 Prozent zur tatsächlichen Schienentemperatur. Diese Verzögerung kann bei transienten Stromprofilen zur Fehleinschätzung der Stromtragfähigkeit einer Komponente führen.

Die theoretische Betrachtung der Sensoranordnung wurde für den beschriebenen Anwendungsfall mit Hilfe eines Laborversuches verifiziert. Hierzu wurde ebenfalls eine Kupferschiene mit 100 mm<sup>2</sup> Querschnitt mit den Sensor-



**Bild 1: Einfluss der Sensoreinbaulage auf die gemessene Temperatur bei 600 A Dauerstrom**

© Rosenberger Hochfrequenztechnik

anordnungen A, B, D präpariert. Dabei wurde auf einer Seite ein Thermoelement Typ K und auf der gegenüberliegenden Seite ein NTC-Sensor angebracht, um zusätzlich die Sensorart zu vergleichen. Die tatsächliche Schienen-

temperatur wird über einen Spannungsabgriff bestimmt.

In [1] wird dieser Versuch detailliert beschrieben und ausgewertet. Es wird gezeigt, dass die in der FE-Simulation beschriebenen Abweichungen in der Realität durch weitere Unsicherheiten, wie die verwendete Klebermenge am Sensor, noch überschritten werden. In dem in **Bild 3** gezeigten Versuch wurde eine Abweichung von bis zu 25 Prozent im Vergleich zur tatsächlichen Temperatur nachgewiesen.

**Auswirkung auf die Bordnetzauslegung**

Messabweichungen und Toleranzeinflüsse werden bei der Produktentwicklung mittels Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Diese Sicherheitsfaktoren führen zu einer geplanten Überdimensionierung, um die mögliche Überbelastung durch zum Beispiel eine ungenau bestimmte Messgröße abzusichern. Lässt sich die Messabweichung reduzieren oder auf den wahren Wert zurückgerechnen, so kann der Sicherheitsfaktor reduziert werden.

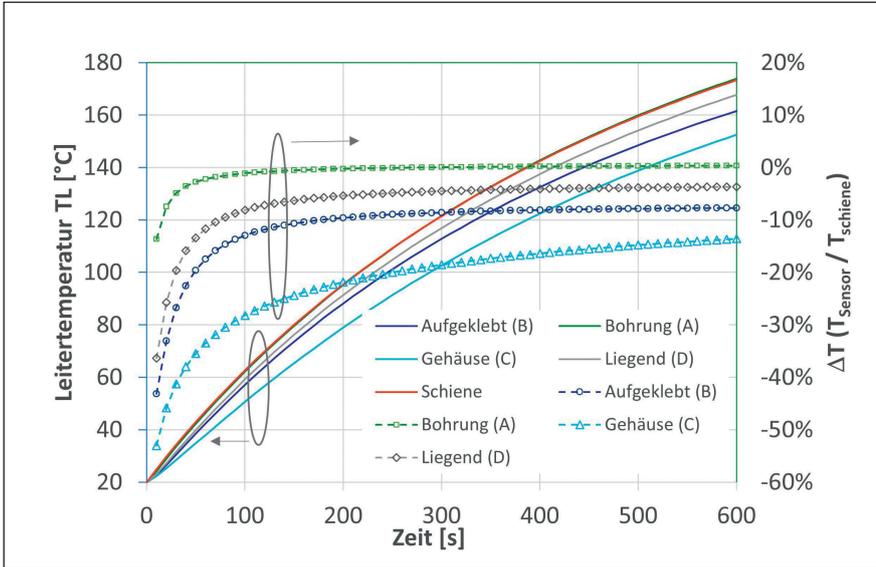
In **Bild 4** wird die Messsituation an einem realen Steckerbinder (Rosenberger HPK Winkelstecker) gezeigt. Die in Schwarz dargestellte Kurve verdeutlicht den Temperaturverlauf des Kupplerinnenleiters, der laut Hotspot-Analyse die bestmögliche Messposition für die Hotspot-Temperaturmessung darstellt. Gemessen ist diese Temperatur mit Methode A. Die violette Kurve zeigt den Temperaturverlauf, falls mit Methode C gemessen werden muss. Es ergibt sich eine Differenz von 6 K.

Sensortyp	Bemerkung
Mechanische Berührungsthermometer	Wärmeausdehnung unflexibel, träge
Thermoelemente	Seebeck-Effekt, Thermospannung, universell, einfach, günstig
Widerstandsthermometer	Temperaturabhängiger ohmscher Widerstand universell
Halbleiter-Sensor	Änderung des elektrischen Widerstands, NTCs weisen Drift auf
Silizium-Messwiderstände	Ausgeprägter positiver Temperaturkoeffizient, wenig verbreitet
Schwingquarz-Temperatursensor	Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz, wenig verbreitet
Rauschthermometer	Temperaturabhängigkeit der mittleren Elektronengeschwindigkeit in einem unbelasteten Widerstand, teuer, aufwändige Messung
Faseroptisches Temperaturmesssystem	Anti-Stokes-Anteil der Raman-Streuung
Faseroptisches Thermometer	Pulsförmige Anregung eines Kristalls, Einsatz bei hohen magnetischen Felder und im Ex-Bereich
Infrarot-Messtechnik, Pyrometer	Infrarotstrahlung, für schnelle Temperaturänderung
Wärmebildkamera	Infrarotstrahlung, ähnlich Pyrometer, lokale Temporauflösung möglich
Akustische Messverfahren	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls, für sehr hohe Temperaturen

**Tabelle 1: Übersicht Temperaturmessverfahren** © Rosenberger Hochfrequenztechnik

Methode	Anordnung	Abweichung $T_{\text{Sensor}} / T_{\text{Schiene}}$
A	Sensor in Bohrung	ca. null Prozent
B	Sensor auf Oberfläche, Abgang senkrecht	minus 8 Prozent
C	Sensor auf Oberfläche, Anbringung im Kunststoffgehäuse	minus 8 Prozent
D	Sensor auf Oberfläche, Abgang liegend	minus 3 Prozent

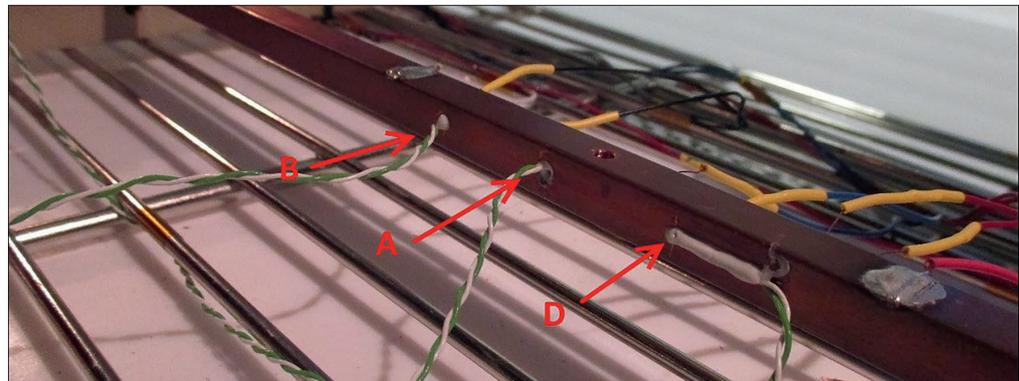
**Tabelle 2: Sensoranordnungen** © Rosenberger Hochfrequenztechnik



**Bild 2: Transienter Temperaturverlauf ab dem Einschaltvorgang bei 800 A**

© Rosenberger Hochfrequenztechnik

Die Messabweichung durch die Messmethode C kann mit Hilfe einer Systemsimulation nach der Vorgehensweise nach [2] festgestellt werden. Hierzu muss das Simulationsparameter mit 3D-FE-Analysen ermittelt werden und die so erstellte Systemsimulation mit der Labormessung abgeglichen werden. Ist der Abgleich erreicht kann die reale Leitertemperatur mit Hilfe der Simulation festgestellt werden. Dadurch lässt sich die Messabweichung infolge der Messmethode C vollständig zurückrechnen. Weiterhin erhält man durch dieses präzise Simulationsmodell die Möglichkeit, die Federtemperatur zu berechnen, was über die Messtechnik nicht mehr möglich ist. In Bild 4 ist die Federtemperatur in Grün dargestellt.



**Bild 3: Kupferschiene mit Sensoren, 100 mm² Schienenquerschnitt**

© Rosenberger Hochfrequenztechnik

Diese Kurve zeigt eine bis zu 8 K höhere Temperatur als der Innenleiter und folgt sehr dynamisch dem zu Grunde liegenden Stromprofil.

Um die Schwierigkeiten aus der Messtechnik zuverlässig kompensieren zu können, hat sich Rosenberger intensiv damit beschäftigt und diese Herangehensweise in ihrer hausinternen Norm verankert. [1] beschreibt hierzu die wesentlichen Rahmenbedingungen für ein zuverlässiges Simulationsmodell.

**Ausblick**

Die korrekte Messung von Temperaturen in Hochvoltsteckverbindern ist mitunter äußerst herausfordernd. Durch den gekoppelten Einsatz von Simulation und Messung lässt sich diese Herausforderung lösen. Durch konsequente Umsetzung dieser Herangehensweise unterstützt Rosen-

berger den Leichtbau in der Bordnetzentwicklung mit aktuellen HV-Produkten. ■ (eck)

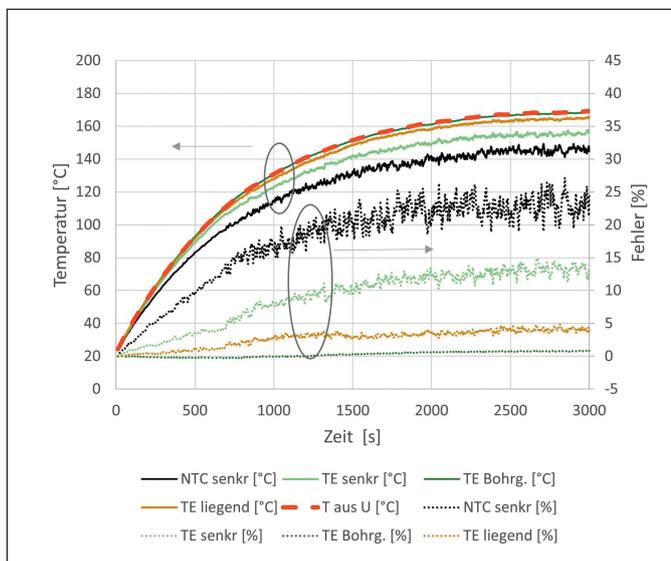
[www.rosenberger.de](http://www.rosenberger.de)

**Quellenverzeichnis**

- [1] C. Dandl, S. Thies, H. Edfelder, Vorteile der virtuellen Parameterbestimmung von Steckverbindern für die elektro-thermische HV-Bordnetzsimulation, 26. Fachtagung Albert-Keil-Seminar 20222
- [2] ZVEI Leitfaden TLF0101

**Bild 4: Transiente Mess- und Berechnungsergebnisse einer abgeglichenen Systemsimulation am Beispiel HPK Winkelstecker**

© Rosenberger Hochfrequenztechnik



**Christian Dandl** ist Leiter des Bereichs Mechanical Design bei Rosenberger Hochfrequenztechnik. © Rosenberger Hochfrequenztechnik



**Dipl.-Ing. Peter Schupfner** ist als Entwicklungsingenieur bei Rosenberger Hochfrequenztechnik tätig. © Rosenberger Hochfrequenztechnik