



Exakte Temperaturmessung in HV-Steckverbindern

Eine lösbbare Herausforderung

Die Auslegung des HV-Bordnetzes ist ein wesentlicher Teil für die Energieeffizienz moderner E-Fahrzeuge. Durch sein großes Gewicht bietet der Hochvolt (HV)-Kabelbaum ein großes Einsparpotential für den Leichtbau. Mit Hilfe der Systemsimulation, wie im Technischen Leitfaden TLF0101 des ZVEI beschrieben, können die Leiterquerschnitte im Bordnetz optimiert werden. Diese theoretische Auslegung muss im Realbetrieb abgesichert werden. Dies bringt die etablierte Temperaturmesstechnik an ihre Grenzen und rüttelt am Grundsatz „Im Labor liegt die Wahrheit“. Die Kombination aus Simulation und realem Versuch ist ein vielversprechender Lösungsansatz, der zudem die Möglichkeit eröffnet die etablierten Sicherheitsfaktoren neu zu bewerten.

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 E-Fahrzeugen 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 max. Stromtragfähigkeit minimiert werden. Für diese Optimierungsmaßnahme ist die Kenntnis der maximalen lokalen Temperatur von zentraler Bedeutung, da 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 die Verwendung von Thermoelementen wegen ihres Preises und ihrer einfachen und flexiblen Handhabung etabliert. Im nächsten Schritt muss der Ort des Hotspots ermittelt werden. Dieser kann durch Thermographie an offengelegten Innenleitern oder mit Hilfe einer Systemsimulation ermittelt werden.

Zum Messen des Hotspots muss der Sensor an der heißesten Stelle angebracht werden. Ist dies 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.

Tabelle 1 Übersicht Temperaturmessverfahren

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-Temperatursenor	Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz Wenig verbreitet
Rauschthermometer	Temperaturabhängigkeit der mittleren Elektronengeschwindigkeit in einem unbelasteten Widerstand Teuer, aufwändige Messung
Faseroptisches Temperatormesssystem	Anti-Stokes-Anteil der Raman-Streuung
Faseroptisches Thermometer	Pulsförmige Anregung eines Kristalls Einsatz bei hohen magnetischen Feldern und im Ex-Bereich
Infrarot-Mess-technik, Pyrometer	Infrarotstrahlung Für schnelle Temperaturänderung
Wärmebildkamera	Infrarotstrahlung Ähnlich Pyrometer, Lokale Temperaturauflösung möglich
Akustische Messverfahren	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls Für sehr hohe Temperaturen

Beurteilung typischer Messabweichung

Um diesen Einfluss der Sensoranordnung zu quantifizieren, wurde ein 3D-FE Modell aufgesetzt. Modelliert wurde hierzu eine 100 mm² Kupferschiene mit für die Temperaturmessung im HV-Stecker üblichen Anordnungen (siehe Tabelle 2). Im Modell ist der temperaturabhängige elektrische Widerstand von Kupfer berücksichtigt. Natürliche Konvektion und Strahlung wurde auf Basis des VDI-Wärmeatlasses hinterlegt. Die Temperaturverteilung wurde mit 600 A für den stationären (Abbildung 1) und 800 A für den transienten Lastfall (Abbildung 2) berechnet.

Tabelle 2 Sensoranordnungen

Methode	Anordnung	Abweichung $\frac{T_{\text{Sensor}}}{T_{\text{Schiene}}}$
A	Sensor in Bohrung	ca. 0 %
B	Sensor auf Oberfläche, Abgang senkrecht	-8 %
C	Sensor auf Oberfläche, Anbringung im Kunststoffgehäuse	-8 %
D	Sensor auf Oberfläche, Abgang liegend	-3 %

Die Temperaturverteilung im Sensorbereich (Abbildung 1) 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 führt zu einem um 10 °C zu niedrigem Messwert.

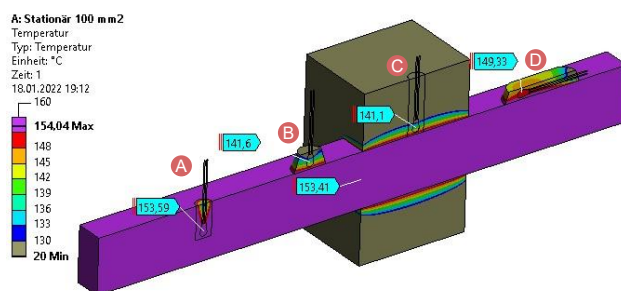


Abbildung 1 Einfluss der Sensoreinbaulage auf die gemessene Temperatur bei 600 A Dauerstrom

Der transiente Temperaturverlauf in Abbildung 2 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 % an, die Anordnung C hat selbst nach 600 s eine Abweichung von 15 % zur tatsächlichen Schienentemperatur. Diese Verzögerung kann bei transienten Stromprofilen zur Fehleinschätzung der Stromtragfähigkeit einer Komponente führen.

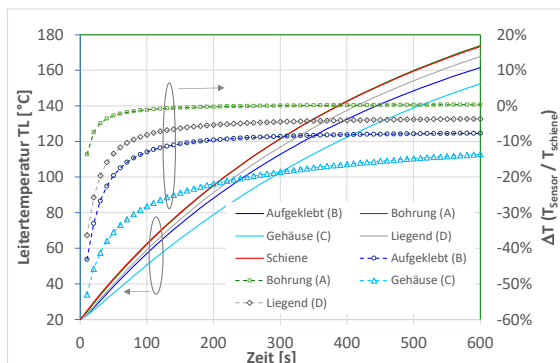


Abbildung 2 Transienter Temperaturverlauf ab dem Einschaltvorgang bei 800A

Die theoretische Betrachtung der Sensoranordnung wurde für den beschriebenen Anwendungsfall mit Hilfe eines Laborversuches verifiziert. Hierzu wurde ebenfalls eine Kupferschiene mit 100 mm² Querschnitt mit den Sensoranordnungen 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 Schienentemperatur wird über einen Spannungsabgriff bestimmt.

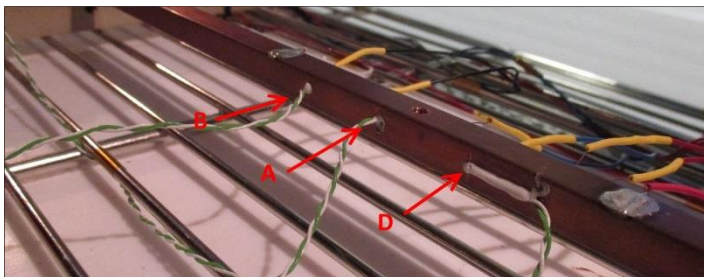


Abbildung 3 Kupferschiene mit Sensoren, 100 mm² Schienenquerschnitt

In [1] wird dieser Versuch detailliert beschrieben und ausgewertet. Die Autoren zeigen, 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

Abbildung 3 gezeigten Versuch wurde eine Abweichung von bis zu 25% gegenüber der 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 z. B. eine ungenau bestimmte Messgröße abzusichern. Kann die Messabweichung reduziert oder auf den wahren Wert zurückgerechnet werden, so kann der Sicherheitsfaktor reduziert werden.

In Abbildung 4 wird die Messsituation an einem realen Steckerbinder (Rosenberger HPK Winkelstecker) gezeigt. Die in Schwarz dargestellte Kurve zeigt 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. 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 (Abbildung 4, Simulation vs. Kuppler-IL), kann die reale Leitertemperatur mit Hilfe der Simulation festgestellt werden. Dadurch kann die Messabweichung infolge der Messmethode C vollständig zurückgerechnet werden. Weiterhin erhält durch dieses präzise Simulationsmodell die Möglichkeit, die Federtemperatur zu berechnen, was über die Messtechnik nicht mehr möglich ist. In Abbildung 4 ist die Federtemperatur in Grün dargestellt. Diese Kurve zeigt eine bis zu 8 K höhere Temperatur als der Innenleiter und folgt sehr dynamisch dem zu Grunde liegenden Stromprofil.

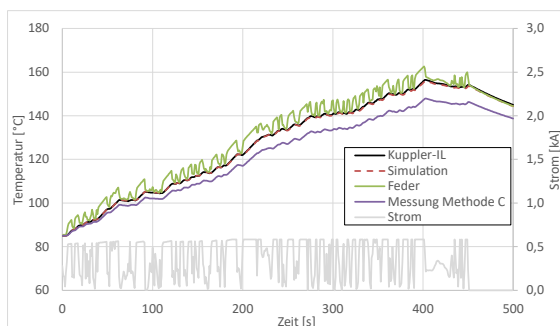


Abbildung 4 Transiente Mess- und Berechnungsergebnisse einer abgeglichenen Systemsimulation am Beispiel HPK Winkelstecker

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.

Zusammenfassung und Ausblick

Die korrekte Messung von Temperaturen in Hochvoltsteckverbindern ist mitunter sehr herausfordernd. Durch den gekoppelten Einsatz von Simulation und Messung kann diese Herausforderung gelöst werden. Durch konsequente Umsetzung dieser Herangehensweise unterstützen wir den Leichtbau in der Bordnetzentwicklung mit den aktuellen HV-Produkten aus dem Hause Rosenberger. Diese Produkte bieten die geforderte Performance mit optimierten Querschnitten bei unverändert hoher Zuverlässigkeit.

QUELLEN

[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

AUTOREN



Christian Dandl
R&D Mechanical Design
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG



Peter Schupfner
R&D Thermal Design
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG