

Elektro-thermische Simulation der Strombelastbarkeit eines Steckverbinders für Hochvolt-Anwendungen

Einleitung

Die Reichweite und der Kaufpreis moderner Elektrofahrzeuge wird maßgeblich von der Leistungsfähigkeit des Elektroantriebs und der verbauten Hochvolt (HV)-Komponenten bestimmt [1]. Die Dimensionierung der Komponenten erfolgt dabei maßgeblich anhand ihrer Strombelastbarkeit, d. h. anhand der maximal tolerierbaren Erwärmung durch Joule'sche Wärme.

Die Firma induSim GmbH, Centrum für industrielle Simulationen, führt unter anderem Dienstleistungsprojekte für Strömungssimulationen (CFD) durch. Dazu gehört auch die Untersuchung des Wärmeflusses in Festkörpern. In einem Berechnungsprojekt mit der Firma Auto-Kabel wurde ein HV-Steckverbinder, Abb. 1, mittels elektro-thermischer Simulation auf seine Strombelastbarkeit hin untersucht. Im Stecker werden Kontaktwiderstände sowie mögliche Alterungseffekte berücksichtigt. Die Belastung ist durch ein transientes Stromprofil von mehreren Hundert Ampere gegeben.

Der Stecker wird nicht isoliert betrachtet, sondern im Verbund mit weiteren Teilen in einer Prüfumgebung. Hierfür kam die MSC-Simulationssoftware scSTREAM [2] zum Einsatz.



Abb. 1: Steckverbinder der Firma Auto-Kabel

Vorgehensweise

Randbedingungen

In der zu simulierenden Prüfumgebung ist der Stecker mit einem 1,5 m langem Litzenleiter verbunden und auf eine lange Busbar geschraubt. Als Umgebungstemperatur herrschen 60°C.

Die stromführenden Teile werden als Leiter definiert und mit einem temperaturabhängigen Widerstand versehen. Zu Reduktion des Rechenaufwands wird auf die Modellierung der Luftströmung verzichtet und stattdessen an der Oberfläche ein fester Wärmeübergangskoeffizient vorgegeben. Von Litzenleiter und Busbar wird lediglich ein etwa 10 cm langes Teilstück mit simuliert und am freien Ende mit einer Temperaturrandbedingung versehen. Die hierfür notwendigen transienten Temperaturprofile werden vorab analytisch bestimmt.

Modellaufbau in scSTREAM

In konventionellen FEM/CFD-Tools nehmen die Arbeitsschritte Geometriaufbereitung/-vereinfachung einen bedeutenden Teil der Projektlaufzeit in Anspruch. Der Verbinder, vgl. Abb. 1, besteht aus etwa 90 Einzelteilen, welche eine komplexe und stellenweise sehr feingliedrige Geometrie aufweisen. Entscheidend für das Simulationsergebnis ist jedoch hauptsächlich eine ausreichende Auflösung der stromführenden Geometrieteile sowie die Zuweisung möglichst anwendungsnaher Materialeigenschaften. Der spezielle strukturierte kartesische Vernetzungsalgorithmus von scSTREAM verkürzt diesen Arbeitsschritt signifikant und führt schnell zu belastbaren Simulationsergebnissen.

Zusätzlich zu den bereits besprochenen Randbedingungen werden zwischen den einzelnen stromführenden Teilen Kontaktwiderstände definiert und anhand von Messwerten kalibriert.

Die Vorgabe eines festen Konvektionskoeffizienten an der Steckeroberfläche erlaubt es, die Zeitschrittweite der Simulation auf die zeitliche Auflösung des Stromprofils, in diesem Fall 0,1 s, zu vergrößern. Die Berechnung eines 100 s langen Aufwärmprozesses nimmt damit etwa 7 h auf einem 6-Kern-Rechner in Anspruch.

Ergebnisse

In einer stationären Voruntersuchung wird die Funktionsweise des Systems untersucht und die maximalen Temperaturen bei Dauerbelastung ermittelt.

Stationäre Voruntersuchung

Es wird der quadratische (RMS) Mittelwert des Stromprofils als konstante Strombedingung aufgeprägt. Als Temperaturrandbedingung werden an der Busbar 133 °C und aufseiten des Litzenleiters 164 °C vorgegeben. Die resultierende Temperaturverteilung in einer aufgeschnittenen Darstellung des Steckers zeigt Abb. 2. Innerhalb des Steckers stellt die Temperatur in den zentralen, stromführenden Teilen einen Ausgleich zwischen der „kalten“ Busbar (links) und dem heißen Litzenleiter (rechts) dar.

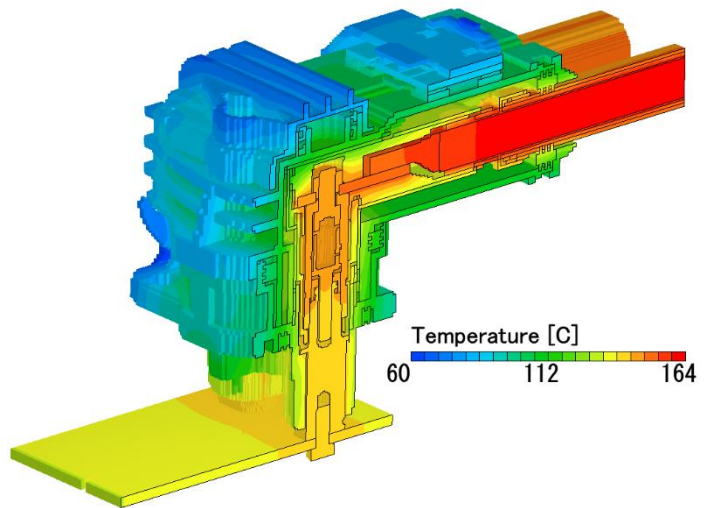


Abb. 2: Temperaturverteilung an und im Stecker bei stationärer Belastung mit Strommittelwert

Die Erklärung für diese hohe Strombelastbarkeit liegt in der ausreichenden Dimensionierung der stromführenden Teile im Stecker. Abb. 3 zeigt die Stromdichte in dem in Abb. 2 sichtbaren Schnitt.

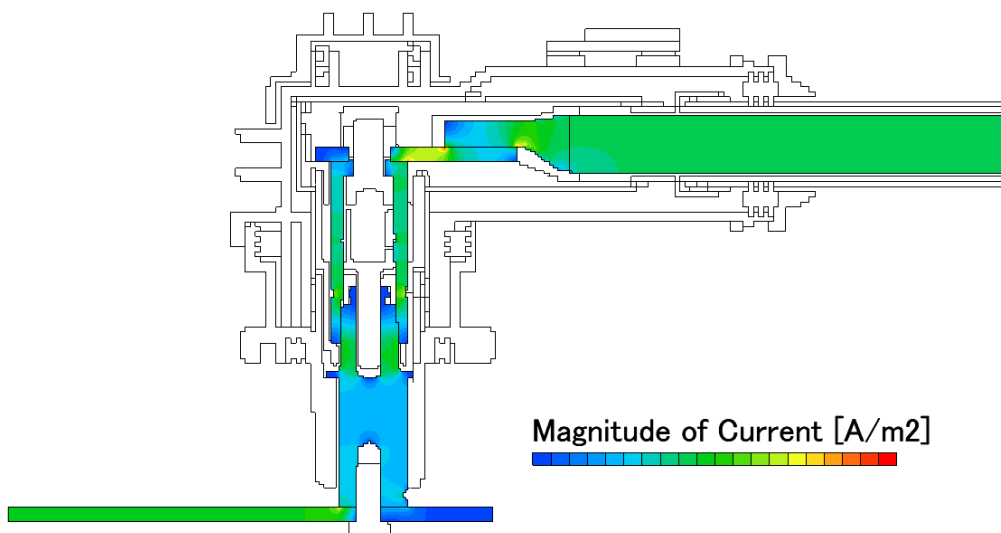


Abb. 3: Stromdichte in den stromführenden Teilen des Steckers bei stationärer Belastung mit dem Strommittelwert

In einem Großteil des Steckers liegt diese unterhalb der Stromdichte des Litzenleiters und der Busbar. Die übermäßige Wärme, die an einzelnen Stromdichten-Hotspots oder durch die Kontaktwiderstände entsteht, wird aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Kupfers in den Litzenleiter bzw. die Busbar abgeleitet.

Transiente Simulation mit Stromprofil

In der anschließenden transienten Simulation wird untersucht, ob kurzzeitige starke Strompeaks zu lokalen Übertemperaturen führen können. Abb. 4 zeigt den Aufwärmprozess während der ersten 100 s als Verlauf der Maximaltemperaturen in den einzelnen Steckerbauteilen. Zum Start der Simulation haben alle Komponenten die Umgebungstemperatur von 60 °C.

An der mit dem Kontaktwiderstand beaufschlagten Konusverbindung (Konushülse/Konuspin) zeigen sich nach länger anhaltenden Starkstromphasen minimale Überschinger in der Temperatur. Diese Wärme wird jedoch sehr schnell abgeführt. Generell bleiben die Maximaltemperaturen innerhalb des Steckers sichtbar unter den als Randbedingung vorgegebenen Temperaturen von Busbar und Litzenleiter.

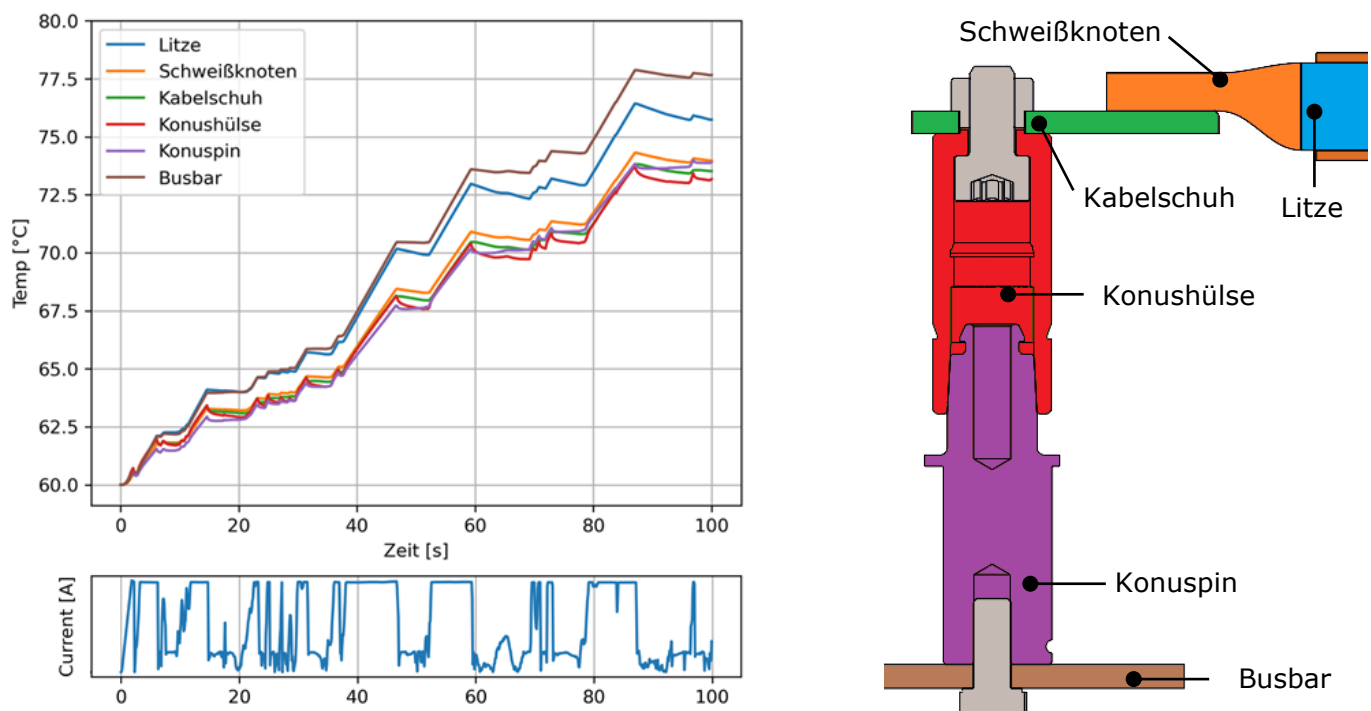


Abb. 4: Aufwärmprozess des Verbinders bei Belastung durch das transiente Stromprofil (links unten). Maximaltemperaturen in den einzelnen, rechts dargestellten Komponenten.

Zu Abschätzung eines Alterungseffektes wird der Übergangswiderstand an der Konusverbindungsstelle verdreifacht. In dieser Simulation verstärken sich die in Abb. 4 sichtbaren Überschinger, jedoch bleiben die Temperaturen unterhalb derer von Litzenleiter und Busbar.

Zusammenfassung

Ein neuartiger Steckverbinder für Hochvoltanwendungen wurde in einer elektro-thermischen Simulation hinsichtlich seiner Strombelastbarkeit untersucht. In einer stationären Voruntersuchung zeigte sich, dass der stromführende Querschnitt am Stecker ausreichend dimensioniert ist, um die Bildung von Temperatur-Hotspots zu vermeiden. Vielmehr stellte sich eine mittlere Temperatur zwischen den angrenzenden Komponenten Busbar und Litzenleiter ein. In einer transienten Untersuchung mit einem Stromprofil mit anhaltenden, ausgeprägten Stromspitzen konnte auch bei Annahme einer gealterten Kontaktstelle mit hohem Kontaktwiderstand keine gefährlich hohen Temperaturpeaks nachgewiesen werden. Eventuelle Wärme-Hotspots werden aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Kupfers schnell aus dem Stecker geleitet.

Die Simulationsergebnisse geben dem Kunden einen vertieften Einblick in die physikalischen Abläufe und verhelfen ihm damit zu einem besseren Systemverständnis. Durch den effizienten Simulationsansatz

lassen sich kritische Belastungsprofile schnell identifizieren und die Anzahl an teuren und aufwendigen Testreihen auf ein Minimum reduzieren.

Das verwendete Simulationswerkzeug scSTREAM zeigte seine Stärken in einer schnellen und problemlosen Vernetzung der komplexen Steckergeometrie. Der Anwender kann sich im Simulationsablauf daher voll auf die physikalischen Randbedingungen und die Auswertung der Simulationsergebnisse fokussieren.

Ausblick

Die Simulationsergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer Systembetrachtung in der Auslegung von HV-Bordnetzen. Entscheidend für die Temperaturverteilung im Stecker war im untersuchten Fall die Temperatur und daher die Dimensionierung der verbauten Nachbarkomponenten Busbar und Litzenleiter.

Unter Einbeziehung solcher Wärmepfade kann die Kühlfähigkeit von Leitungen und Komponenten mitberücksichtigt und Materialquerschnitte optimiert werden [3]. Eine Materialersparnis führt zu einer Kostensenkung durch Bauraum- und Gewichtsreduktionen.

Durch die CFD-Simulation mit transienten Stromprofilen können Verlustleistungen und Temperaturen orts aufgelöst analysiert werden. Die numerische Simulation erlaubt darüber hinaus auch die Berücksichtigung der Einbausituation mit Nachbarkomponenten sowie mögliche aktive oder passive Kühlelemente.

Zum Autor



Thomas Kächele (Jahrgang 1986) studierte an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik. Anschließend promovierte er an der Universität der Bundeswehr München zum Thema numerische Strömungssimulation an Flugzeugtriebwerken. Seit 2019 ist er Teil des induSim Teams und führt neben Simulationsdienstleistungen im Bereich FEM und CFD auch Weiterbildungen zu diversen Simulationsthemen durch.

Referenzen

- [1] [So lassen sich HV-Bordnetze nach ZVEI-Leitfaden thermisch optimieren](#). Erschienen auf: all-electronics.de abgerufen am 22.04.2021
- [2] Mehr Informationen zu scSTREAM unter <https://www.indusim.de/software/cae-werkzeuge-fuer-die-virtuelle-produktentwicklung/scstream/>
- [3] *Thermosimulationsmodelle*. Technischer Leitfaden 0101 Version 1.1, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, 2020.

induSim GmbH

Benzstraße 15
89129 Langenau

Tel: +49 7345 / 929287-0
Fax: +49 7345 / 929287-50
Mail: info@indusim.de



Ein Unternehmen der SimPlan Gruppe
www.SimPlan.de