

Thermische Testsimulation der CCS-Dose für große Ladeströme zur Überprüfung von Optimierungsansätzen

Dipl.-Ing. Jochen Krings, Daimler Truck AG
Abteilung: Charging Components E-Mobility DTB
jochen.krings@daimlertruck.com

Daimler Truck AG
Fasanenweg 10
70771 Leinfelden-Echterdingen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, Universität Stuttgart / FKFS Stuttgart
Leitung Vorstandsbereich Fahrzeugmechatronik
info@fkfs.de

FKFS (Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren) Stuttgart
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart

Dipl.-Ing. Peter Ziegler, Daimler Truck AG
Teamleitung: Charging Components E-Mobility DTB
peter.z.ziegler@daimlertruck.com

B. Eng. Paul Steinmetz, Daimler Truck AG
Abteilung: Charging Components E-Mobility DTB
paul.ps.steinmetz@daimlertruck.com

Daimler Truck AG
Fasanenweg 10
70771 Leinfelden-Echterdingen

1 Zusammenfassung

Der CCS Ladestandard stellt in Europa die am weitesten verbreitete Variante zum Laden von Elektrofahrzeugen dar. Durch die Weiterentwicklung der Ladekomponenten können Ladeleistungen erzielt werden, die die Grenzen des CCS Standards erreichen.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Ladeleistungen ist, den Zeitpunkt bis zum Erreichen der maximal zulässigen Grenztemperatur an der Ladedose möglichst lange hinauszuzögern, bevor infolgedessen der Ladestrom reduziert werden muß, um einer unzulässigen Überhitzung entgegenzuwirken.

In dieser Arbeit werden mittels einer eigens entwickelten thermischen Matlab/Simscape Testsimulationssoftware, die Konstruktionsansätze zur Bauteiloptimierung an der CCS-Ladedose im Vorfeld getestet und die Ergebnisse validiert.



Abbildung 1: links: Mercedes Benz eActros 600
rechts: Detailansicht CCS-Ladedose mit Ladepistole
Quelle: Daimler Truck

Die Gegenüberstellungen der thermischen Testergebnisse von der aktuellen CCS-Ladedose und der Version mit Optimierungsansätzen, zeigen eine langsamere Erwärmung.

Durch den langsameren Anstieg der Ladedosentemperatur beim Laden mit hohen Strömen, kann dieser Strom über einen längeren Zeitraum gehalten werden, bevor die zulässige Grenztemperatur erreicht wird.

Die Testsimulationsergebnisse bestätigen somit die Ansätze der Konstruktionsoptimierung, die über einen längeren Zeitraum höhere Ladeströme ermöglicht. Die Anpassungen der Konstruktion können dazu beitragen die Ladezeit zu verringern.

2 Einleitung

Im Zuge der weltweiten Elektrifizierung des Automobilbereichs werden in den letzten Jahren auch vermehrt Nutzfahrzeuge mit elektrischen Antrieben entwickelt [1].

Im Vergleich zum Auto für den Individualverkehr, stellt im Nutzfahrzeugbereich insbesondere das schnelle Laden der großen Energiespeicher eine große Herausforderung dar [2]. Eine kurze Standzeit, durch schnelle Ladezeiten, ermöglicht eine schnellere Verfügbarkeit der Nutzfahrzeuge. Dies ist für die Wirtschaftlichkeit im Logistikbetrieb von großer Bedeutung [3].

Aufgrund der europaweiten Verbreitung von CCS (Combined Charging System) verwenden auch elektrifizierte Nutzfahrzeuge diesen Ladestandard.

Für eine schnelle Ladung der Energiespeicher über die CCS-Ladedose sind entsprechend hohe Ladeleistungen erforderlich, die mit hohen Ladeströmen einhergehen. Der Nutzfahrzeugbereich geht dabei an die Grenzen des CCS Normierungsstandards [4].

Einhergehend mit Ladeströmen von mehreren hundert Ampere und dem elektrischen Widerstand der Ladekomponenten entstehen auch Verluste in Form von Wärme. Zwecks Steigerung der Ladeeffizienz ist es prinzipiell erstrebenswert die gesamte Wärmeentwicklung möglichst gering zu halten. Neben der Einsparung von Energiekosten können auch fahrzeugseitig die Kühlkomponenten kleiner dimensioniert werden, was sich in einem leichteren Fahrzeuggewicht und damit in einem niedrigeren Energieverbrauch im Fahrbetrieb äußert [5].

Gleichzeitig führt ein geringerer und langsamerer Temperaturanstieg in den Ladekomponenten auch zu einer geringeren Materialspannung durch Temperaturdifferenzen, was die Langlebigkeit der Ladekomponenten begünstigt [6]. Ziel bei der Auslegung der Ladepfadkomponenten ist dabei immer, möglichst lange den maximal, zulässigen Ladestrom aufrecht zu halten und dabei den Temperaturgrenzwert von berührbaren Bauteilen, zum Schutz des Menschen, nicht zu überschreiten.

Um bereits frühzeitig in der Ladekomponentenentwicklung thermische Optimierungsansätze zu überprüfen, bieten sich thermische Simulationstests an. Durch das simulationsbasierte Testen der neuen Konstruktionsansätze zur Bauteiloptimierung können im Vorfeld die zu erwartenden Ergebnisse quantifiziert und im besten Fall Iterationsschleifen in der Bauteilentwicklung reduziert werden.

Im Folgenden wird ein thermischer Optimierungsansatz der CCS-Ladedose mittels Softwaresimulation getestet und die Ergebnisse vorgestellt.

3 Aufbau der CCS Ladedose

Der Aufbau einer CCS Ladedose ist in Abbildung 2 dargestellt.

Von der Ladestation über die Ladepistole kommend, wird der Strom über die Kontaktstifte ins Innere der Ladedose zur Verbindungsplatte geleitet. Diese ist über eine Schraubverbindung mit der Schiene für das Stromkabel verbunden. Die Temperaturüberwachung erfolgt separat für Plus und Minus über Sensoren, die sich jeweils zwischen den Kontaktstiften und den Verbindungsplatten befinden. Die Maximaltemperatur beträgt 90°C, laut DIN EN IEC 62196-1, [7].

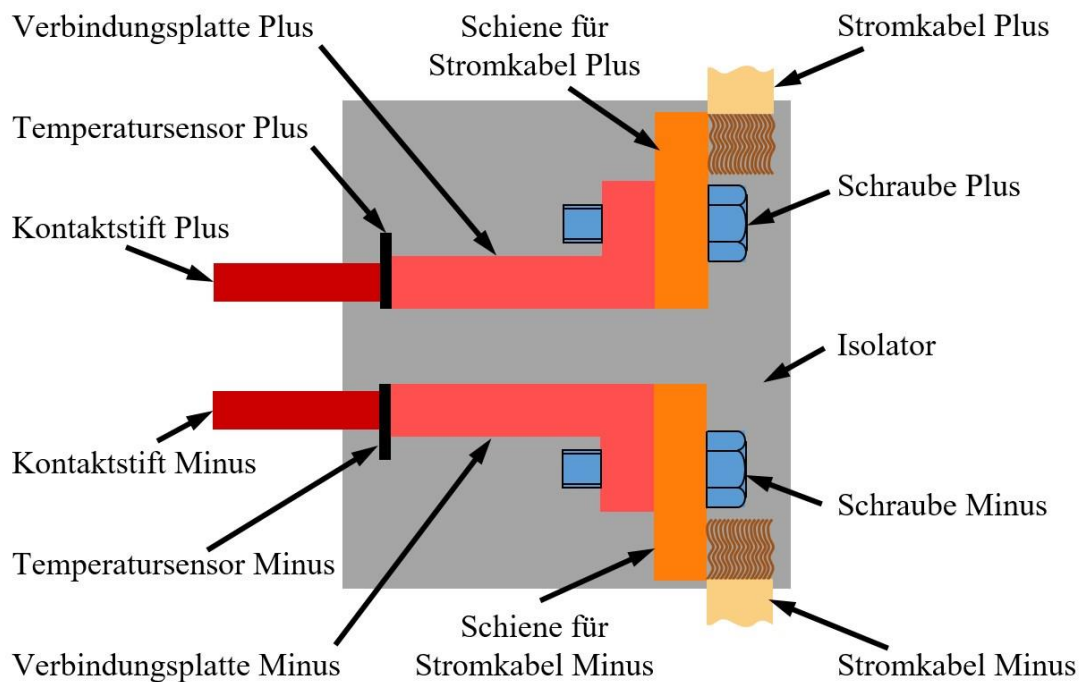


Abbildung 2: Schema innerer Aufbau CCS Ladedose
Quelle: Daimler Truck

4 Modellbildung und Simulationsaufbau

Aufgrund des elektrischen Widerstands von stromdurchflossenen Bauteilen kommt es zu inneren Verlusten, die zu einer Erwärmung führen [8]. Durch das Ohm'sche Gesetz Gl. (4.1), lassen sich mit der Spannung U , der Stromstärke I und dem elektrischen Widerstand $R_{\text{elektrisch}}$, die elektrische Leistung $P_{\text{elektrisch}}$ durch Gl. (4.2) beschrieben. Analog zur elektrischen Leistung lässt sich die Joule'sche Erwärmung $P_{\text{thermisch}}$, beziehungsweise der entstehende Wärmestrom \dot{Q} , durch Gl. (4.3) beschreiben:

$$\text{Ohm'sche Gesetz:} \quad U = I * R_{\text{elektrisch}} \quad (4.1)$$

$$\text{Elektrische Leistung:} \quad P_{\text{elektrisch}} = I * U = I^2 * R_{\text{elektrisch}} \quad (4.2)$$

$$\text{Joule'sche Erwärmung:} \quad P_{\text{thermisch}} = \dot{Q} = I^2 * R_{\text{thermisch}} \quad (4.3)$$

Der thermische Widerstand $R_{\text{thermisch}}$ wird in Gl. (4.4) [9] durch die Länge l des Bauteils, die Wärmeleitfähigkeit λ als Materialeigenschaft und die Bauteilquerschnittsfläche A beschrieben:

Thermischer Widerstand:
$$R_{\text{thermisch}} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (4.4)$$

Anhand des „Technischen Leitfaden Thermosimulationsmodelle“ des ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie) lassen sich die Kopplung von elektro-thermischen Simulationen wie folgt darstellen [10]:

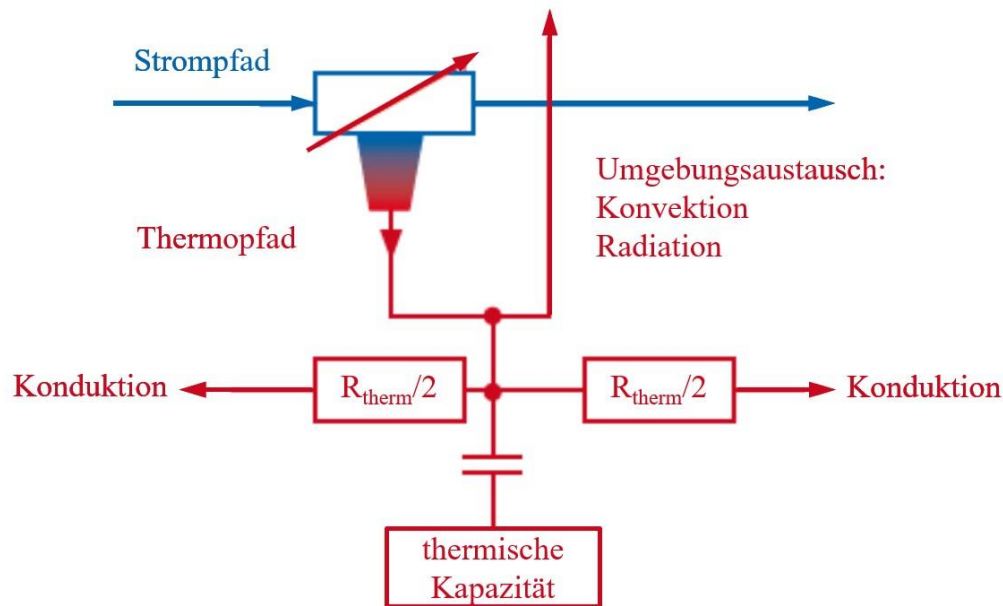


Abbildung 3: ZVEI Leitfaden Schema für elektro-thermische Kopplung
Quelle: ZVEI

Dabei wird ein elektrisches Bauteil mit seiner Wärmeproduktion als thermische Quelle interpretiert. Ein Teil der Wärme kann durch das Bauteil selber aufgenommen werden, die als thermische Kapazität bezeichnet wird. Des Weiteren kann Wärme beispielsweise mit der Umgebungsluft über Konvektion ausgetauscht oder über Wärmestrahlung durch Radiation abgestrahlt werden [11].

Die Wärmeleitung des Bauteils wird als Konduktion bezeichnet. Da in der Modellbildung der Wärmeeintrag in der Mitte des Bauteils angenommen wird, wird der thermische Widerstand der Konduktion jeweils hälftig auf beide Richtungen verteilt.

Für den Aufbau der thermischen Simulation in Matlab/Simscape können alle stromdurchflossenen Bauteile als Reihenschaltung von elektrischen und thermischen Widerständen, gemäß Abbildung 3, dargestellt werden. Die Bauteile stehen dabei in Wechselwirkung untereinander durch Konduktion, Konvektion und Radiation.

5 Konstruktion Verbesserungspotential: Erhöhung thermische Masse

Der Zielkonflikt des schnellen Ladens des Energiespeichers bedingt bei hohen Strömen eine erhöhte Wärmeentwicklung die mit der zweiten Potenz steigt, Gl. (4.3). Eine Möglichkeit um das Erreichen der limitierenden Grenztemperatur hinauszuzögern ist, die thermische Kapazität C_{th} der Verbindungsplatte und der Schiene für das Stromkabel zu erhöhen. Die thermische Kapazität C_{th} beschreibt die Fähigkeit eines Körpers thermische Energie zu speichern und wieder abzugeben. Sie steht dabei im proportionalen Verhältnis zu der Materialeigenschaft der spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m des Bauteils, Gl. (5.1), [11]:

$$C_{th} = m * c \quad (5.1)$$

Die Multiplikation der thermischen Kapazität C_{th} mit der Temperaturänderung dT als Ableitung nach der Zeit dt , ergibt den Wärmestrom \dot{Q} den der Körper aufnimmt oder abgibt, Gl. (5.2), [12]:

$$\dot{Q} = C_{th} * \frac{dT}{dt} = m * c * \frac{dT}{dt} \quad (5.2)$$

Die Masse der stromführenden Teile lässt sich leicht durch die Materialdicke erhöhen und erfordert in dem gegebenen Bauraum nur geringe Anpassungen, ohne die Außenkontur des Gehäuses zu beeinflussen.

Neben der Aufnahme von Energie in Form von Wärme, können die stromführenden Teile die Wärme auch innerhalb des Bauteils weiterleiten oder auch an andere Bauteile weitergeben. Dieser Effekt wird als Konduktion bezeichnet. Der Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Konduktion}}$ kann mit dem thermischen Widerstand $R_{\text{thermisch}}$ Gl. (4.4) und der Temperaturdifferenz ΔT bestimmt werden, Gl. (5.3), [12]:

$$\dot{Q}_{\text{Konduktion}} = \frac{1}{R_{\text{thermisch}}} * \Delta T = \frac{\lambda * A}{l} * \Delta T \quad (5.3)$$

Die Vergrößerung der Materialdicke der stromführenden Teile bewirkt eine proportionale Vergrößerung des Querschnitts A . Dadurch ergibt sich ebenfalls ein größerer Wärmestrom durch Konduktion, der die Abfuhr vom Wärme begünstigt.

6 Simulationsbasierter Test: Erhöhung thermische Masse

Für den simulationsbasierten Test wird die Materialdicke der Verbindungsplatten und die Schienen der Stromkabel um den Faktor 1,5 erhöht. Dadurch erhöht sich ebenfalls die Masse und der Bauteilquerschnitt um den Faktor 1,5. Absolut steigt die Masse der Bauteile dabei nur um wenige Gramm. Die Temperaturerwärmung der aktuellen Konstruktion als Basis wird mit den Ergebnissen aus der Simulation für die Variante mit der erhöhten thermischen Masse verglichen.

Als Randbedingungen werden eine Start- und Umgebungstemperatur von 25°C angenommen. Mit ausreichendem Abstand zur maximal zulässigen Temperatur von 90°C, wird eine Endtemperatur von 85°C an den Kontaktstiften festgelegt.

Der Ladestrom beträgt zu Beginn konstant 500A und wird nach Erreichen von 85°C solange reduziert bis sich ein konstanter Temperaturwert am Kontaktstift einstellt. Der eingestellt Kühlwert pro Kontaktstift beträgt 3,5W und wird über die Ladepistole der Ladestation abgeführt [13].

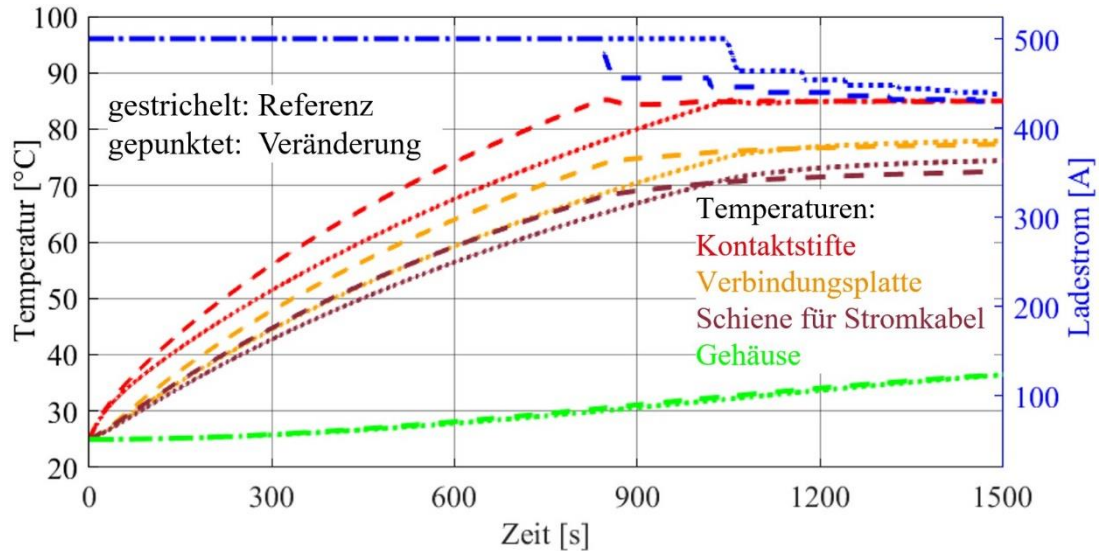


Abbildung 4: Vergleich von Basisversion mit Anpassung von Verbindungsplatte und Schiene für Stromkabel mit 1,5-facher thermischer Masse

7 Auswertung der Simulationstestergebnisse

Die Start- und Umgebungstemperatur beträgt, sowohl für die Basisversion als auch die angepaßte Version, 25°C. Bei einem konstanten Ladestrom von 500A, blaue Graphen, erreicht der Kontaktstift der Basisversion, rot gestrichelter Graph, innerhalb von 837s die für die Simulation festgelegte Endtemperatur von 85°C. In der angepaßten Version, rot gepunkteter Graph, wird die Endtemperatur von 85°C erst 209s später erreicht. Dies bedeutet, daß die Ladezeit bei 500A um 25% länger gehalten werden kann.

Zurückzuführen ist dies auf die Erhöhung der thermischen Masse von der Verbindungsplatte und der Schiene für das Stromkabel. Nach Gl. (5.1) wird durch die Erhöhung der Massen die thermische Kapazität vergrößert, die einen höheren Wärmestrom \dot{Q} ermöglicht Gl. (5.2) und damit als größere Wärmesenke dient. Durch die Fähigkeit mehr Wärme aufnehmen zu können, ergibt sich sowohl für die Verbindungsplatte, oranger Graph, und die Schiene für das Stromkabel, violetter Graph, eine langsamere Erwärmung. Die Reduktion des thermischen Widerstands $R_{\text{thermisch}}$ vergrößert dabei auch den konduktiven Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Konduktion}}$ Gl. (5.3). Dadurch kann die Wärme an die benachbarten Bauteile und das Gehäuse schneller abgeleitet werden.

Um einer Überschreitung der Endtemperatur entgegenzuwirken, muß der Ladestrom, nach Erreichen einer Temperatur am Kontaktstift von 85°C, reduziert werden. In der Basisversion wird der Ladestrom für 170s zunächst auf 456A reduziert, bis sich nach einer weiteren Reduktion nach 103s auf 440A eine konstante Temperatur am Kontaktstift von 85°C einstellt.

In der angepaßten Version wird der Ladestrom zunächst für 123s auf 464A reduziert. Nach der anschließenden Reduktion auf 448A nach 71s stellt sich am Kontaktstift ebenfalls eine konstante Temperatur von 85°C ein. Damit liegt der dauerhafte Ladestrom um 8A höher als bei der Basisversion. Insgesamt ergibt sich dadurch eine größere elektrische Energiemenge die in das System eingeführt wird, im Vergleich zu der Basisversion. Dies ist gleichbedeutend mit einem größeren Wärmestrom laut Gl. (4.3). Das Resultat ist in den zwei Graphen der Verbindungsplatte, orange, und der Stromschiene für das Kabel, violett, zu erkennen. Beide gepunkteten Linien liegen über dem Temperaturniveau der jeweiligen Basisversion, gestrichelte Graphen.

Ein ähnlicher Verlauf ist auch an der Erwärmung des Gehäuses zu erkennen, auch wenn der Temperaturunterschied nur schwach ausgeprägt ist. Der gesteigerte elektrische Energieeintrag äußert sich auch hier über die erhöhte Abwärme in einer höheren Gehäusetemperatur. Da die Masse und die ableitende Oberfläche des Gehäuses im Vergleich zu den stromführenden Teilen groß sind, lassen sich die geringen Temperaturunterschiede erklären.

8 Fazit

Durch das thermisch-simulationsbasierte Testen, des neuen Konstruktionsansatzes zur Erhöhung der thermischen Masse von stromführenden Leitern in der CCS Ladedose, konnte im Vorfeld die zu erwartenden Ergebnisse quantifiziert werden.

Der Vergleich zwischen der Ausgangsversion und des Konstruktionsansatzes, zeigte durch die höhere, thermische Kapazität, eine langsamere Erwärmung. Dadurch konnte der konstante Ladestrom von 500A um 209s, beziehungsweise 25%, länger aufrecht gehalten werden, bis die definierte Grenztemperatur von 85°C erreicht wurde. Dieses Ergebnis ist gleichbedeutend mit einer größeren, geladenen Energiemenge in gleicher Zeit. Da die Anpassungen an den Stromleitern trotz der Vergrößerung um den Faktor 1,5, absolut gesehen nur wenige Gramm mehr Material bedeuten, fallen die Änderungen insgesamt gering aus. Somit läßt sich dieser Konstruktionsansatz in dem vorhandenen Gehäuse umsetzen.

Durch den modularen Aufbau der thermischen Testsimulation, besteht die Möglichkeit weitere Vergleiche und Untersuchungen von neuen Lösungsansätzen, zur thermischen Optimierung der CCS Ladedose im Speziellen oder vergleichbaren Bauteilen aus dem Ladepfad im Allgemeinen, vorzunehmen.

Die Testsimulation kann somit dazu beitragen die Anzahl der Iterationsschleifen von Konstruktionsansätzen für die Bauteiloptimierung zu verringern und dadurch Entwicklungszeit und Kosten zu reduzieren.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Infineon Technologies AG, Neubiberg, Deutschland, <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electrified-commercial-vehicles/>, online 09.09.2024
- [2] ODAIMLER Truck AG, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland, <https://hub.mercedes-benz-trucks.com/de/de/trucks/eactros-600.html>, online 09.09.2024
- [3] S. Schulze, “Ist Megawatt Laden die Zukunft? Potentiale, Herausforderungen und Risiken”, Daimler Truck AG, tme (Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme), RWTH Aachen University, Aachen, März 2024
- [4] B. Hormmeyer, DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik), <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/mobility/news/megawatt-charging-system-elektrifizierung-schwerlastverkehr>, online 09.09.2024
- [5] R. Collin, Y. Miao, A. Yokochi, P. Enjeti, A. v. Jouanne, “Advanced Electric Vehicle Fast-Charging Technologies“, MDPI: Energies, Mai 2019
- [6] M. Thoben, F. Sauerland, K. Mainka, S. Edenharter, L. Beaurenaut, “Lifetime modeling and simulation of power modules for hybrid electrical/electrical vehicles”, Volume 54, Issues 9–10, 2014, Seiten 1806-1812, Science Direct, London, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.009>, 2014
- [7] DIN e.V., DIN EN IEC 62196-1:2022, Deutsche Fassung: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Berlin, 2022
- [8] M. Vidmar, Lectures on the scientific fundamentals of electrical engineering, University Ljubljana, Slowenien, Print ISBN 978-3-642-52572-8, 1928
- [9] C. Gerthsen, D. Meschede, Gerthsen Physik, Die ganze Physik zum 21. Jahrhundert, Springer, Berlin, ISBN 978-3-540-02622-8, 2004
- [10] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, Technischer Leitfaden Thermosimulationsmodelle Version 1.1, Köln, 2020
- [11] J.P. Huang, Transformation Thermotics for Thermal Conduction, Convection and Radiation, Springer, Singapore, Online ISBN 978-981-15-2301-4, Januar 2020
- [12] C. Borgnakke, R. E. Sonntag, Fundamentals of Thermodynamics, Weinheim, Wiley, 10th Edition, ISBN: 978-1-119-72365-3, Juli 2020
- [13] P. Steinmetz, Thermische Simulation einer CCS (Combined Charging System) Ladedose für Schwerlastkraftwagen, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, unveröffentlicht, April 2024